

DOI: 10.15507/2658-4123.031.202103 ISSN 2658-4123 (Print), 2658-6525 (Online)

**Том 31, № 3. 2021**

Научный журнал  
Основан в январе 1990 г.  
Периодичность издания –  
4 раза в год

16+



**Vol. 31, no. 3. 2021**

SCIENTIFIC JOURNAL  
Founded in January 1990  
Periodicity:  
Quarterly

# ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

DOI: 10.15507/2658-4123

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

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

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

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

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

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

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

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

Подписной индекс – **70539**

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

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

© ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», 2021

## Научный журнал «Инженерные технологии и системы»

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

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

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

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

Распространение – Российская Федерация, зарубежные страны.

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

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

01.03.02 Приборы и методы экспериментальной физики

01.03.06 Оптика

01.03.13 Электрофизика, электрофизические установки

04.03.01 Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

04.03.02 Электротехнологии, электрооборудование и электроснабжение агропромышленного комплекса

Журнал индексируется и архивируется в базах данных:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

EBSCO

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

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



## The scientific journal Engineering Technologies and Systems

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

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

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

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

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

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

The journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, where basic scientific results of dissertations for the degree of Doctor and Candidate of Sciences should be published for scientific specialties and branches of science:

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Technologies, Machinery and Equipment for Agro-Industries

Electrotechnics, Electrical Equipment and Power Supply in Agro-Industries

The journal is indexed and archived by databases:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Index of Science Citations

EBSCO

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

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

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

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



## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Вдовин Сергей Михайлович** – главный редактор, ректор ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат экономических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-7363-1389, rector@adm.mrsu.ru (Саранск, Российская Федерация)

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

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

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

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

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

**Ерофеев Владимир Трофимович** – академик Российской академии архитектуры и строительных наук, декан архитектурно-строительного факультета ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-8407-8144 (Саранск, Российская Федерация)

**Железникова Ольга Евгеньевна** – директор Института электроники и светотехники ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат технических наук, доцент, Scopus ID: 56362747600 (Саранск, Российская Федерация)

**Игумнов Леонид Александрович** – заведующий кафедрой теоретической, компьютерной и экспериментальной механики ФГАОУ ВО «Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского», доктор физико-математических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-3035-0119 (Нижний Новгород, Российская Федерация)

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

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

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

**Кусмарцев Федор Васильевич** – декан физического факультета Университета Лафборо (Лафборо, Великобритания); профессор Колледжа искусств и наук Университета Халифы, кандидат физико-математических наук, Scopus ID: 7006372417 (Абу-Даби, ОАЭ)

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

**Микаева Светлана Анатольевна** – заведующий кафедрой электроники ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», доктор технических наук, доцент, Scopus ID: 8542764000 (Москва, Российская Федерация)

**Нишев Константин Николаевич** – директор Института физики и химии ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-7905-3700 (Саранск, Российская Федерация)

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

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

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

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

**Чучаев Иван Иванович** – декан факультета математики и информационных технологий ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат физико-математических наук, доцент (Саранск, Российская Федерация)

**Шишелова Тамара Ильинична** – профессор кафедры физики ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», доктор технических наук, Scopus ID: 6507978465 (Иркутск, Российская Федерация)

**Ямашкин Анатолий Александрович** – декан географического факультета ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор географических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-9995-8371 (Саранск, Российская Федерация)

## EDITORIAL BOARD

- Sergey M. Vdovin** – *Editor-in-Chief*, Rector of National Research Mordovia State University, Cand.Sc. (Econ.), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-7363-1389, rector@adm.mrsu.ru (Saransk, Russian Federation)
- Petr V. Senin** – *Deputy Editor-in-Chief*, Vice-Rector for Science and Research, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Engr.), Professor, ORCID: 0000-0003-3400-7780, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru (Saransk, Russian Federation)
- Svetlana V. Gordina** – *Executive Editor*, Member of European Association of Science Editors (EASE), Cand.Sc. (Ped.), ORCID: 0000-0003-2265-418X, vestnik\_mrsu@mail.ru (Saransk, Russian Federation)
- Surhay Allahverdi** – Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Professor of the Ecology and Nature Management Chair, Moscow Pedagogical State University (Moscow, Russian Federation); Head of the Forest Industry Chair, Bartin University, D.Sc. (Biol.) (Bartın, Turkey)
- Aleksey G. Bulgakov** – Professor of the Chair of Industrial and Civil Engineering, Southwest State University (Kursk, Russian Federation); Professor of Faculty of Civil Engineering, Dresden University of Technology, D.Sc. (Engr.), ORCID: 0000-0003-4261-9840 (Dresden, Germany)
- Ivan I. Chuchayev** – Dean of the Mathematics and Information Technology Faculty, National Research Mordovia State University, Cand.Sc. (Phys.-Math.), Associate Professor (Saransk, Russian Federation)
- Valeriy P. Dimitrov** – Head of the Chair of Quality Management, Don State Technical University, D.Sc. (Engr.), Professor, ORCID: 0000-0003-1439-1674 (Rostov-on-Don, Russian Federation)
- Leonid A. Igumnov** – Head of the Numerical Simulation of Theoretical, Computer and Experimental Mechanics Chair, Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, ORCID: 0000-0003-3035-0119 (Nizhniy Novgorod, Russian Federation)
- Natalia L. Istomina** – Head of Physical Sciences Department, Russian Academy of Sciences, Deputy of Academic Secretary for Scientific and Organizational Work; Professor of the Innovation Management Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University); Editor-in-Chief, Photonics Russia, D.Sc. (Phys.-Math.), ORCID: 0000-0001-6008-1226 (Moscow, Russian Federation)
- Vladimir N. Kechemaykin** – Director of the Ruzaevka Institute of Mechanical Engineering, National Research Mordovia State University, Cand.Sc. (Econ.), Associate Professor (Saransk, Russian Federation)
- Aleksandr V. Kotin** – Professor of the Chair of Mechanization of Agricultural Production Processing, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Engr.), ORCID: 0000-0001-8235-0052 (Saransk, Russian Federation)
- Fedor V. Kusmartsev** – Head of Physics Department, Loughborough University (Loughborough, Great Britain); Professor of College of Art and Science, Khalifa University, Ph.D. (Phys.-Math.), Scopus ID: 7006372417 (Abu Dhabi, UAE)
- Oleg N. Kukharev** – Rector of Penza State Agrarian University, D.Sc. (Engr.), Professor, ORCID: 0000-0002-3519-4066 (Penza, Russian Federation)
- Svetlana A. Mikayeva** – Head of the Electronics Chair, MIREA – Russian Technological University, D.Sc. (Engr.), Associate Professor, Scopus ID: 8542764000 (Moscow, Russian Federation)
- Konstantin N. Nishchev** – Director of Institute of Physics and Chemistry, National Research Mordovia State University, Cand.Sc. (Phys.-Math.), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-7905-3700 (Saransk, Russian Federation)
- Yuriy N. Prytkov** – Director of Institute of Agriculture, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Agric.), Professor (Saransk, Russian Federation)
- Polina A. Ryabochkina** – Scientific Director of the Laboratory of Optical Spectroscopy of Laser Materials, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, ORCID: 0000-0001-8503-8486 (Saransk, Russian Federation)
- Abdel-Badeeh M. Salem** – Head of Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Research Labs, Professor of Faculty of Computers and Information Sciences, Ain Shams University, D.Sc. (CS), Emeritus Professor, ORCID: 0000-0003-0268-6539 (Cairo, Egypt)
- Tamara I. Shishelova** – Professor of the Physics Chair, Irkutsk National Research Technical University, D.Sc. (Engr.), Scopus ID: 6507978465 (Irkutsk, Russian Federation)
- Vladimir A. Skryabin** – Professor of the Chair of Technology and Equipment in Mechanical Engineering, Penza State University, D.Sc. (Engr.), ORCID: 0000-0001-7156-9198 (Penza, Russian Federation)
- Anatoliy A. Yamashkin** – Dean of Geography Faculty, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Geog.), Professor, ORCID: 0000-0001-9995-8371 (Saransk, Russian Federation)
- Vladimir T. Yerofeev** – Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Dean of Architectural and Civil Engineering Faculty, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Engr.), Professor, ORCID: 0000-0001-8407-8144 (Saransk, Russian Federation)
- Olga Ye. Zheleznikova** – Director of Institute of Electronics and Light Engineering, National Research Mordovia State University, Cand.Sc. (Engr.), Associate Professor, Scopus ID: 56362747600 (Saransk, Russian Federation)



## СОДЕРЖАНИЕ

### *ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ*

<b>Караева Ю. В., Тимофеева С. С.</b> Возможности получения биогаза из навоза и амаранта (на англ. яз.) .....	336
<b>Плотников С. А., Карташевич А. Н., Мотовилова М. В.</b> Оценка показателей процесса сгорания и тепловыделения в дизеле с предварительным подогревом топлива .....	349
<b>Димитров В. П., Борисова Л. В., Хубиян К. Л.</b> Моделирование знаний в задаче поиска причин неисправностей.....	364

### *ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА*

<b>Дорохов А. С., Сибирёв А. В., Аксенов А. Г., Мосяков М. А.</b> Результаты лабораторных исследований просеиваемости почвы пруткового элеватора с асимметричным расположением встряхивателей и регулируемым углом наклона полотна .....	380
<b>Савин В. Ю.</b> Исследование очесывающего аппарата устройства для уборки зерновых культур как колебательной системы .....	403
<b>Сайтов А. В., Сысуев В. А., Сайтов В. Е.</b> Исследование погружения зерна потоком в жидкость различной плотности методами планирования эксперимента.....	414

### *ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ*

<b>Жачкин С. Ю., Завражнов А. И., Пеньков Н. А., Мартынов А. В., Задорожний Р. Н.</b> Оценка модуля упругости композитных гальванических покрытий при их послойном осаждении .....	430
<b>Николенко С. В., Коневцов Л. А., Гордиенко П. С., Панин Е. С., Величко С. А.</b> Влияние добавки хрома и режимов при электроискровом легировании алюмоматричным анодным материалом стали 45 .....	449
<b>Ракутько С. А., Ракутько Е. Н.</b> Оценка равномерности поверхностного распределения потока излучения как фактора энергоэффективности светокультуры .....	470
<i>Информация для авторов и читателей (на рус. яз.)</i> .....	487
<i>Информация для авторов и читателей (на англ. яз.)</i> .....	489

## **CONTENTS**

### **PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS**

<b>Karaeva J. V., Timofeeva S. S.</b> Possibilities of Obtaining Biogas from Manure and Amaranth.....	336
<b>Plotnikov S. A., Kartashevich A. N., Motovilova M. V.</b> Evaluation of Combustion Performance and Heat Release in Preheated Fuel Consumed Diesel Engines .....	349
<b>Dimitrov V. P., Borisova L. V., Hubiyani K. L.</b> Knowledge Modeling in Troubleshooting .....	364

### **TECHNOLOGIES AND MEANS OF AGRICULTURAL MECHANIZATION**

<b>Dorokhov A. S., Sibirev A. V., Aksenov A. G., Mosyakov M. A.</b> Results of Laboratory Studies of Soil Sifting in a Rod Elevator with Asymmetric Arrangement of Web Agitators and Adjustable Elevator Apron Angle.....	380
<b>Savin V. Yu.</b> Study of a Stripper Header for Grain Harvesting as a Vibrating System .....	403
<b>Saitov A. V., Sysuev V. A., Saitov V. E.</b> Studying Grain Flow Immersion into Liquids of Various Densities Based on the Methods of Experiment Design .....	414

### **ELECTROTECHNOLOGIES AND ELECTRICAL EQUIPMENT IN AGRICULTURE**

<b>Zhachkin S. Yu., Zavrazhnov A. I., Penkov N. A., Martynov A. V., Zadorozhny R. N.</b> Estimation of the Elasticity Modulus of Composite Electroplated Coatings during Their Layer-by-Layer Deposition.....	430
<b>Nikolenko S. V., Konevtsov L. A., Gordienko P. S., Panin E. S., Velichko S. A.</b> Effect of Chromium Addition and Regimes during Electrosark Alloying with Aluminum Matrix Anode Material of Steel 45 .....	449
<b>Rakutko S. A., Rakutko E. N.</b> Assessment of Lighting Uniformity as a Factor of Energy Efficiency in Greenhouse Horticulture.....	470
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in Russian)</i> .....	487
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in English)</i> .....	489

# ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ / PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

УДК 63.620.95

DOI: [10.15507/2658-4123.031.202103.336-348](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.336-348)

Original article



## Possibilities of Obtaining Biogas from Manure and Amaranth

J. V. Karaeva\*, S. S. Timofeeva

*Institute of Power Engineering and Advanced Technologies, FRC  
Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences  
(Kazan, Russian Federation)*

\*[julieenergy@list.ru](mailto:julieenergy@list.ru)

**Introduction.** The use of biomass allows increasing the rate of biogas formation and its specific yield. This work aims to study the kinetics of methanogenesis and determine the optimal duration of digestion and organic load, which are the main indicators of the technological process of biogas formation.

**Materials and Methods.** The substrate (dairy manure, biomass of amaranth) was the study object. Experimental studies were carried out using a laboratory biogas plant. The computer program (certificate No. 2018662045) was used to obtain modified Gompertz models describing the kinetics of biogas formation. Based on the obtained data, the hydraulic retention time and organic loading rate (the key parameters in the design of biogas plants were determined).

**Results.** The paper presents the experimental studies results of the biogas formation kinetics when using dry amaranth biomass. The Gompertz mathematical models were obtained. Methane-tank control parameters (hydraulic retention time and organic loading rate) were obtained for anaerobic digestion of a new substrate.

**Discussion and Conclusion.** The use of new co-substrate *Amaranthus retroflexus* L. allowed increasing the specific biogas yield from dairy manure by 52.2 % and the ultrasonic pre-treatment in combination with the herbal supplement by 89.1 %. The optimal hydraulic retention time value was 10 days and organic loading rate was 4.1 kg of volatile solids per m<sup>3</sup> of digester per day.

**Keywords:** biogas, co-digestion, dairy manure, biomass, hydraulic retention time, amaranth

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

**For citation:** Karaeva J.V., Timofeeva S.S. Possibilities of Obtaining Biogas from Manure and Amaranth. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(3):336-348. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.336-348>

© Karaeva J. V., Timofeeva S. S., 2021



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

## Возможности получения биогаза из навоза и амаранта

Ю. В. Караева\*, С. С. Тимофеева

*Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ «Казанский научный центр РАН» (г. Казань, Российская Федерация)*

*\*julieenergy@list.ru*

**Введение.** Использование биомассы позволяет увеличивать скорость образования биогаза и его удельный выход. Целью данной работы является исследование кинетики метаногенеза и определение оптимальной продолжительности сбраживания и органической нагрузки как главных показателей технологического процесса образования биогаза.

**Материалы и методы.** Объектом исследования являлся субстрат (коровий навоз, биомасса амаранта). Экспериментальные исследования проводились на лабораторной биогазовой установке. Для получения модифицированных моделей Гомперца, описывающих кинетику образования биогаза, использовалась программа для ЭВМ (свидетельство № 2018662045). На основе полученных данных определялись время пребывания субстрата в метантенке и доза загрузки (ключевые параметры при проектировании биогазовых установок).

**Результаты исследования.** В работе представлены результаты экспериментальных исследований кинетики образования биогаза при использовании сухой биомассы амаранта. Получены математические модели Гомперца. Найдены показатели для контроля метантенка (время пребывания субстрата в метантенке и доза загрузки) для анаэробного сбраживания нового субстрата.

**Обсуждение и заключение.** Использование нового дополнительного субстрата *Amaranthus retroflexus* L. позволило увеличить удельный выход биогаза из коровьего навоза на 52,2 %, а предварительная обработка ультразвуком, в сочетании с травяной добавкой, – на 89,1 %. Оптимальное значение времени пребывания субстрата в метантенке составило 10 дней, доза загрузки – 4,1 кг органического сухого вещества на 1 м<sup>3</sup> аппарата в день.

**Ключевые слова:** биогаз, метановое сбраживание, коровий навоз, биомасса, время пребывания субстрата, амарант

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

**Для цитирования:** Караева, Ю. В. Возможности получения биогаза из навоза и амаранта / Ю. В. Караева, С. С. Тимофеева. – DOI 10.15507/2658-4123.031.202103.336-348 // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 3. – С. 336–348.

### Introduction

Sustainable development requires a systematic approach to solving the problem of organic waste recycling. At the moment, many technologies have been developed to reduce environmental pollution. However, in the application of methods for organic waste recycling, Russia has not yet reached the modern world level. Up to 250 million tons of organic waste is accumulated annually, a significant part of which decomposes

in an open environment, posing a serious threat to nature and humans.

The use of improved technologies and also the joining of various technologies for organic waste recycling contribute to the development of a “circular economy” and an increase in the efficiency of resource use [1–3].

At present, a combined technology, including anaerobic digestion (AD) and pyrolysis (Py), is of particular interest [4; 5].

It allows implementing a full cycle of organic waste recycling.

Three types of process integration are known [6]:

- AD-Py. Anaerobic digestate is used for pyrolysis as a valuable feedstock material for energy and biochar production;

- Py-AD. Pyrolysis products such as biochar, gas, aqueous phase can be suitable feedstock or effective additives for the AD process;

- AD-Py-AD combines the two previous methods.

Figure 1 shows the AD-Py technology combining biological and thermochemical processes. Livestock waste and plant biomass are sent for anaerobic digestion. The resulting biogas is used for energy production. The effluent is separated and dried, followed by thermochemical processing [3]. Synthesis gas and pyrolysis liquid are used as energy resources. Char residue is a good soil additive used to increase biomass yields [7]. The biomass is then used as feedstuff in livestock, and its waste is again sent for anaerobic digestion.

Such technologies are poorly studied since they include two processes: methanogenesis and thermochemical processing [8; 9]. This paper presents the experimental studies results of the first key process – anaerobic digestion of dairy manure and dry biomass of the weed plant *Amaranthus retroflexus* L. [10]. The description of the second process – the thermochemical processing of the effluent – is presented in another publication of the authors [10].

Several parameters influence the performance and biogas production for anaerobic digestion, but especially the organic loading rate (OLR) [11–13] and the hydraulic retention time (HRT) [14; 15]. Reactor control is based on OLR and HRT values [16]. The Modified Gompertz model is often used in practical applications to optimize process parameters for improving the design of the methane tank and the entire technology as a whole [15].

Some experimental studies were carried out in the laboratory of energy systems and technologies of the Institute of

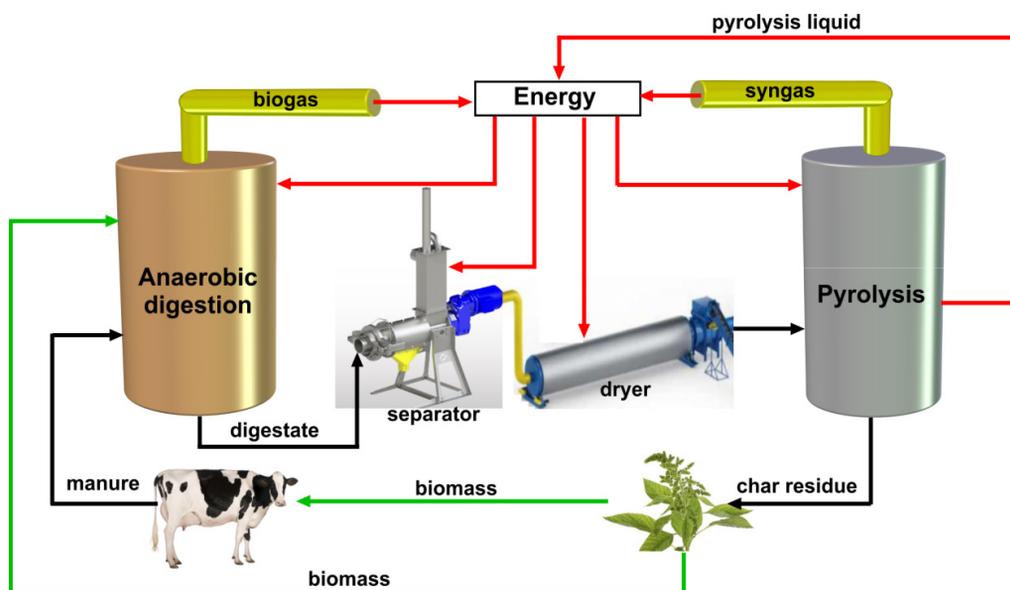


Fig. 1. The AD-Py technology

Power Engineering and Advanced Technologies of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences to obtain a modified Gompertz model, reactor control indicators (HRT and OLR) for anaerobic digestion of a new substrate.

The aim of this study is the applicability of co-digestion of manure and amaranth biomass for improving methane production at the mesophilic temperature.

### Literature Review

Anaerobic digestion of biomass (organic agricultural and domestic wastes) has a special place in energetics. It allows you to obtain biogas containing about 70 % methane, and disinfected organic fertilizers. Biomass utilization is extremely important in agriculture, where a large amount of fuel is spent on various technological needs, and the need for high-quality fertilizers is continuously increasing [17].

The total cow number in Russia is 8.3 million animal units. Thus annually more than 166.7 million tons of manure is accumulated in the region near livestock farms and poses a serious environmental threat. Besides, there is a tendency to increase the size of farms and reduce their total number. For example, in the Republic of Tatarstan (region of Russia), there are 11 megafarms, that are the largest in Europe.

Biogas production from dairy manure is unprofitable because of the low specific biogas yield [18]. Some researchers propose co-digestion to eliminate this problem [18–20]. The most popular co-substrates at biogas plants are maize, wheat straw, and grass [21–24].

Combined treatment of several substrates under AD can increase the efficiency of biogas production. The synergistic effect is achieved by the fact that the

necessary microelements and nutrients contained in substrates in different quantities reach their optimal values under the correct combination [25]. At co-digestion, it is also possible to regulate the C/N ratio, which promotes better biological decomposition of organic waste and, accordingly, increases the biogas yield [26; 27].

Biogas is a promising renewable energy source that is why the search for suitable substrates is at the center of attention. During the period from 2009 to 2018, biogas production in the world doubled and continues to grow [28]. In European countries, 70 % of substrates for biogas production come from the agro-industrial complex and include manure and crop waste<sup>1</sup>.

Plants of the Amaranth family are promising co-substrates for a significant increase in the rate of methanogenesis and the amount of produced biogas [29]. Thus, in earlier studies, it was proved that the biomass of plants from the *Amaranthaceae* family is a co-substrate for anaerobic digestion. But since cultivar amaranth is an expensive raw material, it was necessary to continue the search for affordable and cost-effective methanogenesis stimulating agents. In the present work, an experiment with biomass of *Amaranthus retroflexus* L. the closest wild-growing relative of amaranth was conducted.

### Materials and Methods

The substrate (dairy manure, biomass of amaranth) was the object of the study. It was stored for two days in a refrigerator at 4 °C.

*Amaranthus retroflexus* L. and *Amaranthus cruentus* L. were gathered in the dissemination phase at the field in the Republic of Tatarstan (Russia).

The co-digestion process was studied in the laboratory experimental setup consisting of an LB-162 water bath,

<sup>1</sup> Calderon C., Colla M., Jossart J.-M., et al. Statistical Report: Biogas. 2019. 23 p. Available at: <https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2020/01/EBA-AR-2019-digital-version.pdf> (accessed 22.03.2021). (In Eng.)

0.5 l anaerobic digesters, plastic containers, measuring cylinders, a system of rubber hoses, ultrasonic technological apparatus of the Series “Wave” UZTA-0.2/22 Ohm (Fig. 2).

The experiments were carried out in three repetitions; a thermostatic water bath maintained a mesophilic temperature (37 °C).

The volume of produced biogas was determined daily [29]. The composition of the gas was determined every 7 days in two repetitions by gas-liquid chromatography. Biogas was sampled using a 1 000 µl gas-tight syringe. Khrom 5 gas chromatograph (Austria), Porapak Q column (2.4 m long), thermal conductivity detector and gas carrier. He were used for this purpose.

The following substrates compositions were used in the experiments (table 1).

Pre-treatment was carried out for 4 minutes using the ultrasonic device with the power of 80 W at an oscillation frequency of 22 kHz and an exposure intensity of at least 10 W/cm<sup>2</sup>.

The experiments were considered complete “when the daily biogas yield was less than 1 % of the cumulative gas yield for three days” [30]. The experiment lasted 55 days. For sample No. 1 (control), the digestion period was 37 days. For other samples, it was 55 days. The analysis of biogas yield kinetics was normalized by pressure ( $P = 101.3$  kPa) and temperature ( $T = 0$  °C).

Elemental analysis of the studied samples was carried out using the



Fig. 2. Experimental set-up

Table 1

Composition of samples for experiments

Sample	Dairy manure mass, g	Biomass additive	Biomass / Manure ratio	Total volatile solids, g VS·L <sup>-1</sup>	Ultrasonic pre-treatment
No. 1	80	–	–	40.4	no
No. 2	48	<i>Amaranthus retroflexus</i> L.	1:8	40.9	no
No. 3	48	<i>Amaranthus retroflexus</i> L.	1:8	40.9	yes
No. 4	48	<i>Amaranthus cruentus</i> L.	1:8	40.9	yes



Euro EA 3000 analyzer (analysis conditions: column temperature 115 °C, furnace temperature 850 °C).

The content of macro- and microelements was studied using the EDX-800HS2 energy-dispersive fluorescence X-ray spectrometer manufactured by Shimadzu (Japan) by a semi-quantitative method [10].

A modified Gompertz model was used by many authors to describe the kinetics of gas formation in batch anaerobic digesters from various organic substrates [21]. The modified Gompertz equation has the following form:

$$F(l) = W \exp \left( \exp \left( \frac{R_{\max} \cdot e}{W} (\alpha - l) + 1 \right) \right), \quad (1)$$

where  $F(l)$  – cumulative specific gas production at a time  $l$  days, liters per kilogram of volatile solids (L/kg VS);  $W$  – the gas production potential (L/kg VS);  $R_{\max}$  – maximum gas production rate, L/kg VS·day;  $\alpha$  – lag phase period, day [31].

### Results

The main characteristics of dairy manure were: volatile solids (VS) (the percentage of VS content from total solids content),  $75.03 \pm 4.68$  %; total solids (TS),  $16.82 \pm 1.45$  %. Its principal characteristics

of amaranth dry biomass were: VS =  $75.97 \pm 0.6$  % (the percentage of VS content from TS content); TS =  $89.55 \pm 0.3$  %. Table 2 presents the results.

The C/N ratio for manure was equal to  $16.5 \pm 0.3$ , for *Amaranthus retroflexus* L.:  $7.8 \pm 0.35$  and *Amaranthus cruentus* L.:  $11.1 \pm 0.2$ .

Table 3 presents the results, where AR is biomass of *Amaranthus retroflexus* L., and AC is biomass of the *Amaranthus cruentus* L.

Very high content of calcium and potassium was observed in the dry biomass of plants leaves.

A statistical analysis was performed. The experimental biogas productions were always referred to average values. Analysis of variance (ANOVA) was used to assess the influence of the analyzed factor. The significance threshold was set at 0.05. Table 4 presents the results of the analysis of variance.

There is a significant difference in the average biogas yield for all substrates with a probability of 95 %. Since the value of  $F$  is higher than the value of  $F_{\text{crit}}$  for a given number of groups, the dispersion between groups makes a greater contribution to any sum of dispersions than that within the groups. In other words, the

Table 2

Elemental composition of substrates

	C, %	H, %	O, %	N, %
Dairy manure	27.13	4.72	41.54	1.64
<i>Amaranthus retroflexus</i> L.	32.61	5.24	40.45	4.22
<i>Amaranthus cruentus</i> L.	32.33	5.49	40.62	2.91

Table 3

Content of macro- and microelements in the dry biomass, %

Name	Ca	K	P	S	Fe	Mn	Sr	Br	Si	Cl	Mg	Zn
AR	54.58	32.32	2.81	3.47	0.44	0.17	0.10	0.08	0.65	0.84	4.48	0.07
AC	58.74	20.82	3.95	3.15	1.22	0.19	0.10	0.05	2.51	3.35	5.83	0.07

Table 4

One way ANOVA for biogas yield

SUMMARY						
Groups	Number of observations	Sum	Average	Variance		
Sample No. 1	37	3 943.29	106.58	3 932.01		
Sample No. 2	55	6 137.14	111.58	6 069.09		
Sample No. 3	55	7 712.55	140.23	7 769.96		
Sample No. 4	55	3 666.73	66.67	6 141.98		
ANOVA						
Source of variation	Sums of squares	Degrees of freedom (df)	Mean square (MS)	Fisher criterion $F$	p-value	Critical value $F_{crit}$
Between groups	151 238	3	50 412.69	8.18	$3.69 \cdot 10^{-5}$	2.65
Within groups	1 220 528	198	6 164.28			
Total	1 371 766	201				

co-digestion of dairy manure and co-substrates in the anaerobic digesters has a significant effect on the biogas yield. This effect is accounted for an improvement in the nutrient balance in the mixture of manure and biomass of *Amaranthus retroflexus* L. and *Amaranthus cruentus* L. for co-digestion, which increases the solubilisation, decomposition and production of biomethane.

The amount of daily produced biogas is an important indicator for comparing the various substrates used to produce biogas. The Figure 3 presents the daily specific biogas yield for the four considered substrates.

In their study Z. Wang and co-authors reported that, “when carrying out experiments on the co-digestion of acorn slag and dairy manure with bio-based carbon, two peaks of biogas production were also observed” [32]. The authors explain this by “the degradation of carbohydrates and crude protein in the anaerobic digesters” [32]. The two peaks observed in biogas production occur because the

carbohydrates decomposition can be very fast within a few days, and sometimes it can take several weeks to transform crude proteins.

Figure 4 shows the cumulative specific methane yield for the four considered substrates. Numerous literature data on the production of biogas from cattle manure indicate a specific biogas yield in the range between 140 and 266 L/kg VS [33]. The obtained experimental data (sample No. 1, control) 171 L/kg VS are consistent with the literature data. Specific biogas yield for sample No. 2 was 228 L/kg VS. The use of ultrasonic pre-treatment allowed increasing the specific biogas yield to 264 L/kg VS (sample No. 3). Specific biogas yield for sample No. 4 was 202 L/kg VS. Thus, *Amaranthus retroflexus* L. is as good as the herbal supplement *Amaranthus cruentus* L.

The content of lignin in the diet of animals has a key influence on biogas production at the digestion of dairy manure. In spring and summer, when fresh grass is in the diet of animals, an increase in the

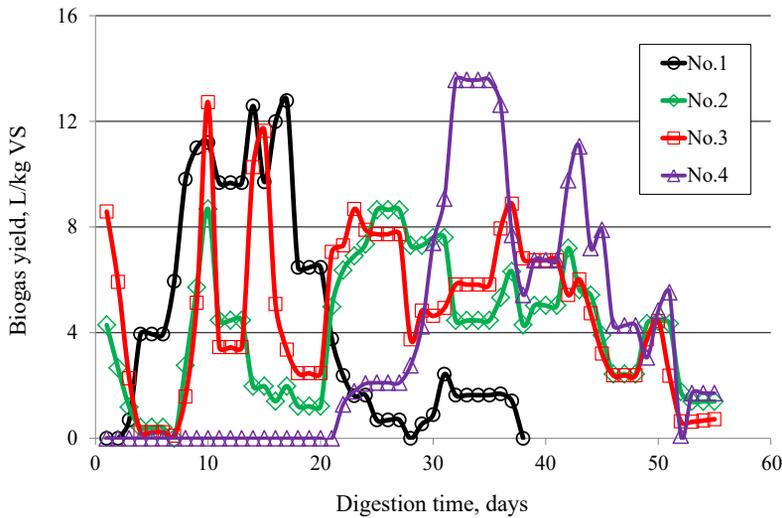


Fig. 3. Kinetics of gas formation

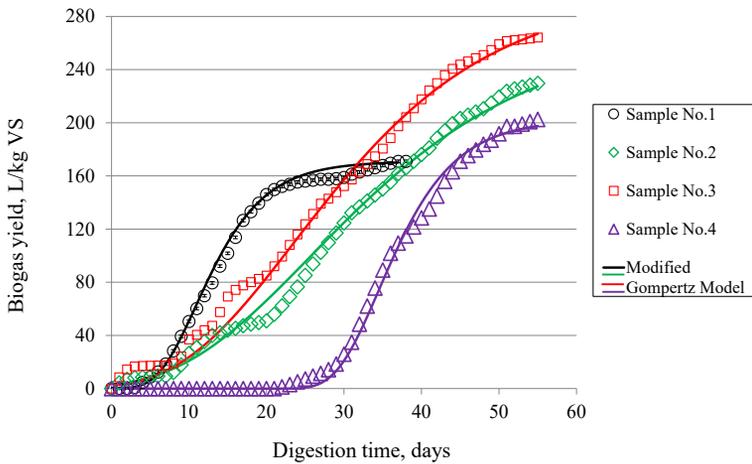


Fig. 4. Cumulative biogas yield

specific biogas yield is observed at anaerobic digestion of dairy manure [33]. Because experimental studies were carried out in the autumn when animals fed on hay, the specific production of biogas was lower than it could be in summer.

The computer program developed at the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (certificate No. 2018662045) was used to obtain modified Gompertz models describing the kinetics of biogas formation<sup>2</sup>. Table 5 presents

<sup>2</sup> [Kinetic Analysis of Biogas Production]: Certificate of State Registration of the Program for ECM 2 018 662 045 Russian Federation. Appl. 25.09.2018; publ. 25.09.2018. (In Russ.)

the obtained kinetic constants. The maximum biogas production rate is higher in the experiment with biomass of *Amaranthus cruentus* L. According to the biogas production potential, the dry biomass of *Amaranthus retroflexus* L. treated with ultrasound would be highly competitive with the biomass of *Amaranthus cruentus* L. The longest lag-phase was observed in the experiment *Amaranthus cruentus* L.

Figure 5 shows the total biogas production end the methane content in biogas [34]. The maximum methane production was achieved on the second or third week of digestion. The maximum methane yield in biogas was observed for sample No. 3. It was 65.9 %.

Thus, the specific methane yield for sample No. 1 was 92 L/kg VS, for No. 2 – 140 L/kg VS, for No. 3 – 174 L/kg VS, for No. 4 – 139 L/kg VS. When using *Amaranthus retroflexus* L. biomass, the specific methane yield is 25 % higher than when using the *Amaranthus cruentus* L. biomass.

The key control parameters for a conditionally continuous-action methane tank (HRT, OLR) were determined using the computer program developed at the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences<sup>3</sup>. The initial data were the results of experimental studies for the batch methane tank, namely, the function of the cumulative biogas yield and the biogas yield rate as a function of time (see Fig. 6

Table 5

Kinetic constants of the modified Gompertz model

No.	$W$ , L/kg VS	$R_{max}$ , L/kg VS·day	$\alpha$ , day	$R^2$	Pearson's correlation coefficient $R^2$	Standard error, %
1	170.91	12.78	6	1.0000	0.9978	5.09
2	270.00	6.00	9	1.0000	0.9941	2.64
3	300.00	7.60	9	1.0000	0.9958	3.59
4	202.49	13.57	29	0.9999	0.9964	9.30

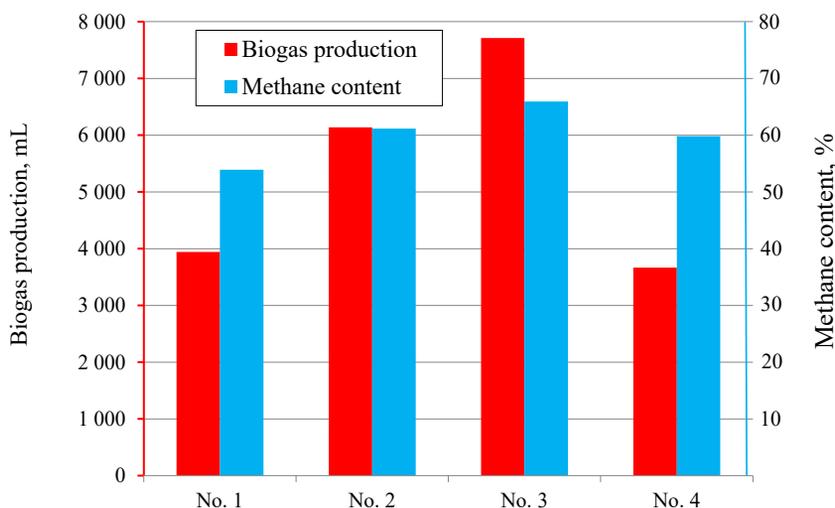


Fig. 5. Total biogas production and methane concentration

<sup>3</sup> [Optimization of Operating Modes of the Apparatus]: Certificate of State Registration of the Program for ECM 2 015 662 618 Russian Federation. Appl. 27.11.2015; publ. 20.12.2015. (In Russ.)

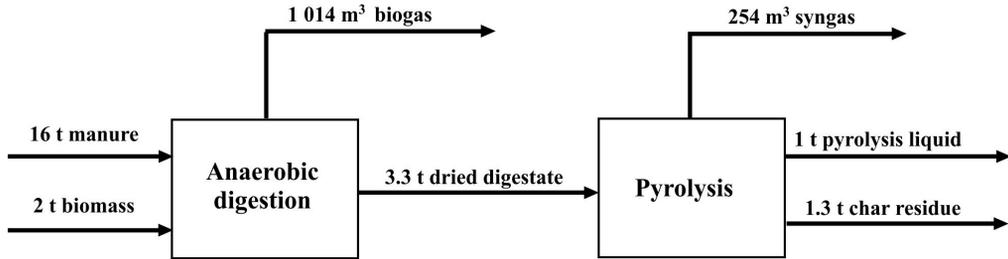


Fig. 6. Material balance of the AD-Py technology

for an example). The optimal HRT value was 10 days, OLR 4.1 kg VS/m<sup>3</sup> of digester per day. Let us consider a biogas plant, processing daily 18 tons of organic waste. When changing the composition of the processed substrate, 2 tons of *Amaranthus retroflexus* L. and 16 tons of manure should be added every day to the biogas plant. The material balance of anaerobic digestion was compiled based on the experimental data presented in this work. The material balance of the pyrolysis of the dried digestate was compiled based on the experimental data presented by the scientists [10].

After applying the preliminary ultrasonic treatment (an oscillation frequency of 22 kHz and an exposure intensity of at least 10 W/cm<sup>2</sup>) and introducing a new herbal additive into the methane tank, the daily biogas yield will increase to 1 014 m<sup>3</sup>. Daily use of biogas will make it possible to obtain 5 576.7 kW·h, synthesis gas – 846.7 kW·h, and pyrolysis liquid 5 611 kW·h.

### Discussion and Conclusion

In this study, a higher biogas yield was due to a synergistic effect caused by technological (ultrasonic pre-treatment) and

microbiological (co-digestion) effects. The paper presents the use of a new phyto-genous co-substrate. A weed plant cosmopolite amaranth (*Amaranthus retroflexus* L.) was used for this purpose. The biogas production potential at mono-digestion of dairy manure was 170.91 L/kg VS when using dry amaranth (*Amaranthus retroflexus* L.) – 270 L/kg VS when using the preliminary ultrasonic treatment and dry amaranth (*Amaranthus retroflexus* L.) – 300 L/kg VS.

The use of new co-substrate *Amaranthus retroflexus* L. allowed increasing the cumulative biogas yield from dairy manure by 52.2 % and the ultrasonic pre-treatment in combination with the herbal supplement by 89.1 %.

The biomass of *Amaranthus retroflexus* L. was found to be comparable with the biomass of *Amaranthus cruentus* L. Therefore, further studies on the use of the co-substrate *Amaranthus retroflexus* L. in biogas plants are needed. It is especially important in the production of biogas from difficultly fermented substrates.

The optimal HRT value was 10 days, OLR 4.1 kg VS/m<sup>3</sup> of digester per day.

## REFERENCES

1. Kapoor R., Ghosh P., Kumar M., et al. Valorization of Agricultural Waste for Biogas Based Circular Economy in India: A Research Outlook. *Bioresource Technology*. 2020; 304. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123036>

2. Abad V., Avila R., Vicent T., Font X. Promoting Circular Economy in the Surroundings of an Organic Fraction of Municipal Solid Waste Anaerobic Digestion Treatment Plant: Biogas Production

Impact and Economic Factors. *Bioresource Technology*. 2019; 283:10-17. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.064>

3. Monlau F., Francavilla M., Sambusiti C., et al. Toward a Functional Integration of Anaerobic Digestion and Pyrolysis for a Sustainable Resource Management. Comparison between Solid-Digestate and Its Derived Pyrochar as Soil Amendment. *Applied Energy*. 2016; 169:652-662. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.084>

4. Tayibi S., Monlau F., Marias F., et al. Coupling Anaerobic Digestion and Pyrolysis Processes for Maximizing Energy Recovery and Soil Preservation According to the Circular Economy Concept. *Journal of Environmental Management*. 2021; 279. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111632>

5. González-Arias J., Fernández C., Rosas J.G., et al. Integrating Anaerobic Digestion of Pig Slurry and Thermal Valorisation of Biomass. *Waste and Biomass Valorization*. 2020; 11:6125-6137. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00873-w>

6. Feng Q., Lin Yu. Integrated Processes of Anaerobic Digestion and Pyrolysis for Higher Bioenergy Recovery from Lignocellulosic Biomass: a Brief Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; 77:1272-1287. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.022>

7. Nigam N., Shanker K., Khare P. Valorisation of Residue of *Mentha arvensis* by Pyrolysis: Evaluation of Agronomic and Environmental Benefits. *Waste and Biomass Valorization*. 2019; 9:1909-1919. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9928-7>

8. Giwa A.S., Xu H., Chang F., et al. Pyrolysis Coupled Anaerobic Digestion Process for Food Waste and Recalcitrant Residues: Fundamentals, Challenges, and Considerations. *Energy Science and Engineering*. 2019; 7(6):2250-2264 (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1002/ese3.503>

9. González R., González J., Rosas J.G., et al. Biochar and Energy Production: Valorizing Swine Manure through Coupling Co-Digestion and Pyrolysis. *Journal of Carbon Research*. 2020; 6(2). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/c6020043>

10. Karaeva J.V., Timofeeva S.S., Bashkirov V.N., et al. Thermochemical Processing of Digestate from Biogas Plant for Recycling Dairy Manure and Biomass. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2021. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01138-6>

11. Zhou J., Yang J., Yu Q., et al. Different Organic Loading Rates on the Biogas Production during the Anaerobic Digestion of Rice Straw: A Pilot Study. *Bioresource Technology*. 2017; 244(1):865-871. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.146>

12. Jiang J., He Sh., Kang X., et al. Effect of Organic Loading Rate and Temperature on the Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste: Process Performance and Energy Recovery. *Frontiers in Energy Research*. 2020. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00089>

13. Musa M.A., Idrus S., Hasfalina C.M., Daud N.N.N. Effect of Organic Loading Rate on Anaerobic Digestion Performance of Mesophilic (UASB) Reactor Using Cattle Slaughterhouse Wastewater as Substrate. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018; 15(10). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph15102220>

14. Shi X.-Sh., Dong J.-J., Yu J.-H., et al. Effect of Hydraulic Retention Time on Anaerobic Digestion of Wheat Straw in the Semicontinuous Continuous Stirred-Tank Reactors. *BioMed Research International*. 2017. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/2457805>

15. Pramanik S.K., Suja F.B., Porhemmat M., Pramanik B.K. Performance and Kinetic Model of a Single-Stage Anaerobic Digestion System Operated at Different Successive Operating Stages for the Treatment of Food Waste. *Processes*. 2019; 7(9). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/pr7090600>

16. Sarker S., Lamb J.J., Hjelme D.R., Lien K.M. A Review of the Role of Critical Parameters in the Design and Operation of Biogas Production Plants. *Applied Sciences*. 2019; 9(9). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/app9091915>

17. Abbas Y., Jamil F., Rafiq S., et al. Valorization of Solid Waste Biomass by Inoculation for the Enhanced Yield of Biogas. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2020; 22:513-522. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01799-6>

18. Esteves E.M.M., Herrera A.M.N., Esteves V.P.P., Morgado C.R.V. Life Cycle Assessment of Manure Biogas Production: A Review. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 219:411-423. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.091>

19. Sevillano C.A., Pesantes A.A., Carpio E.P., et al. Anaerobic Digestion for Producing Renewable Energy – The Evolution of This Technology in a New Uncertain Scenario. *Entropy*. 2021; 23(2). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/e23020145>
20. Sukhesh M.J., Rao P.V. Synergistic Effect in Anaerobic Co-Digestion of Rice Straw and Dairy Manure – A Batch Kinetic Study. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2019; 41(17):2145-2156 (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1550536>
21. Alhraishawi A.A., Alani W.K. The Co-Fermentation of Organic Substrates: A Review Performance of Biogas Production under Different Salt Content. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018; 1032. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1032/1/012041>
22. Awasthi M.K., Sarsaiya S., Wainaina S., et al. A Critical Review of Organic Manure Biorefinery Models toward Sustainable Circular Bioeconomy: Technological Challenges, Advancements, Innovations, and Future Perspectives. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2019; 111:115-131. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.017>
23. Begum S., Ahuja S., Anupaju G.R., et al. Operational Strategy of High Rate Anaerobic Digester with Mixed Organic Wastes: Effect of Co-Digestion on Biogas Yield at Full Scale. *Environmental Technology*. 2020; 41(9):1151-1159. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1523232>
24. Lv Z.Y., Feng L., Shao L.J., et al. The Effect of Digested Manure on Biogas Productivity and Microstructure Evolution of Corn Stalks in Anaerobic Cofermentation. *Biomed Research International*. 2018; (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/5214369>
25. Dębowski M., Kisiielewska M., Kazimierowicz J., et al. The Effects of Microalgae Biomass Co-Substrate on Biogas Production from the Common Agricultural Biogas Plants Feedstock. *Energies*. 2020; 13(9). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/en13092186>
26. Rincón B., Fernández-Rodríguez M.J., Lama-Calvente D., Borja R. The Influence of Microalgae Addition as Co-Substrate in Anaerobic Digestion Processes. In: E. Jacob-Lopes, ed. *Microalgal Biotechnology*. IntechOpen; 2018. p. 899-927. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.75914>
27. Shah F.A., Mahmood Q., Rashid N., et al. Co-Digestion, Pretreatment and Digester Design for Enhanced Methanogenesis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015; 42:627-642. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.053>
28. Kulichkova G.I., Ivanova T.S., Köttner M., et al. Plant Feedstocks and Their Biogas Production Potentials. *The Open Agriculture Journal*. 2020; 14:219-234. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2174/1874331502014010219>
29. Karaeva J.V., Kamalov R.F., Kadiyrov A.I. Production of Biogas from Poultry Waste Using the Biomass of Plants from Amaranthaceae Family. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 288. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/288/1/012096>
30. Garcia N.H., Mattioli A., Gil A., et al. Evaluation of the Methane Potential of Different Agricultural and Food Processing Substrates for Improved Biogas Production in Rural Areas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019; 112. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.040>
31. Selvaraj B., Krishnasamy S., Munirajan S., et al. Kinetic Modelling of Augmenting Biomethane Yield from Poultry Litter by Mitigating Ammonia. *International Journal of Green Energy*. 2018; 15(12):766-772. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/15435075.2018.1529580>
32. Wang Z.Q., Yun S.N., Xu H.F., et al. Mesophilic Anaerobic Co-Digestion of Acorn Slag Waste with Dairy Manure in a Batch Digester: Focusing on Mixing Ratios and Bio-Based Carbon Accelerants. *Bioresour Technol*. 2019; 286. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121394>
33. Caruso M.C., Braghieri A., Capece A., et al. Recent Updates on the Use of Agro-Food Waste for Biogas Production. *Applied Sciences*. 2019; 9(6). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/app9061217>
34. Rusanowska P., Zieliński M., Dudek M.R., Dębowski M. Mechanical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Methane Fermentation in Innovative Reactor with Cage Mixing System. *Journal of Ecological Engineering*. 2018; 19(5):219-224. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/89822>

Submitted 26.03.2021; approved after reviewing 21.04.2021; accepted for publication 10.06.2021

Поступила 26.03.2021; одобрена после рецензирования 21.04.2021; принята к публикации 10.06.2021

*About the authors:*

**Julia V. Karaeva**, Leading Researcher, Head of the Power Systems and Technologies Laboratory, Institute of Power Engineering and Advanced Technologies, FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences (2/31 Lobachevsky St., Kazan 420111, Russian Federation), Cand.Sc. (Engr.), Researcher ID: F-6917-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9275-332X>, [julieenergy@list.ru](mailto:julieenergy@list.ru)

**Svetlana S. Timofeeva**, Senior Researcher of the Power Systems and Technologies Laboratory, Institute of Power Engineering and Advanced Technologies, FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences (2/31 Lobachevsky St., Kazan 420111, Russian Federation), Cand.Sc. (Engr.), Researcher ID: AAZ-5531-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4168-2442>, [zvezdochka198512@mail.ru](mailto:zvezdochka198512@mail.ru)

*Contributions of the authors:*

J. V. Karaeva – formulating the research task, conducting experiments, analysis of the results, and conclusions.

S. S. Timofeeva – conducting experimental research, analyzing and drawing conclusions.

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

*Об авторах:*

**Караева Юлия Викторовна**, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией энергетических систем и технологий Института энергетики и перспективных технологий ФИЦ «Казанский научный центр РАН» (420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31), кандидат технических наук, Researcher ID: F-6917-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9275-332X>, [julieenergy@list.ru](mailto:julieenergy@list.ru)

**Тимофеева Светлана Сергеевна**, старший научный сотрудник лаборатории энергетических систем и технологий Института энергетики и перспективных технологий ФИЦ «Казанский научный центр РАН» (420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31), кандидат технических наук, Researcher ID: AAZ-5531-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4168-2442>, [zvezdochka198512@mail.ru](mailto:zvezdochka198512@mail.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

Ю. В. Караева – формулирование задачи исследования, проведение экспериментов, анализ полученных результатов, выводы.

С. С. Тимофеева – проведение экспериментальных исследований, анализ и формирование выводов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*



## Оценка показателей процесса сгорания и тепловыделения в дизеле с предварительным подогревом топлива

С. А. Плотников\*, А. Н. Карташевич, М. В. Мотовилова  
ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»  
(г. Киров, Российская Федерация)  
\*plotnikovsa@bk.ru

*Введение.* В связи с расширением парка тракторов и автомобилей к двигателям внутреннего сгорания предъявляются повышенные требования. Данная проблема может быть решена путем улучшения рабочего процесса в дизельном двигателе. Этого можно достичь при помощи термического воздействия на дизельное топливо в системе топливоподачи. Внешнее термическое воздействие осуществляется на линии высокого давления непосредственно перед форсунками.

*Материалы и методы.* Для анализа и расчета процесса сгорания и тепловыделения дизельного топлива с предварительной термической подготовкой топлива проведены стендовые испытания с использованием программного обеспечения National Instruments и необходимого оборудования.

*Результаты исследования.* Получены экспериментальные данные процесса сгорания дизельного топлива в цилиндре двигателя 4ЧН 11,0/12,5. Проведен анализ процесса сгорания и тепловыделения дизеля с предварительным высокотемпературным воздействием на топливо. Построены индикаторные диаграммы, графики тепловыделения, максимальной осредненной температуры газов в цилиндре двигателя, активного и полного тепловыделения. Экспериментальные данные показали снижение периода задержки воспламенения, максимальной температуры цикла в цилиндрах двигателя, ускорение начала тепловыделения и процесса сгорания. Получены значения показателей процесса сгорания дизельного топлива.

*Обсуждение и заключение.* На основе проведенных исследований выявлены зависимости показателей процесса сгорания топлива дизельного двигателя с подогревом до высоких температур. Индикаторные диаграммы позволяют сделать вывод о влиянии температуры подогрева топлива на интенсификацию процесса сгорания. Наблюдается ускорение начала тепловыделения, уменьшение скорости нарастания давления, снижение жесткости работы двигателя.

**Ключевые слова:** индикаторная диаграмма, тепловыделение, подогрев топлива, процесс сгорания, дизельный двигатель

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

**Для цитирования:** Плотников, С. А. Оценка показателей процесса сгорания и тепловыделения в дизеле с предварительным подогревом топлива / С. А. Плотников, А. Н. Карташевич, М. В. Мотовилова. – DOI 10.15507/2658-4123.031.202103.349-363 // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 3. – С. 349–363.



## Evaluation of Combustion Performance and Heat Release in Preheated Fuel Consumed Diesel Engines

S. A. Plotnikov\*, A. N. Kartashevich, M. V. Motovilova

*Vyatka State University (Kirov, Russian Federation)*

\*plotnikovsa@bk.ru

*Introduction.* The expansion of the fleet of tractors and vehicles causes increased requirements for internal combustion engines. This problem can be solved by improving the work process in a diesel engine that can be achieved by heating the diesel fuel in the fuel supply system. External thermal action is carried out on the high pressure line directly in front of the injectors.

*Materials and Methods.* To analyze and calculate the process of combustion and heat release in a diesel engine with preliminary thermal fuel preparation, bench tests were carried out using the National Instruments software and the necessary equipment.

*Results.* Experimental data of the diesel fuel combustion process in the cylinder of the 4CHN 11.0/12.5 engine are obtained. The analysis of the combustion performance and heat release of diesel with a preliminary high-temperature effect on the fuel was carried out. Indicator diagrams, graphs of heat release, the maximum average temperature of gases in the engine cylinder, and graphs of active and total heat release were constructed. The experimental data showed a decrease in the ignition delay period, the maximum cycle temperature in the engine cylinders, and an acceleration of the start of heat release and combustion process. The values of the parameters of the diesel fuel combustion process are obtained.

*Discussion and Conclusion.* On the basis of the conducted studies, the dependences of the parameters of the combustion process of a diesel engine with fuel heating to high temperatures are revealed. Indicator diagrams allow drawing a conclusion about the influence of the fuel heating temperature on the intensification of the combustion process. There is an acceleration of the beginning of heat release, a decrease in the rate of pressure build-up and in the rigidity of the engine.

**Keywords:** indicator diagram, heat generation, fuel heating, combustion process, diesel engine

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

**For citation:** Plotnikov S.A., Kartashevich A.N., Motovilova M.V. Evaluation of Combustion Performance and Heat Release in Preheated Fuel Consumed Diesel Engines. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(3):349-363. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.349-363>

### Введение

Исследования по улучшению процесса сгорания в дизельных двигателях проводятся на протяжении десятков лет. К дизельным транспортным средствам предъявляются высокие эксплуатационные и экологические требования. Выполнение данных условий возможно при улучшении рабочего процесса дизельного двигателя. Учеными обоснованы методы дополнительного

воздействия на дизельное топливо (ДТ) в топливной системе.

На основе экспериментальных данных предложен ряд способов воздействия на ДТ. К способам внешнего физического воздействия на ДТ можно отнести магнитные, электромагнитные, электрические поля, радиоактивное облучение низкой интенсивности. Химическое воздействие направлено на процессы, происходящие в жидкой

фазе ДТ. При химическом и физическом воздействии на ДТ происходит изменение его свойств: уменьшение плотности, вязкости и поверхностного натяжения, распад углеводородных молекул по связям углерода<sup>1</sup> [1].

Одним из перспективных направлений является термическое воздействие на ДТ в системе топливоподачи, оказывающее влияние на процесс сгорания.

При дополнительном воздействии на топливо наблюдается деструкция топливного факела на мелкодисперсные фракции. В результате улучшаются качество распыливания, условия смесеобразования, испарения и горения в цилиндре. Одним из распространенных и эффективных способов получения данных по тепловыделению является установка датчика давления в цилиндре двигателя в определенной точке камеры сгорания. Сигнал, поступающий с датчика, регистрируется и обрабатывается системой National Instruments (NI).

Считается, что скорость распространения газодинамических колебаний давлений при самовоспламенении неравномерно распределяется в камере сгорания, но за счет своей величины (500–600 м/с) процесс выравнивания давления происходит быстро, и распределение давления можно считать равномерным<sup>2</sup> [2].

Определение численных значений тепловыделения производится на основе индикаторных диаграмм, построенных в результате эксперимента. С их помощью анализируется процесс сгорания и тепловыделения дизельного двигателя.

На основании первого закона термодинамики тепловыделение определяется:

$$dQ_x = C_v dT + PdV + dQ_w, \quad (1)$$

где  $dQ_x$  – количество тепла, Дж;  $C_v$  – изохорная теплоемкость, Дж/(моль·°C);  $dT$  – изменение температуры, К (°C);  $P$  – давление, МПа;  $dV$  – изменение объема, м<sup>3</sup>;  $dQ_w$  – количество тепла на потери, Дж.

Изменение температуры вычисляется по уравнению Клапейрона – Менделеева. Найденный показатель подставляем в выражение первого закона термодинамики (1) и находим значение тепловыделения.

В научной литературе данные по высокотемпературному воздействию на топливо в дизеле отсутствуют, а процесс сгорания и тепловыделения недостаточно изучен.

Цель исследования – получение экспериментальных зависимостей, анализ процесса сгорания, а также тепловыделения двигателя 4ЧН 11,0/12,5 при работе на ДТ, предварительно подогретом до температуры 300 °С.

### Обзор литературы

Группой исследователей Национального университета Ченг Кунг (Тайнань, Тайвань) был исследован процесс сгорания дизельного топлива с добавлением водорода во впускной коллектор с использованием системы рециркуляции отработавших газов (EGR), а также дана оценка параметров токсичности отработавших газов [3].

В работе польских ученых основной темой исследования было влияние

<sup>1</sup> **Ассад М. С., Пенязьков О. Г.** Продукты сгорания жидких и газообразных топлив: образование, расчет, эксперимент. Минск: Белорусская наука, 2010. 305 с. URL: <https://www.iprbookshop.ru/12312> (дата обращения: 26.03.21); Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени / Н. А. Чигир [и др.]; под ред. Ю. Ф. Дитякина. М.: Машиностроение, 1981. 407 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001031175> (дата обращения: 26.03.21).

<sup>2</sup> **Кавтарадзе Р. З.** Теория поршневых двигателей. Специальные главы. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 589 с.

водорода на процесс сгорания в дизельном двигателе и на показатели отработавших газов (ОГ) [4]. Результаты исследований показывают влияние  $H_2$  (5 % по отношению к процентному содержанию энергии ДТ) на улучшение процесса сгорания, при этом сокращается период задержки воспламенения, улучшается распыливание и смесеобразование ДТ. Увеличение соотношения количества водорода к углероду в топливе приводит к уменьшению содержания  $CO_2$ . Однако отмечается, что если водорода в ДТ более 20 %, то это приводит к его быстрому сгоранию, увеличению максимального давления в цилиндрах двигателя и повышению температуры, что влияет на концентрацию  $NO_x$  в ОГ [3–5].

Индийские исследователи проанализировали характеристики дизельного двигателя и параметры его токсичности при магнитном кондиционировании ДТ. В работе уделялось внимание режимам магнитного воздействия на ДТ с добавкой присадки  $CuO$ . Выявлено, что при обработке ДТ сильным магнитным полем процесс сгорания ДТ улучшается, механический и термический КПД увеличиваются на 7,0 и 6,7 % соответственно. Показатели токсичности  $CO$ ,  $CO_2$  и  $NO_x$  в ОГ снижаются на 17, 13 и 19 % соответственно [6].

Рассмотрены вопросы скорости выгорания углеводородов топлива при воздействии электрического заряда [7]. С помощью численного моделирования изучен процесс деструкции капель углеводородного топлива и его сгорания при ионизации стационарным разрядом. С помощью программного пакета представлены результаты проведения численных экспериментов по взаимосвязи возбужденных гидроксильных радикалов, отрицательных ионов, атомарного кислорода со скоростью сгорания капли топлива. В статье автор дал оценку влиянию

активирования топлива электрическим воздействием на рабочий процесс двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Стендовые испытания показали снижение расхода топлива при режиме номинальной мощности на 2,15 % [7].

В совместной статье ученых Шанхайского университета Цзяо Тонг (Китай) и Мичиганского университета (США) рассматривается смешанное низкотемпературное сгорание дизельного топлива и бензина: увеличивается период задержки воспламенения, необходимый для создания более однородного заряда в цилиндре, а образование сажи снижается за счет сокращения зон, локально богатых топливом. В экспериментальном исследовании наблюдается небольшое снижение концентрации  $NO_x$  в ОГ [8].

Экспериментально исследовано влияние двухступенчатого впрыска на процесс сгорания и концентрацию токсичных веществ в ОГ при высоком уровне рециркуляции. Выявлено снижение сажевыделения, а также увеличение максимальной скорости нарастания давления в цилиндрах [9].

Доказана высокая эффективность сгорания при средней нагрузке с небольшим увеличением выбросов  $NO_x$  в ОГ [10].

В работе иракских ученых представлены результаты экспериментов с добавлением присадок на металлической основе  $Al_2O_3$ ,  $ZnO$  в дизельное топливо [11; 12]. При добавлении 100 ppm оксида алюминия снижается удельный расход топлива на 8,7 %, увеличивается КПД на 6 %, снижается содержание  $CO$ ,  $SO_2$ ,  $H_2S$  на 17, 19 и 19 % соответственно, но при этом содержание  $NO_x$  увеличивается на 10 %. Было обнаружено уменьшение концентрации токсичных веществ в ОГ с применением присадок на металлической основе [11; 13; 14].

Определено влияние присадок на биметаллической основе на дизельное

топливо. Выявлено снижение параметров монооксида углерода и углеводородов благодаря улучшению характеристик воспламенения. Концентрация  $\text{NO}_x$  в ОГ увеличивается из-за добавки  $\text{CuNO}_3$ , которая воздействует на процесс сгорания с повышением максимальной температуры [15].

Проведены исследования особенностей топливоподачи и экономичности дизеля при подогреве топлива. В работе определены основные факторы, которые обуславливают изменение процессов топливоподачи при предварительном подогреве дизельного топлива. Представлены результаты лабораторных испытаний и эксплуатационных проверок по результатам исследований. Приведены обоснования целесообразности подогрева ДТ в топливопроводе низкого давления, а также исследовано влияние процессов распыливания и смесеобразования при двух параметрах: коэффициенте интенсивности смесеобразования и интенсивности окисления<sup>3</sup>.

Результаты исследований английских ученых показывают повышение температуры многокомпонентного ДТ с увеличением давления от нагрева, вызванного трением и увеличением давления пара в топливной форсунке. Полученный эффект кавитации способствует распылению струи топлива, увеличению угла конусности распыления, который влияет на смесеобразование и процесс сгорания углеводородного топлива [16].

Выявлен сильный нагрев ДТ при его сжатии и при прохождении через форсунку при сверхвысоких давлениях, а также представлена методика расчета нагрева топлива под воздействием сверхвысокого давления. Уста-

новлено, что данный способ обеспечивает нагрев до 50–200 °С при давлении 200–400 МПа [17].

Исследовались показатели работы дизеля с термофорсированием [18]. Проведены стендовые испытания дизеля на подогретом топливе. Результаты подтвердили сделанные ранее предположения: предварительный подогрев ДТ положительно влияет на тепловыделение в цилиндре двигателя, улучшается процесс сгорания, снижается удельный эффективный расход топлива в пределах 1,5–3,4 %, а температура ОГ падает на 20–55 °С.

Целью другого исследования стал анализ процесса сгорания и тепловыделения тракторного дизеля в зависимости от различных значений температур предварительной подготовки топлива. Данное воздействие позволяет сократить период задержки воспламенения, ускорить начало тепловыделения, а также уменьшить осредненную температуру цикла [19; 20].

На основе анализа методов предварительного подогрева ДТ и проведенного эксперимента отмечается повышение КПД цикла, снижение показателей токсичности и дымности в ОГ [21; 22].

Резюмируя обзор литературы, стоит отметить, что в работе двигателя значенные имеют полноценные процессы топливоподачи, смесеобразования, воспламенения и сгорания ДТ в цилиндре. Химическое и физическое воздействие на ДТ в жидкой фазе приводит к изменению его свойств (плотности, вязкости, поверхностного натяжения, ориентации молекул ДТ), что положительно влияет на показатели работы дизельного двигателя. При применении некоторых способов воздействия необходимо

<sup>3</sup> Мартынова И. Б. Исследование особенностей топливоподачи и экономичности дизеля на долевых нагрузках при подогреве топлива: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Калининград, 1996. 23 с. URL: <https://www.dissercat.com/content/issledovanie-osobennostei-toplivopodachi-i-ekonomichnosti-dizelya-na-dolevykh-nagruzkakh-pri> (дата обращения: 26.03.2021).

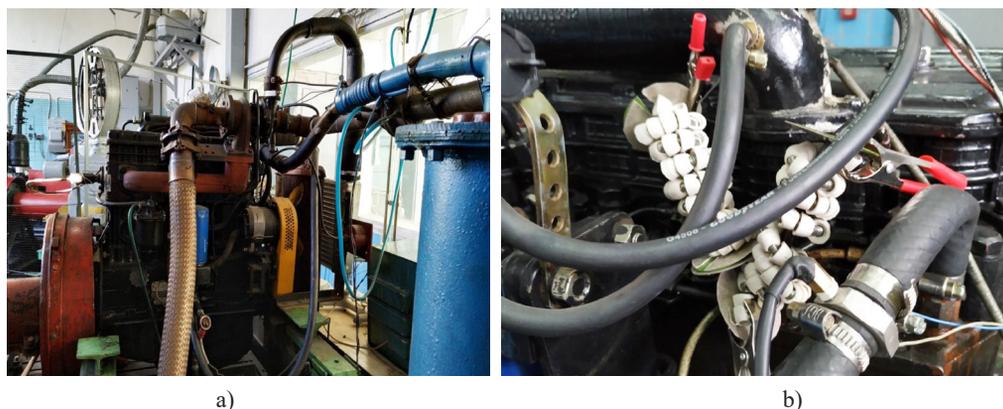
сложное оборудование, что требует дополнительных вложений [18]. Эффективным способом воздействия на ДТ является его предварительный подогрев в системе топливоподачи. Авторами отмечается положительное влияние подогрева топлива на процесс сгорания и тепловыделения в дизельном двигателе [19–22].

Предварительный подогрев ДТ до высоких температур целесообразно осуществлять при помощи локального воздействия на топливопровод высокого давления перед форсунками. При данном способе передачи тепла топливу улучшается процесс смесеобразования за счет лучшей испаряемости мелкодисперсного топлива. Время индукционного периода сокращается, а также наблюдается снижение жесткости процесса сгорания. Предполагается повышение эффективности рабочего процесса в дизельном двигателе.

### Материалы и методы

Экспериментальные исследования проводились на дизельном двигателе 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) в испытательной лаборатории УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» (Республика Беларусь). Внешний вид экспериментальной установки представлен на рисунке 1. Техническая характеристика оборудования, приборов и системы вывода полученных экспериментальных данных на компьютер приведены в таблице.

Исследовался дизельный двигатель Д-245.5S2 при номинальной частоте вращения коленчатого вала 1 800 мин<sup>-1</sup>. Согласно руководству по эксплуатации вначале производился предварительный прогрев двигателя на стенде<sup>4</sup>, затем он выводился на скоростной режим с частотой вращения коленчатого вала 1 800 мин<sup>-1</sup>. Испытания проводились при стандартных атмосферных условиях, температуре и плотности топлива<sup>5</sup>.



Р и с. 1. Общий вид: а) нагрузочный стенд; б) нагревательный элемент на линии высокого давления

Fig. 1. General view: a) load stand; b) heating element on the high-pressure line

<sup>4</sup> Руководство по эксплуатации «Беларус 812/822/912/922» 822-0000010PЭ. Минск: ПО «Минский тракторный завод», 1999. 339 с. URL: <https://dizelmmz.ru/f/245s2-0000100-re.pdf> (дата обращения: 26.03.21).

<sup>5</sup> ГОСТ 18509–88. Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний. М.: Издательство стандартов, 1988.

**Приборы и оборудование в составе экспериментальной установки**  
**Devices and equipment as a part of experimental installation**

Оборудование / Equipment	Тип, марка / Type, model	Примечание / Note
Датчик динамического давления / Dynamic pressure sensor	PS-01	Измерение динамического давления в различных средах. Диапазон измеряемых давлений 0–25 МПа / Measurement of dynamic pressure in various media. Measured pressure range 0–25 MPa
Усилитель / Amplifier	AQ02-001	Преобразование высокоимпедансного пьезоэлектрического сигнала заряда в низкоимпедансный сигнал напряжения / Converting a high-impedance piezoelectric charge signal to a low-impedance voltage signal
Модульная USB-система сбора данных NI COMPACT DAQ / Modular USB data acquisition System NI COMPACT DAQ	NI cDAQ-9178	Четырехканальный модуль измерения динамических сигналов вибрации и акустики NI 9234 / Four-channel dynamic vibration and acoustic signal measurement module NI 9234
Датчик контроля частоты вращения / Rotation speed control sensor	DI6001	Индуктивный датчик бесконтактного действия. Диапазон частоты вращения 0–6 000 мин <sup>-1</sup> / Inductive sensor of non-contact action. Speed range 0–6,000 min <sup>-1</sup>
Измеритель-регулятор микропроцессорный / Microprocessor regulator meter	TPM 148	Измерение и автоматическое регулирование температуры / Temperature measurement and automatic control
Программное обеспечение / Software	NI	NI использует автоматизацию для быстрого выполнения измерений и оценки результатов тестирования / NI uses automation to perform quickly measurements and evaluate test results
Автотракторный дизель / Autotractor diesel engine	D-245.5S2 / D-245.S2	Мощность 70 кВт / Power 70 kW
Нагрузочный, электротормозной стенд с балансирной маятниковой машиной / Load electric brake stand with pendula balancing	RAPIDO SAK N670	Нагрузочный стенд оборудован устройствами и приборами для экспериментальных исследований / The loading stand is equipped with devices for experimental research

Предварительное воздействие на топливо осуществлялось при помощи нагревательного устройства, которое устанавливалось на топливопроводе высокого давления перед форсунками. Контроль нагрева ДТ до температур 150 и 300 °С фиксировался с помощью термомпар, которые устанавливались между нагревательными элементами и форсунками. Термомпары подключались к восьмиканальному измерителю-регулятору.

Контроль нагрева топлива до нужной температуры корректировался регулятором мощности.

При использовании активированного топлива установочный угол опережения впрыскивания топлива соответствовал максимальному значению эффективного КПД.

Для снятия экспериментальных данных использовался датчик динамического давления PS-01 с пьезокварцевым

чувствительным элементом, выдающий заряд в пКл. Резьбовой датчик PS-01 устанавливается в камеру сгорания (гнездо от свечи накаливания). Сигнал от заряда по высокоскоростному проводу передается на усилитель для преобразования высокоимпедансного сигнала и получения его в вольтах с коэффициентом трансформации 1 пКл в 1 мВ. После преобразователя сигнал поступает в устройство сбора данных с модульной системой в блок, позволяющий работать с датчиками-акселерометрами. Устройство сбора данных и программное обеспечение обслуживаются системой NI. Прибор подключается к персональному компьютеру через порт USB. Данное программное обеспечение позволяет получить на экране монитора зависимость преобразованного сигнала в мВ от времени в дифференцированной форме записи, а также формировать полученные экспериментальные данные в таблице Excel.

Также к устройству сбора данных (в тот же модульный системный блок) подключался индуктивный датчик, который фиксирует положение поршня

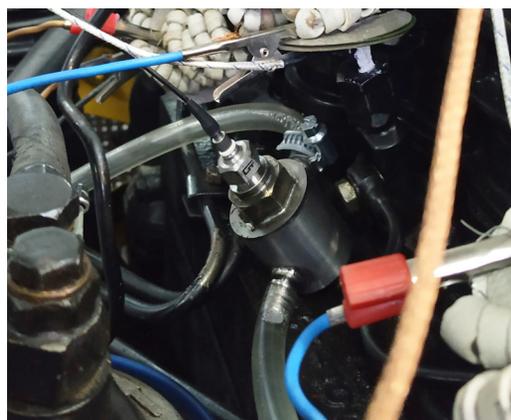
в верхней мертвой точке (ВМТ). Подключенный датчик динамического давления PS-01 и индуктивный датчик представлены на рисунке 2.

### Результаты исследования

По результатам экспериментального исследования были построены индикаторные диаграммы при номинальной частоте вращения  $n = 1\,800 \text{ мин}^{-1}$ , а также графики тепловыделения при работе двигателя на предварительно подогретом ДТ до 150 и 300 °С. При анализе полученных совмещенных индикаторных диаграмм (рис. 3) наблюдается уменьшение периода задержки воспламенения (уменьшение угла  $\varphi$ ). Известно, что при высокотемпературном воздействии на ДТ изменяются его физические и химические свойства. Происходит процесс распада углеводородных молекул по связям углерода при температуре выше 250 °С. Изменяется процесс смесеобразования. Расчетные значения топливного факела при нагреве характеризуются увеличением угла распыливания, изменением длины топливной струи и уменьшением объемно-поверхностного диаметра капель топлива [23]. Уменьшение периода задержки



а)



б)

Р и с. 2. Подключение датчиков: а) индуктивный датчик DI6001; б) датчик динамического давления PS-01

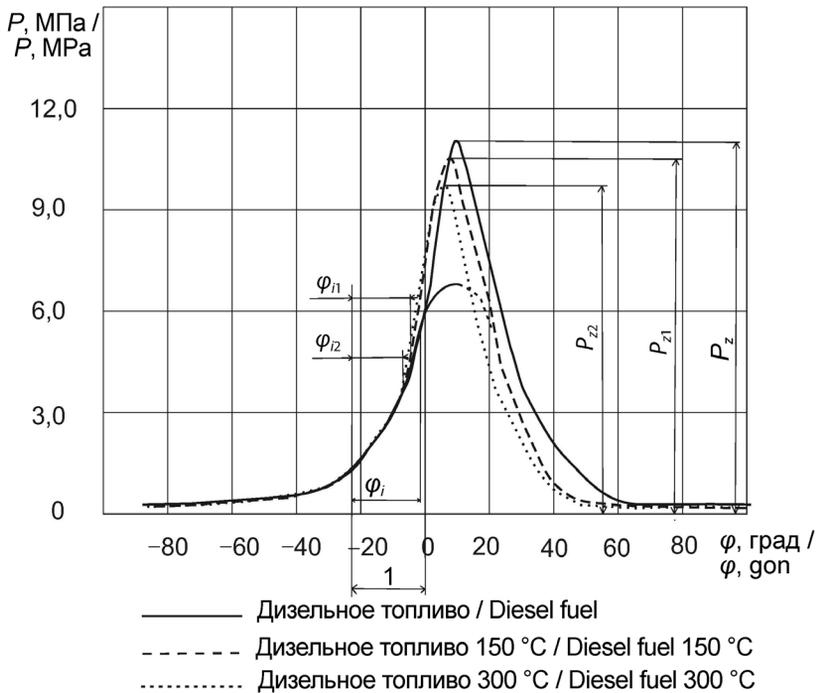
F i g. 2. Connection of sensors: a) inductive sensor DI6001; b) dynamic pressure sensor PS-01

воспламенения снижает скорость нарастания давления в цилиндре двигателя и снижает жесткость процесса сгорания.

Анализ индикаторных диаграмм показал, что работа дизеля с предварительным подогревом сопровождается понижением максимального давления цикла  $P_z$ . Значение  $P_z = 10,704$  МПа соответствует работе двигателя без подогрева ДТ, а с подогревом составляет  $P_z = 10,513$  МПа и  $P_z = 10,126$  МПа при 150 и 300 °С ДТ соответственно. Максимальное значение давления цикла  $P_z$  достигается при 12 градусах поворота коленчатого вала (ПКВ) после ВМТ, а при подогреве ДТ до температур 150 и 300 °С – при 9,5 и 9,0 градусах ПКВ после ВМТ. Применение подогрева ДТ

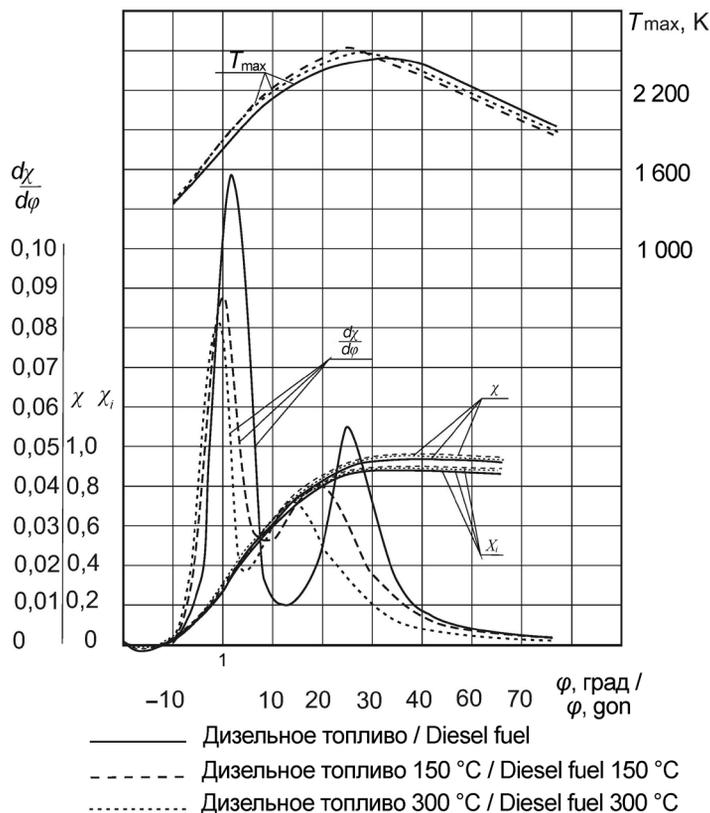
позволяет снизить максимальную температуру цикла на 40–60 К, что приведет к снижению теплонапряженности в цилиндрах двигателя и повысит ресурс его работы.

При анализе графиков (рис. 4) полного  $\chi$  и активного  $\chi_i$  выделения теплоты при работе дизельного двигателя на номинальном режиме можно сделать вывод, что процесс сгорания начинается раньше. В ВМТ доля активного тепловыделения составляет  $\chi_i = 0,282$ , а при подогреве ДТ до 150 и 300 °С она имеет значения 0,351 и 0,325 соответственно. По графикам динамики тепловыделения видно, что процесс сгорания при подогреве ДТ активизируется и заканчивается раньше.



Р и с. 3. Совмещенные индикаторные диаграммы дизельного двигателя Д-245.5S5 при частоте вращения  $n = 1\,800$  мин<sup>-1</sup>: 1 – угол опережения впрыскивания (до верхней мертвой точки) дизельного топлива  $\Theta$

F i g. 3. Combined indicator diagrams of a D-245.5S5 diesel engine at a speed of  $n = 1,800$  min<sup>-1</sup>: 1 – injection advance goal (up to top dead center) of diesel fuel  $\Theta$



Р и с. 4. Влияние предварительного подогрева ДТ на характеристики тепловыделения двигателя Д-245.5S5: 1 – верхняя мертвая точка

F i g. 4. Effect of diesel preheating on the heat release characteristics of the D-245.5S5 engine: 1 – upper dead center

Скорость тепловыделения  $(d\chi/d\varphi)_{\max}$  в кинетической фазе резко возрастает и в максимуме имеет значение при работе двигателя без подогрева  $(d\chi/d\varphi)_{\max} = 0,1239$ , а с подогревом ДТ до 150 и 300 °С равна 0,0893 и 0,0878 соответственно.

Первый максимум скорости тепловыделения обусловлен быстрым сгоранием паров ДТ с окислителем, которые образуются за период задержки воспламенения, а также за счет скорости предпламенных реакций. В камере сгорания имеются локальные зоны

с избытком паров топлива и окислителя: в первом случае быстро расходуется окислитель, во втором – пары топлива, что приводит к резкому снижению скорости тепловыделения<sup>6</sup> [2; 24; 25].

Скорость тепловыделения в диффузионной фазе при работе двигателя без подогрева составила 0,0549, а с подогревом ДТ до 150 и 300 °С – 0,0397 и 0,0355 соответственно. В данной фазе основную роль играет скорость диффузии окислителя с парами топлива.

Изменение характера тепловыделения прослеживается на графике

<sup>6</sup> Кавтарадзе Р. З. Теория поршневых двигателей...

максимальных температур (рис. 4). При работе двигателя в номинальном режиме без подогрева ДТ температура в камере сгорания составляет  $T_{\max} = 2\,561\text{ K}$ , а при работе с подогревом ДТ до 150 и 300 °С температура равна 2 427 и 2 409 К соответственно.

#### Обсуждение и заключение

На основе проведенных исследований выявлены зависимости показателей процесса сгорания топлива дизельного двигателя с подогревом до высоких температур.

Полученные индикаторные диаграммы позволяют сделать вывод о влиянии температуры подогрева топлива на процесс сгорания. Работа дизеля с предварительным подогревом

топлива сопровождается понижением максимального давления цикла  $P_z$ . Уменьшается период задержки воспламенения, что снижает скорость нарастания давления в цилиндре двигателя и жесткость процесса сгорания. В связи с изменением показателей процесса сгорания и тепловыделения возможно предположить повышение эффективности рабочего процесса в двигателе.

Анализ графиков динамики тепловыделения при работе дизельного двигателя на номинальном режиме позволяет сделать вывод, что процесс сгорания эффективен. Активное тепловыделение  $\chi_i$  предварительно подогретого ДТ до 150 °С немного меньше по сравнению с активным тепловыделением при подогреве.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Rezaei, J.** Phase Change in Fuel Sprays at Diesel Engine Ambient Conditions: Impact of Fuel Physical Properties / J. Rezaei, S. Riess, M. Wensing. – DOI [10.1016/j.supflu.2020.105130](https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.105130). – Текст : электронный // Journal of Supercritical Fluids. – 2021. – Vol. 170.
2. **Кавтарадзе, З. Р.** Анализ механизмов образования и методов расчета концентрации оксидов азота в поршневых двигателях (часть 1) / З. Р. Кавтарадзе, Р. З. Кавтарадзе // Транспорт на альтернативном топливе. – 2011. – № 5 (23). – С. 65–70. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17031174> (дата обращения: 26.03.2021). – Рез. англ.
3. **Wu, H.-W.** Investigation on Combustion Characteristics and Emissions of Diesel/Hydrogen Mixtures by Using Energy-Share Method in a Diesel Engine / H.-W. Wu, Z.-Y. Wu. – DOI [10.1016/j.applthermaleng.2012.03.004](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.03.004) // Applied Thermal Engineering. – 2012. – Vol. 42. – Pp. 154–162.
4. **Szwaja, S.** Hydrogen Combustion in a Compression Ignition Diesel Engine / S. Szwaja, K. Grab-Rogalinski. – DOI [10.1016/j.ijhydene.2009.03.020](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.03.020) // International Journal of Hydrogen Energy. – 2009. – Vol. 34, Issue 10. – Pp. 4413–4421.
5. Combustion, Vibration and Noise Analysis of Hydrogen-Diesel Dual Fuelled Engine / S. Nag, P. Sharma, A. Gupta, A. Dhar // Fuel. – 2019. – Vol. 241. – Pp. 488–494. – URL: <https://sciencon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchArticle.do?cn=NART95330387&dbt=NART> (дата обращения: 26.03.2021).
6. **Sahoo, R. R.** Experimental Analysis of Nanofuel Additives with Magnetic Fuel Conditioning for Diesel Engine Performance and Emissions / R. R. Sahoo, A. Jain. – DOI [10.1016/j.fuel.2018.09.027](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.027) // Fuel. – 2019. – Vol. 236. – Pp. 365–372.
7. **Богуслаев, В. А.** Влияние разрядно-индуцированных компонент на процесс горения капель углеводородного топлива / В. А. Богуслаев, Д. А. Долматов // Вестник двигателестроения. – 2013. – № 1. – С. 41–45. – URL: <https://clck.ru/WEAiR> (дата обращения: 26.03.2021). – Рез. англ.
8. Premixed Low-Temperature Combustion of Blends of Diesel and Gasoline in a High Speed Compression Ignition Engine / D. Han, A. M. Ickes, S. V. Bohac [et al.]. – DOI [10.1016/j.proci.2010.07.045](https://doi.org/10.1016/j.proci.2010.07.045) // Proceedings of the Combustion Institute. – 2011. – Vol. 33, Issue 2. – Pp. 3039–3046.
9. Effect of Two-Stage Injection on Combustion and Emissions under High EGR Rate on a Diesel Engine by Fueling Blends of Diesel/Gasoline, Diesel/N-Butanol, Diesel/Gasoline/N-Butanol and Pure Processes and machines of agroengineering systems

Diesel / Z. Zheng, L. Yue, H. Liu [et al.]. – DOI [10.1016/j.enconman.2014.11.011](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.011) // Energy Conversion and Management. – 2015. – Vol. 90. – Pp. 1–11.

10. Effects of Gasoline Research Octane Number on Premixed Low-Temperature Combustion of Wide Distillation Fuel by Gasoline/Diesel Blend / H. Liu, Z. Wang, J. Wang, X. He. – DOI [10.1016/j.fuel.2014.06.019](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.019) // Fuel. – 2014. – Vol. 134. – Pp. 381–388.

11. **Dhahad, H. A.** The Impact of Adding Nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Nano-Zno to Iraqi Diesel Fuel in Terms of Compression Ignition Engines' Performance and Emitted Pollutants / H. A. Dhahad, M. T. Chaichan. – DOI [10.1016/j.tsep.2020.100535](https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100535). – Текст : электронный // Thermal Science and Engineering Progress. – 2020. – Vol. 18.

12. **Venu, H.** Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoparticles in Biodiesel-Diesel-Ethanol Blends at Various Injection Strategies: Performance, Combustion and Emission Characteristics / H. Venu, V. Madhavan. – DOI [10.1016/j.fuel.2016.08.046](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.046) // Fuel. – 2016. – Vol. 186. – Pp. 176–189.

13. **Keskin, A.** Influence of Metallic Based Fuel Additives on Performance and Exhaust Emissions of Diesel Engine / A. Keskin, M. Gürü, D. Altıparmak. – DOI [10.1016/j.enconman.2010.06.039](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.039) // Energy Conversion and Management. – 2011. – Vol. 52, Issue 1. – Pp. 60–65.

14. **Lenin, M. A.** Performance and Emission Characteristics of a DI Diesel Engine with a Nanofuel Additive / M. A. Lenin, M. R. Swaminathan, G. Kumaresan. – DOI [10.1016/j.fuel.2013.03.042](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.042) // Fuel. – 2013. – Vol. 109. – Pp. 362–365.

15. Emission and Vibration Analysis of Diesel Engine Fuelled Diesel Fuel Containing Metallic Based Nanoparticles / A. Yasar, A. Keskin, S. Yildizhan, E. Uludamarc. – DOI [10.1016/j.fuel.2018.11.113](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.113) // Fuel. – 2019. – Vol. 239. – Pp. 1224–1230.

16. Preferential Cavitation and Friction-Induced Heating of Multi-Component Diesel Fuel Surrogates Up to 450MPa / A. Vidal, K. Kolovos, M. R. Gold [et al.]. – DOI [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120744](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120744). – Текст : электронный // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – Vol. 166.

17. Specific Features of Diesel Fuel Supply under Ultra-High Pressure / J. Zhao, L. Grekhov, X. Ma, A. Denisov. – DOI [10.1016/j.applthermaleng.2020.115699](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115699). – Текст : электронный // Applied Thermal Engineering. – 2020. – Vol. 179.

18. **Плотников, С. А.** Исследование показателей работы дизеля с термофорсированием / С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков, В. Ф. Атаманюк // Вестник Марийского государственного университета. – 2015. – № 2 (2). – С. 39–44. – URL: [https://www.agriculture.ru/journal/2411-9687/2015/2%20\(2\)/39-44](https://www.agriculture.ru/journal/2411-9687/2015/2%20(2)/39-44) (дата обращения: 26.03.2021). – Рез. англ.

19. **Плотников, С. А.** Анализ процесса сгорания и тепловыделения тракторного дизеля с термической подготовкой топлива / С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков, А. Л. Бирюков // Молочнохозяйственный вестник. – 2017. – № 3 (27). – С. 114–124. – URL: <https://clck.ru/WEBbd> (дата обращения: 26.03.2021). – Рез. англ.

20. **Бузиков, Ш. В.** Влияние начальной температуры топлива на характеристики топливopодачи и период задержки воспламенения в дизеле / Ш. В. Бузиков // Концепт. – 2014. – № 10. – С. 6–10. – URL: <https://e-koncept.ru/2014/14617.htm> (дата обращения: 26.03.2021). – Рез. англ.

21. **Храмов, М. Ю.** Улучшение характеристик двигателя путем термофорсирования топлива / М. Ю. Храмов, М. Х. Садеков // Вестник АГТУ. – 2007. – № 6 (41). – С. 84–86. – URL: <https://clck.ru/WECFN> (дата обращения: 26.03.2021).

22. **Балабин, В. Н.** Особенности применения термофорсирования топлива на локомотивных дизелях / В. Н. Балабин, В. Н. Васильев // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 4. – С. 107–113. – URL: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=35025> (дата обращения: 26.03.2021).

23. **Плотников, С. А.** Расчет характеристик впрыскивания при работе дизеля на активированном топливе / С. А. Плотников, П. Я. Кантор, М. В. Мотовилова // Двигателестроение. – 2020. – № 2. – С. 19–23. – URL: <http://rdiesel.ru/DVIGATELESTROYENIYE/YEAR/2020/r2-2020.html> (дата обращения: 26.03.2021).

24. **Лазарев, Е. А.** Физические концепции и математические модели процесса сгорания топлива в дизеле / Е. А. Лазарев // Вестник ЮУрГУ. – 2010. – № 10. – С. 32–39. – URL:

<https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/1072/4.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения: 26.03.2021). – Рез. англ.

25. **Чернецов, Д. А.** Анализ процесса образования токсичных компонентов в камере сгорания дизельных двигателей / Д. А. Чернецов, В. П. Капустин // Вопросы современной науки и практики. – 2011. – № 1 (32). – С. 54–58. – URL: <http://masters.donntu.org/2012/feht/nikolaenko/library/article5.pdf> (дата обращения: 26.03.2021). – Рез. англ.

*Поступила 30.04.2021; одобрена после рецензирования 19.05.2021; принята к публикации 27.06.2021*

*Об авторах:*

**Плотников Сергей Александрович**, профессор кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Российская Федерация, г. Киров, ул. Московская, д. 36), доктор технических наук, Researcher ID: R-8491-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-4591>, [plotnikovsa@bk.ru](mailto:plotnikovsa@bk.ru)

**Карташевич Анатолий Николаевич**, научный сотрудник кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Российская Федерация, г. Киров, ул. Московская, д. 36), доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3649-1521>

**Мотовилова Марина Владимировна**, аспирант кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Российская Федерация, г. Киров, ул. Московская, д. 36), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6857-3126>

*Заявленный вклад соавторов:*

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

А. Н. Карташевич – теоретический анализ, формулировка выводов.

М. В. Мотовилова – проведение стендовых испытаний ДВС.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках договора о научно-техническом сотрудничестве между ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» и УО «Белорусская государственная орден Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия». Авторы выражают благодарность всем участникам договора за помощь в проведении стендовых испытаний.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Rezaei J., Riess S., Wensing M. Phase Change in Fuel Sprays at Diesel Engine Ambient Conditions: Impact of Fuel Physical Properties. *Journal of Supercritical Fluids*. 2021; 170. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.105130>
2. Kavtaradze Z.R., Kavtaradze R.Z. The Analysis of No-Formation and Methods of Calculation of No-Concentration in the Piston Engines Working on Traditional and Alternative Fuel. *Transport na alternativnom toplive* = Alternative Fuel Transport. 2011; (5):65-70. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17031174> (accessed 26.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
3. Wu H.-W., Wu Z.-Y. Investigation on Combustion Characteristics and Emissions of Diesel/Hydrogen Mixtures by Using Energy-Share Method in a Diesel Engine. *Applied Thermal Engineering*. 2012; 42:154-162. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.03.004>
4. Szwaja S., Grab-Rogalinski K. Hydrogen Combustion in a Compression Ignition Diesel Engine. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009; 34(10):4413-4421. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.03.020>

5. Nag S., Sharma P., Gupta A., Dhar A. Combustion, Vibration and Noise Analysis of Hydrogen-Diesel Dual Fuelled Engine. *Fuel*. 2019; 241:488-494. Available at: <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchArticle.do?cn=NART95330387&dbt=NART> (accessed 26.03.2021). (In Eng.)
6. Sahoo R.R., Jain A. Experimental Analysis of Nanofuel Additives with Magnetic Fuel Conditioning for Diesel Engine Performance and Emissions. *Fuel*. 2019; 236:365-372. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.027>
7. Boguslaev V.A., Dolmatov D.A. Effect of Discharge-Induced Components on Hydrocarbon Fuel Drops Burning Rate. *Vestnik dvigatelestroeniya = Drive Engineering Bulletin*. 2013; (1):41-45. Available at: <https://clck.ru/WEAiR> (accessed 26.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
8. Han D., Ickes A.M., Bohac S.V., et al. Premixed Low-Temperature Combustion of Blends of Diesel and Gasoline in a High Speed Compression Ignition Engine. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2011; 33(2):3039-3046. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2010.07.045>
9. Zheng Z., Yue L., Liu H., et al. Effect of Two-Stage Injection on Combustion and Emissions under High EGR Rate on a Diesel Engine by Fueling Blends of Diesel/Gasoline, Diesel/N-Butanol, Diesel/Gasoline/N-Butanol and Pure Diesel. *Energy Conversion and Management*. 2015; 90:1-11. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.011>
10. Liu H., Wang Z., Wang J., He X. Effects of Gasoline Research Octane Number on Premixed Low-Temperature Combustion of Wide Distillation Fuel by Gasoline/Diesel Blend. *Fuel*. 2014; 134:381-388. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.019>
11. Dhahad H.A., Chaichan M.T. The Impact of Adding Nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Nano-Zno to Iraqi Diesel Fuel in Terms of Compression Ignition Engines' Performance and Emitted Pollutants. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2020; 18. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100535>
12. Venu H., Madhavan V. Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoparticles in Biodiesel-Diesel-Ethanol Blends at Various Injection Strategies: Performance, Combustion and Emission Characteristics. *Fuel*. 2016; 186:176-189. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.046>
13. Keskin A., Gürü M., Altıparmak D. Influence of Metallic Based Fuel Additives on Performance and Exhaust Emissions of Diesel Engine. *Energy Conversion and Management*. 2011; 52(1):60-65. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.039>
14. Lenin M.A., Swaminathan M.R., Kumaresan G. Performance and Emission Characteristics of a DI Diesel Engine with a Nanofuel Additive. *Fuel*. 2013; 109:362-365. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.042>
15. Yasar A., Keskin A., Yildizhan S., Uludamarç E. Emission and Vibration Analysis of Diesel Engine Fuelled Diesel Fuel Containing Metallic Based Nanoparticles. *Fuel*. 2019; 239:1224-1230. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.113>
16. Vidal A., Kolovos K., Gold M.R., et al. Preferential Cavitation and Friction-Induced Heating of Multi-Component Diesel Fuel Surrogates Up to 450MPa. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021; 166. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120744>
17. Zhao J., Grekhov L., Ma X., Denisov A. Specific Features of Diesel Fuel Supply under Ultra-High Pressure. *Applied Thermal Engineering*. 2020; 179. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaling.2020.115699>
18. Plotnikov S.A., Buzikov Sh.V., Atamanyuk V.F. The Study of Operation Indices of Diesel Engine with Fuel Pre-Heating. *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the Mari State University*. 2015; (2):39-44. Available at: [https://www.agriscience.ru/journal/2411-9687/2015/2%20\(2\)/39-44](https://www.agriscience.ru/journal/2411-9687/2015/2%20(2)/39-44) (accessed 26.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
19. Plotnikov S.A., Buzikov Sh.V., Biryukov A.L. Analysis of Combustion and Heat Release of a Tractor Diesel Engine with Pre-Heat Fuel Treatment. *Molochnokhozyaystvennyy vestnik = Dairy Bulletin*. 2017; (3):114-124. Available at: <https://clck.ru/WEBbD> (accessed 26.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
20. Buzikov Sh.V. Influence of Initial Fuel Temperature on the Characteristics of Fuel Injection and Ignition Delay Period in The diesel Engine. *Kontsept = Concept*. 2014; (10):6-10. Available at: <https://ekoncept.ru/2014/14617.htm> (accessed 26.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

21. Khramov M.Yu., Sadekov M.Kh. The Improvement of Engine Characteristics by Means of Thermal Boosting. *Vestnik AGTU* = Bulletin of Astrakhan State Technical University. 2007; (6):84-86. Available at: <https://clck.ru/WECFN> (accessed 26.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

22. Balabin V.N., Vasilyev V.N. Features of Application of Thermospeeding Up of Fuel on Locomotive Die. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* = Modern High Technologies. 2015; (4):107-113. Available at: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=35025> (accessed 26.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

23. Plotnikov S.A., Kantor P.Ya., Motovilova M.V. Activated Fuel as a Means to Improve Engine Performance. *Dvgatelestroyeniye* = Engines Construction. 2020; (2):19-23. Available at: <http://rdiesel.ru/DVI-GATELESTROYENIYE/YEAR/2020/r2-2020.html> (accessed 26.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

24. Lazarev E.A. Physical Concertion and Mathematical Models of the Fuel Combustion Process in the Diesel Engine. *Vestnik YuUrGU* = Bulletin of the South Ural State University. 2010; (10):32-39. Available at: <https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/1072/4.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (accessed 26.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

25. Chernetsov D.A., Kapustin V.P. Analysis of the Building-up Process of Toxic Components in a Combustion Chamber of Diesel Engines. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki* = Problems of Contemporary Science and Practice. 2011; (1):54-58. Available at: <http://masters.donntu.org/2012/feht/nikolaenko/library/article5.pdf> (accessed 26.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

*Received 30.04.2021; approved after reviewing 19.05.2021; accepted for publication 27.06.2021*

*About the authors:*

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

**Anatoly N. Kartashevich**, Researcher of the Chair of Mechanical Engineering Technology, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russian Federation), D.Sc. (Engr.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3649-1521>

**Marina V. Motovilova**, Postgraduate Student in the Chair of Mechanical Engineering Technology, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6857-3126>

*Contribution of the authors:*

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

A. N. Kartashevich – theoretical analysis, formulation of conclusions.

M. V. Motovilova – ICE bench tests.

**Acknowledgments:** The work was carried under the treaty on scientific and technical cooperation between Vyatka State University and the Belarussian State Agricultural Academy. The authors express their gratitude to all parties to the treaty for their help in carrying out bench tests.

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



## Моделирование знаний в задаче поиска причин неисправностей

**В. П. Димитров\***, **Л. В. Борисова**, **К. Л. Хубиян**  
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)  
\*kaf-qt@donstu.ru

*Введение.* В статье изложено описание подхода к решению задачи поиска причин неисправностей в сложных технических системах на основе моделирования знаний экспертов. Для решения задач диагностики многоуровневых систем, к которым относятся и зерноуборочные комбайны, широко применяются интеллектуальные информационные системы. Формальное описание знаний предметной области является основой построения базы знаний таких систем. Рассмотрена последовательность построения базы знаний экспертной системы, основанной на продукционных правилах. *Материалы и методы.* Подход базируется на использовании таблицы функции неисправностей. В качестве объекта диагностирования рассмотрена одна из подсистем электрооборудования зерноуборочного комбайна – «открытие створок крыши бункера». Основой построения последовательности элементарных проверок является система логических уравнений, описывающих как исправное, так и возможные неисправные состояния подсистемы.

*Результаты исследования.* Сформирована структурно-логическая модель. В результате анализа таблицы функции неисправности определены совокупности элементарных проверок. Выполнен анализ весомости данных проверок на основе четырех критериев. Определена оптимальная последовательность проверок и построено дерево решений для поиска причины неисправности, которое является основой формирования базы знаний интеллектуальной информационной системы. Приводится фрагмент базы знаний.

*Обсуждение и заключение.* Предложенный подход моделирования экспертных знаний повышает результативность работы блока поиска причин неисправностей интеллектуальной системы поддержки принятия решений. Он позволяет структурировать базу экспертных знаний и устанавливать оптимальную последовательность элементарных проверок. Это позволяет определить оптимальную последовательность применения продукционных правил базы знаний, что обеспечивает сокращение времени восстановления работоспособности комбайна.

**Ключевые слова:** интеллектуальная информационная система, принятие решений, зерноуборочный комбайн, диагностика неисправностей, продукционные правила, база знаний

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

**Для цитирования:** Димитров, В. П. Моделирование знаний в задаче поиска причин неисправностей / В. П. Димитров, Л. В. Борисова, К. Л. Хубиян. – DOI 10.15507/2658-4123.031.202103.364-379 // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 3. – С. 364–379.

© Димитров В. П., Борисова Л. В., Хубиян К. Л., 2021



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

## Knowledge Modeling in Troubleshooting

V. P. Dimitrov\*, L. V. Borisova, K. L. Hubiyan

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

\*kaf-qm@donstu.ru

*Introduction.* The article describes the approach to solving the problem of complex technical system troubleshooting based on expert knowledge modeling. Intelligent information systems are widely used to solve the problems of diagnostics of multilevel systems including combine harvesters. The formal description of the subject domain knowledge is the framework for building the knowledge base of these systems. The sequence of creating an expert system knowledge base in accordance with production rules is considered.

*Materials and Methods.* The approach is founded on the fault function table. As the object of diagnostics, one of the subsystems of the combine harvester electric equipment “opening the hopper roof flaps” is considered. The basis for constructing a sequence of elementary checks is a system of logical equations describing both the serviceable and possible faulty states of the subsystem.

*Results.* A structural logic model is developed. As a result of analyzing the fault function table, the sets of elementary checks are determined. Four criteria have been used to analyze the weight of these checks. The authors have determined optimal sequence of checks and have developed a decision tree, which allows finding the cause of the malfunction and is the basis for creating the knowledge base of an intelligent information system. A fragment of the knowledge base is given.

*Discussion and Conclusion.* The proposed approach of expert knowledge modelling increases the efficiency of the unit for troubleshooting of the intelligent decision support system. It makes possible to structure the base of expertise and establishing the optimal sequence of elementary checks. This allows determining the optimal sequence of application of the knowledge base production rule that makes it possible to reduce the time of restoring the serviceability of combines.

**Keywords:** intelligent information system, decision making, combine harvester, fault diagnostics, production rules, knowledge base

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

**For citation:** Dimitrov V.P., Borisova L.V., Hubiyan K.L. Knowledge Modeling in Troubleshooting. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(3):364-379. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.364-379>

### Введение

Эффективность и результативность уборки зерновых и других культур в значительной степени определяется сменным временем использования зерноуборочного комбайна. При этом основными процессами, помимо управления комбайном, являются технологическая настройка рабочих органов и поиск причин неисправностей [1].

Одним из перспективных направлений повышения эффективности

является использование различных информационных технологий, которые на современных зерноуборочных комбайнах применяются в следующих направлениях<sup>1</sup>:

– контроль и регулирование режимов работы двигателя и рабочих органов;

– измерение и регистрация показателей процесса уборки (количество убранных площадей, бункерного зерна, влажность, «наработка» двигателя и других агрегатов и т. д.);

<sup>1</sup> Цифровое сельское хозяйство: состояние и перспективы развития: науч. издание / В. Ф. Федоренко [и др.]. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. 316 с.

– индикация интенсивности потерь после очистки и молотильно-сепарирующего устройства (МСУ);

– автоматическая настройка комбайна на уборку определенной культуры, регулирование загрузки молотилки, вождение (для более поздних моделей) и др.

Целью настоящего исследования является разработка общей схемы формализации знаний предметной области «поиск неисправности» для построения модели в виде системы производственных правил.

### Обзор литературы

Оперативно найденная причина неисправности, которая является результатом реализации комплекса диагностических процедур, позволяет в полевых условиях избежать значительных потерь различного рода за счет снижения времени простоев комбайна. Однако диагностирование реализовано фрагментарно и выполняется в основном в следующем виде:

– штатное диагностирование МСУ, то есть измерение текущих значений параметров и фиксирование их предельных состояний в виде сообщений о несоответствиях. При этом диагноз формируется вручную лицом, принимающим решение (ЛПР), оператором;

– индикация кодов неисправностей (преимущественно для систем электрооборудования и электроники), что является визуализацией внешнего признака без преобразования его в вербальное описание. ЛПР при этом выполняет поиск причины вручную<sup>2</sup>.

Управление техническим состоянием современных сельскохозяйственных машин как мехатронных систем неразрывно связано с выполнением значительного количества диагностических процедур. Постановка диагноза

предполагает необходимость обработки эвристических знаний. Эффективность реализации диагностирования определяется стратегией, принятой ЛПР, и зависит от его компетентности. Следовательно, некомпетентность ЛПР может нивелироваться наличием готового к использованию набора ранжированных стратегий поиска решения [2–5]. В связи с этим разработка и внедрение систем поддержки принятия решений при поиске причин неисправностей является актуальной.

Для решения задач диагностики предлагаются различные подходы. Рассматривается определение диагностических параметров топливной системы двигателей зерноуборочных комбайнов на основе технологических и конструктивных параметров технического состояния [6]. В результате исследований структурной схемы топливной системы двигателей определены параметры технического состояния ее элементов. Указывается, что применение технологических карт совместно с диагностическими средствами позволит снизить расход топлива на 5–10 %. Предлагается метод, основанный на сочетании нейронной сети ВР (BPNN) и теории доказательств DS, для диагностики неисправности блокировки зерноуборочного комбайна [7]. В качестве объекта исследования рассматривались шнек жатки, молотильный барабан и зерновой шнек, а также измельчитель соломы [8]. Эффективность внедрения современных компьютерных систем технического диагностирования и их использования анализируется в ряде работ [9–12]. Отмечается важность определения оптимальной периодичности проведения проверок, при которой затраты на ремонт и потери от простоя машин будут минимальными [13].

<sup>2</sup> Ростсельмаш: Зерноуборочные комбайны [Электронный ресурс]. URL: [http://rostselmash.com/products/grain\\_harvesters/](http://rostselmash.com/products/grain_harvesters/) (дата обращения: 12.03.2021).

В настоящее время активно развивается направление построения диагностических экспертных систем, основанных на методологии теории нечетких множеств [14–16].

Таким образом, анализ научно-исследовательских работ позволяет утверждать, что диагностика сельскохозяйственных машин – это многоцелевой, многофакторный процесс. Число уникальных объектов, связанных с конструктивными особенностями машин велико. Широкое использование различных подсистем (автоматики, электрики, гидравлики и др.) приводит к развитию особенностей разработки алгоритмов поиска неисправностей. Важной является разработка приборной базы диагностики машин и организации технического обслуживания. Внедрение интеллектуальных информационных систем (ИИС) поддержки принятия решений становится перспективным направлением совершенствования процесса поиска неисправностей в полевых условиях. В основе предлагаемого подхода формирования модели предметной области в виде системы продукционных правил, составляющих основу базы знаний ИИС, лежат построение таблиц функций неисправностей для анализа пространства состояний изучаемого объекта диагностирования и формирование структурно-логической модели, описывающей причинно-следственные связи элементов.

### Материалы и методы

Один из эффективных и широко распространенных способов описания поиска причин неисправностей, то есть формирования рационального комплекса стратегий, основан на моделировании знаний экспертов. В связи с этим выбор формального описания

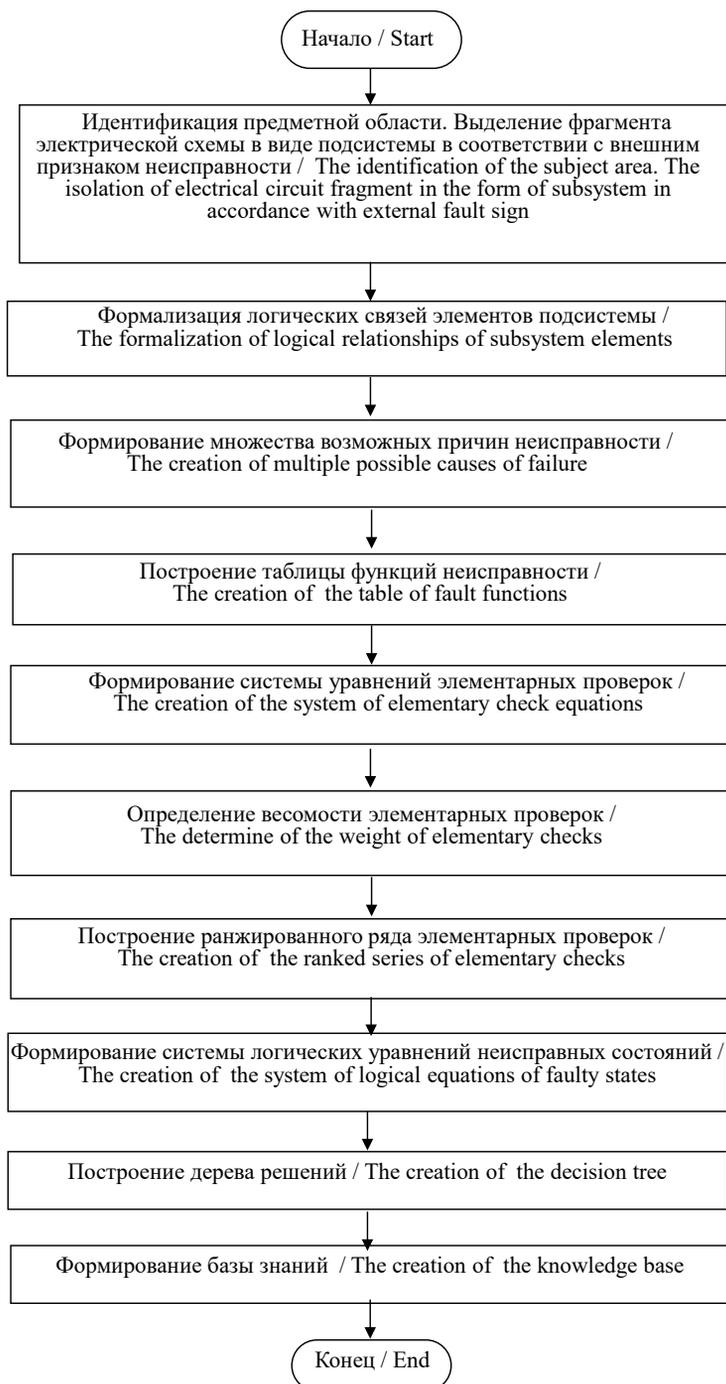
семантических пространств предметной области становится центральной научной проблемой<sup>3</sup>. На рисунке 1 представлена обобщенная схема формализации предметной области.

Далее при анализе предметной области в качестве объекта диагностирования рассмотрена система электрооборудования зерноуборочного комбайна ACROS-550. Электрооборудование зерноуборочного комбайна является важнейшей подсистемой, на долю которой приходится до 30 % отказов [17]. Применяя принцип декомпозиции, по функциональному назначению выделим конечную подсистему «открытие створок крыши бункера» электрооборудования зерноуборочного комбайна.

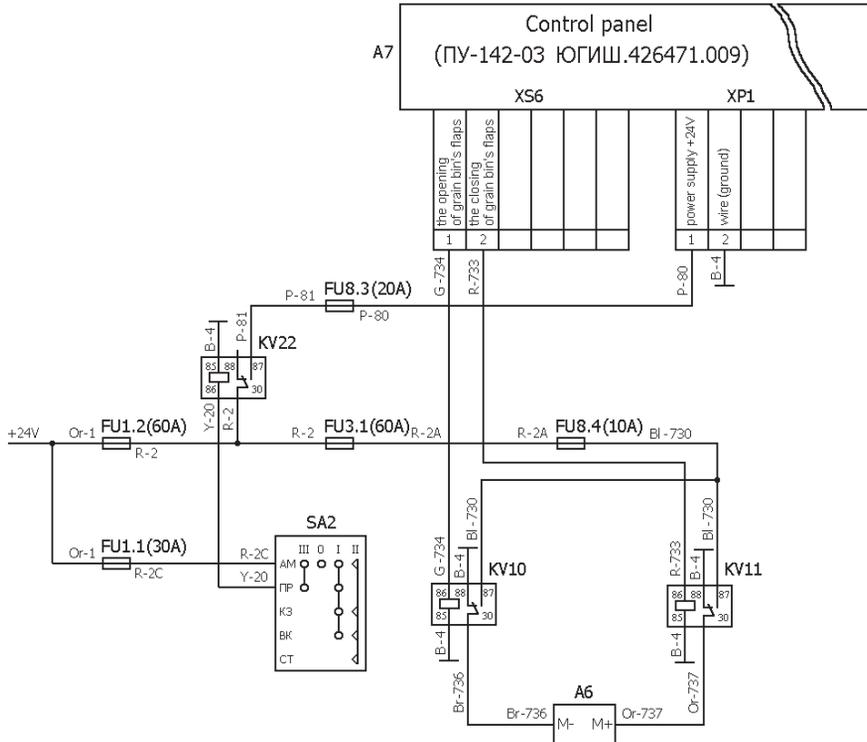
Принципиальная схема данной подсистемы приведена на рисунке 2.

Рисунок 2 содержит следующие обозначения: FU1.1, FU1.2, FU3.1 – предохранители блока предохранителей 111.3732; FU 8.3, FU8.4 – предохранители блока предохранителей 46.3722; KV10, KV11, KV22 – реле 753.3777; SA2 – выключатель стартера и приборов ВК353; А6 – силовой привод DD24-21B5-24-385; А7 – пульт управления комбайна ПУ-142-03 ЮГИШ.426471.032; Or-1 – цепь провода 1 оранжевый; R-2 – цепь провода 2 красный; R-2A – цепь провода 2A красный; R-2C – цепь провода 2C красный; Y-20 – цепь провода 20 желтый; В-4 – цепь провода 4 черный; P-80 – цепь провода 80 розовый; P-81 – цепь провода 81 розовый; G-734 – цепь провода 734 зеленый; R-733 – цепь провода 733 красный; В1-730 – цепь провода 730 голубой; Вг-736 – цепь провода 736 коричневый; Or-737 – цепь провода 737 оранжевый.

<sup>3</sup> Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. М.: Наука, 2006. 333 с.



Р и с. 1. Схема этапов формализации задачи поиска неисправности  
 F i g. 1. Scheme of the steps to formalize the problem of troubleshooting



Р и с. 2. Фрагмент принципиальной схемы электрооборудования зерноуборочного комбайна ACROS-550. Подсистема «управление створками крыши бункера»

Fig. 2. Fragment of the circuit diagram of the ACROS-550 combine harvester electrical equipment. Subsystem “hopper roof flap control”

Пространство состояний изучаемой подсистемы может быть представлено в виде таблицы функции неисправностей (ТФН) (табл. 1)<sup>4</sup>.

При этом принято, что  $\pi_j$  – обозначение элементарных проверок;  $e_i$  – бинарное значение, характеризующее техническое состояние изучаемых элементов подсистемы (0 или 1);  $R_{ji}$  – результаты проверок, значения которых представлены на пересечении строк  $\pi_j$  и столбцов  $e_i$ .

Структурно-логическая модель, описывающая причинно-следственные связи элементов подсистемы «открытие створок крыши бункера» и необходимая для построения ТФН, приведена

на рисунке 3. Условные обозначения элементов подсистемы соответствуют рисунку 2.

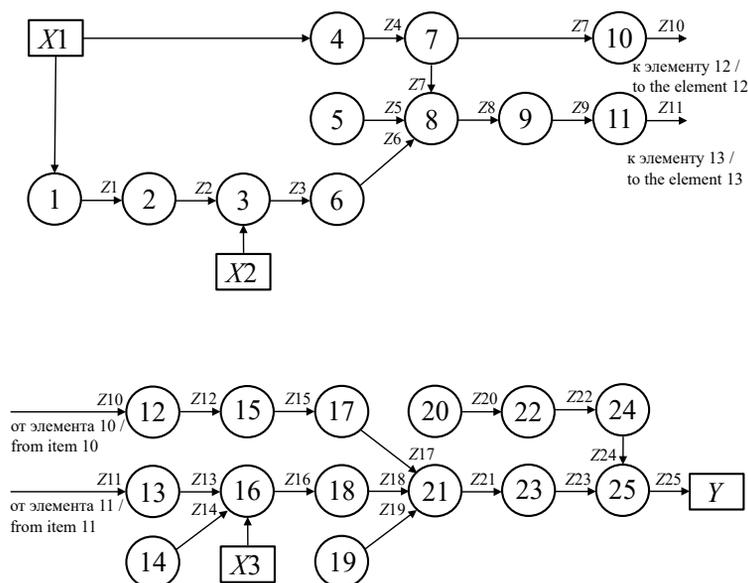
Рисунок 3 содержит следующие обозначения: 1 – FU1.1; 2 – R-2C; 3 – SA2; 4 – FU1.2; 5 – B-4 (на выводе 85 обмотки реле KV22); 6 – Y-20; 7 – R-2; 8 – KV22; 9 – P-81; 10 – FU3.1; 11 – FU 8.3; 12 – R-2A; 13 – P-80; 14 – B-4 (в разъеме XP1 ПУ-142-03); 15 – FU8.4; 16 – A7; 17 – Bl-730; 18 – G-734; 19 – B-4 (на выводе 85 обмотки реле KV10); 20 – B-4 (на выводе 88 нормально замкнутого контакта реле KV11); 21 – KV10; 22 – KV11; 23 – Br-736; 24 – Or-737; 25 – A6; X1 – внешнее

<sup>4</sup> Осипов О. И., Усынин Ю. С. Техническая диагностика автоматизированных электроприводов. М.: Энергоатомиздат, 1991. 160 с.

Таблица 1  
Table 1

**ТФН подсистемы электрооборудования «управление створками крыши бункера»**  
**Troubleshooting table for the electrical equipment subsystem “hopper roof flap control”**

П	E																								
	$e_0$	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$	$e_5$	$e_6$	$e_7$	$e_8$	$e_9$	$e_{10}$	$e_{11}$	$e_{12}$	$e_{13}$	$e_{14}$	$e_{15}$	$e_{16}$	$e_{17}$	...	$e_{25}$					
$\pi_1$	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_2$	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_3$	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_4$	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_5$	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_6$	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_7$	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_8$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_9$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_{10}$	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_{11}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_{12}$	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_{13}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	...	1					
$\pi_{14}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	...	1					
$\pi_{15}$	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	...	1					
$\pi_{16}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	...	1					
$\pi_{17}$	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	...	1					
$\pi_{18}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	...	1					
$\pi_{19}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_{20}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_{21}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	1					
$\pi_{22}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_{23}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	1					
$\pi_{24}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1					
$\pi_{25}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0					



Р и с. 3. Структура и логические связи элементов подсистемы «открытие створок крыши бункера» зерноуборочного комбайна ACROS-550

F i g. 3. Structure and logical connections of the elements of the “opening of the hopper roof flaps” subsystem of the ACROS-550 combine harvester



воздействие (напряжение +24 В на входе блоков предохранителей FU1 и FU2);  $X_2$  – внешнее воздействие (нажатие клавиши «открытие створок крыши бункера» на пульте ПУ-142-03);  $X_3$  – внешнее воздействие (установка ключа стартера SA2 в положение I); Z1–Z25 – обозначения выходов элементов логической модели; Y – выходной параметр (перемещение штока силового привода).

Проверки  $\pi_j \in \Pi$  выполняются в соответствии с системой уравнений (1) (см. рис. 3).

$$\left. \begin{aligned} \pi_1 : Z_1 &= e_1 \wedge X_1 \\ \pi_2 : Z_2 &= e_2 \wedge Z_1 \\ \pi_3 : Z_3 &= e_3 \wedge Z_2 \wedge X_2 \\ \pi_4 : Z_4 &= e_4 \wedge X_1 \\ \pi_5 : Z_5 &= e_5 \\ \pi_6 : Z_6 &= e_6 \wedge Z_3 \\ \pi_7 : Z_7 &= e_7 \wedge Z_4 \\ \pi_8 : Z_8 &= e_8 \wedge Z_5 \wedge Z_6 \wedge Z_7 \\ \pi_9 : Z_9 &= e_9 \wedge Z_8 \\ \pi_{10} : Z_{10} &= e_{10} \wedge Z_7 \\ \pi_{11} : Z_{11} &= e_{11} \wedge Z_9 \\ \pi_{12} : Z_{12} &= e_{12} \wedge Z_{10} \\ \pi_{13} : Z_{13} &= e_{13} \wedge Z_{11} \\ \pi_{14} : Z_{14} &= e_{14} \\ \pi_{15} : Z_{15} &= e_{15} \wedge Z_{12} \\ \pi_{16} : Z_{16} &= e_{16} \wedge Z_{13} \wedge Z_{14} \wedge X_3 \\ \pi_{17} : Z_{17} &= e_{17} \wedge Z_{15} \\ \pi_{18} : Z_{18} &= e_{18} \wedge Z_{16} \\ \pi_{19} : Z_{19} &= e_{19} \\ \pi_{20} : Z_{20} &= e_{20} \\ \pi_{21} : Z_{21} &= e_{21} \wedge Z_{17} \wedge Z_{18} \wedge Z_{19} \\ \pi_{22} : Z_{22} &= e_{22} \wedge Z_{20} \\ \pi_{23} : Z_{23} &= e_{23} \wedge Z_{21} \\ \pi_{24} : Z_{24} &= e_{24} \wedge Z_{22} \\ \pi_{25} : Z_{25} &= e_{25} \wedge Z_{23} \wedge Z_{24} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Задача определения минимальной совокупности элементарных проверок

решается посредством анализа ТФН. Сравнив попарно столбец  $e_0$  со столбцами  $e_1, e_2, \dots, e_i (i = 1, 2, \dots, 25)$ , последовательно выделяем множество состояний  $U_l \in U (l = 1, 2, \dots, |U|)$ , которые описываются конъюнкцией дизъюнкций параметров  $z_j = \pi_j \in \Pi (2)$ :

$$\bigwedge_{l=1}^{325} z_{hl} = \bigwedge_{l=1}^{325} (z_{1l} \vee z_{2l} \vee z_{3l} \vee z_{4l} \vee z_{5l} \vee \dots \vee z_{25l})_l. \quad (2)$$

Уравнение (2) раскрывается в виде системы уравнений (3):

$$\left\{ \begin{aligned} U_1 : & \Pi_{01} = (z_1 \vee z_2 \vee z_3 \vee z_6 \vee z_8 \vee z_9 \vee \\ & \vee z_{11} \vee z_{13} \vee z_{16} \vee z_{18} \vee z_{21} \vee z_{23} \vee z_{25})_1 \\ U_2 : & \Pi_{02} = (z_2 \vee z_3 \vee z_6 \vee z_8 \vee z_9 \vee z_{11} \vee \\ & \vee z_{13} \vee z_{16} \vee z_{18} \vee z_{21} \vee z_{23} \vee z_{25})_2 \\ U_3 : & \Pi_{03} = (z_3 \vee z_4 \vee z_6 \vee z_8 \vee z_9 \vee z_{11} \vee \\ & \vee z_{13} \vee z_{16} \vee z_{18} \vee z_{21} \vee z_{23} \vee z_{25})_3 \\ \dots & \dots \\ U_{325} : & \Pi_{325} = (z_{26})_{325} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

При этом выражение, адекватно описывающее техническое состояние объекта диагностирования и содержащее минимальную совокупность элементарных проверок при допущении, что неисправным может быть только один любой элемент объекта диагностирования, имеет вид:

$$\bigwedge_{l=1}^{325} z_{hl} = (z_1 \wedge z_2 \wedge z_3 \wedge z_4 \wedge z_5 \wedge \\ \wedge z_6 \wedge z_7 \wedge z_8 \wedge z_9 \wedge z_{10} \wedge z_{11} \wedge z_{12} \wedge \\ \wedge z_{13} \wedge z_{14} \wedge z_{15} \wedge z_{16} \wedge z_{17} \wedge z_{18} \wedge \\ \wedge z_{19} \wedge z_{20} \wedge z_{21} \wedge z_{22} \wedge z_{23} \wedge z_{24} \wedge z_{25}). \quad (4)$$

### Результаты исследования

Алгоритм диагностирования (в виде определенной последовательности элементарных проверок), представленный выражением (4), можно уточнить, используя значения весомости каждой проверки, полученные, например, на основе

метода анализа иерархий (МАИ) [18]. Использовались следующие 4 критерия: К1 – доступность элемента; К2 – наличие инструмента; К3 – блочность элемента; К4 – частота появления отказа.

Ниже приведены результаты расчета вектора глобальных приоритетов (табл. 2) и уточненная, в соответствии с рассчитанными приоритетами, последовательность элементарных проверок (3). Определение весомости критериев К1–К4 относительно друг друга в данной статье не приведено. В результате расчетов определен вектор глобальных приоритетов (табл. 2), в соответствии с которым устанавливается оптимальная последовательность элементарных проверок.

Обобщением вышеизложенного является описание в виде конъюнкции переменных исправного состояния: «при наличии напряжения питания ( $x_1$ ) и установке выключателя стартера и приборов ВК353 в положение «I» ( $x_3$ ), и нажатии на клавишу «↑» управления створками крыши бункера пульта ПУ-142-03 ( $x_2$ ) происходит открытие створок крыши бункера»:

$$Y = (x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge z_{25} \wedge z_{24} \wedge z_{23} \wedge z_{22} \wedge z_{21} \wedge z_{20} \wedge z_{19} \wedge z_{18} \wedge z_{17} \wedge z_{16} \wedge z_{15} \wedge z_{14} \wedge z_{13} \wedge z_{12} \wedge z_{11} \wedge z_{10} \wedge z_9 \wedge z_8 \wedge z_7 \wedge z_6 \wedge z_5 \wedge z_4 \wedge z_3 \wedge z_2 \wedge z_1).$$

При возможных неисправных (при наличии напряжения питания

( $x_1$ ) и установке выключателя стартера и приборов ВК353 в положение «I» ( $x_3$ ), и нажатии на клавишу «↑» управления створками крыши бункера пульта ПУ-142-03 ( $x_2$ ) не происходит открытие створок крыши бункера) состояниях подсистемы «управление створками крыши бункера» электрооборудования зерноуборочного комбайна ACROS-550

$$\bar{Y} = (\bar{x}_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge z_{25} \wedge z_{24} \wedge z_{23} \wedge z_{22} \wedge z_{21} \wedge z_{20} \wedge z_{19} \wedge z_{18} \wedge z_{17} \wedge z_{16} \wedge z_{15} \wedge z_{14} \wedge z_{13} \wedge z_{12} \wedge z_{11} \wedge z_{10} \wedge z_9 \wedge z_8 \wedge z_7 \wedge z_6 \wedge z_5 \wedge z_4 \wedge z_3 \wedge z_2 \wedge z_1);$$

$$\bar{Y} = (x_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge x_3 \wedge z_{25} \wedge z_{24} \wedge z_{23} \wedge z_{22} \wedge z_{21} \wedge z_{20} \wedge z_{19} \wedge z_{18} \wedge z_{17} \wedge z_{16} \wedge z_{15} \wedge z_{14} \wedge z_{13} \wedge z_{12} \wedge z_{11} \wedge z_{10} \wedge z_9 \wedge z_8 \wedge z_7 \wedge z_6 \wedge z_5 \wedge z_4 \wedge z_3 \wedge z_2 \wedge z_1);$$

...

$$\bar{Y} = (x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge z_{25} \wedge z_{24} \wedge z_{23} \wedge z_{22} \wedge z_{21} \wedge z_{20} \wedge z_{19} \wedge z_{18} \wedge z_{17} \wedge z_{16} \wedge z_{15} \wedge z_{14} \wedge z_{13} \wedge z_{12} \wedge z_{11} \wedge z_{10} \wedge z_9 \wedge z_8 \wedge z_7 \wedge z_6 \wedge z_5 \wedge z_4 \wedge z_3 \wedge z_2 \wedge \bar{z}_1).$$

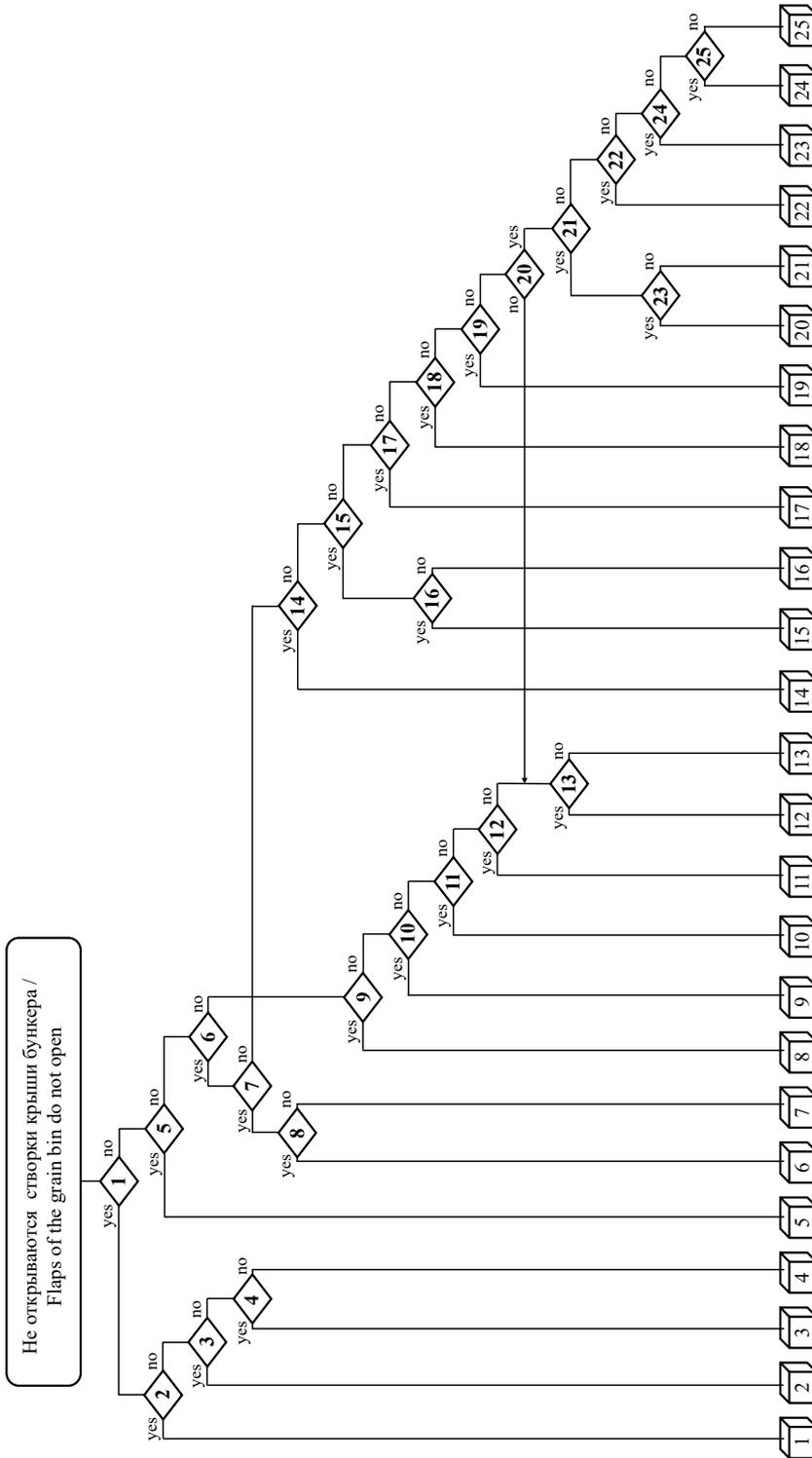
Ниже приведены построенные на основе рассмотренных зависимостей дерево решений (рис. 4), а также фрагмент модели знаний в виде продукционных правил, используемых при построении базы знаний экспертной системы. Представление знаний в виде продукционной модели является наиболее распространенным способом [19].

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

Значения вектора глобальных приоритетов (фрагмент)  
Values of the global priorities vector (fragment)

Причины / Reasons	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8	П9	П10	П11	П12	П13	...	П22	П23	П24	П25
Значения вектора глобальных приоритетов / Values of the global priorities vector	0,007	0,008	0,010	0,011	0,013	0,014	0,016	0,023	0,029	0,031	0,032	0,036	0,047	...	0,066	0,067	0,068	0,071



Р и с. 4. Дерево решений при поиске неисправности  
F i g. 4. Decision tree for troubleshooting

В ромбиках на рисунке 4 представлены следующие вопросы: 1 – есть напряжение +24 В на проводе Вг-736 у силового привода DD24-21B5-24-385 (блок А6)? 2 – есть соединение на «массу» на проводе Or-737 у силового привода DD24-21B5-24-385 (блок А6)? 3 – есть соединение на «массу» на выводе 30 общего контакта реле KV11(провод Or-737)? 4 – есть соединение на «массу» на проводе В-4 у вывода 88 нормально замкнутого контакта реле KV11? 5 – есть напряжение +24 В на выводе 30 общего контакта реле KV10 (провод Вг-736)? 6 – есть напряжение +24 В на проводе В1-730 у вывода 87 нормально разомкнутого контакта реле KV10? 7 – есть напряжение +24 В на проводе G-734 у вывода 86 обмотки реле KV10? 8 – есть соединение на «массу» на проводе В-4 у вывода 85 обмотки реле KV10? 9 – есть напряжение +24 В на проводе В1-730 у предохранителя FU8.4 (10А)? 10 – есть напряжение +24 В на проводе R-2А у предохранителя FU8.4 (10А)? 11 – есть напряжение +24 В на проводе R-2А у предохранителя FU3.1 (60А)? 12 – есть напряжение +24 В на проводе R-2 у предохранителя FU3.1 (60А)? 13 – есть напряжение +24 В на проводе R-2 у предохранителя FU1.2 (60А)? 14 – есть напряжение +24 В на проводе G-734 в разъеме XS6 пульта управления ПУ-142-03 (блок А7)? 15 – есть напряжение +24 В на проводе Р-80 в разъеме ХР1 пульта управления ПУ-142-03 (блок А7)? 16 – есть соединение на «массу» на проводе В-4 в разъеме ХР1 пульта управления ПУ-142-03 (блок А7)? 17 – есть напряжение +24 В на проводе Р-80 у предохранителя FU8.3 (20А)? 18 – есть напряжение +24 В на проводе Р-81 у предохранителя FU8.3 (20А)? 19 – есть напряжение +24 В на выводе 87 нормально разомкнутого контакта реле KV22 (провод Р-81)? 20 – есть напряжение +24 В на проводе

R-2 у общего вывода 30 реле KV22? 21 – есть напряжение +24 В на проводе Y-20 у вывода 85 обмотки реле KV22? 22 – есть соединение на «массу» на проводе В-4 у вывода 85 обмотки реле KV22? 23 – есть напряжение +24 В на выводе ПР выключателя стартера и приборов ВК353 (SA2)? 24 – есть напряжение +24 В на проводе R-2С у вывода АМ выключателя стартера и приборов ВК353 (SA2)? 25 – есть напряжение +24 В на проводе R-2С у предохранителя FU1.1(60А)? В кубиках на рисунке 4 представлены возможные причины неисправности: 1 – неисправен силовой привод DD24-21B5-24-385 (блок А6); 2 – неисправна цепь провода Or-737; 3 – неисправно реле KV11; 4 – неисправна цепь провода В-4 (соединение на «массу» вывода 88 нормально замкнутого контакта реле KV11); 5 – неисправна цепь провода Вг-736; 6 – неисправно реле KV10; 7 – неисправна цепь провода В-4 (соединение на «массу» вывода 85 обмотки реле KV10); 8 – неисправна цепь провода В1-730; 9 – неисправен предохранитель FU8.4 (10А); 10 – неисправна цепь провода R-2А; 11 – неисправен предохранитель FU3.1 (60А); 12 – неисправна цепь провода R-2; 13 – неисправен предохранитель FU1.2 (60А); 14 – неисправна цепь провода G-734; 15 – неисправен пульт управления А7 (ПУ-142-03); 16 – неисправна цепь провода В-4 (соединение на «массу» в разъеме ХР1 пульта управления ПУ-142-03 (блок А7)); 17 – неисправна цепь провода Р-80; 18 – неисправен предохранитель FU8.3(20А); 19 – неисправна цепь провода Р-81; 20 – неисправно реле KV22; 21 – неисправна цепь провода В-4 (соединение на «массу» вывода 85 обмотки реле KV22); 22 – неисправна цепь провода Y-20; 23 – неисправен выключатель стартера и приборов ВК353 (SA2); 24 – неисправна цепь провода R-2С; 25 – неисправен предохранитель FU1.1(60А).



**ЕСЛИ** при установке выключателя стартера и приборов ВК353 (SA2) в положение «I» и нажатии на клавишу «↑» управления створками крыши бункера пульта управления ПУ-142-03 (блок А7) не происходит открытие створок крыши бункера

...  
*правило 25*

**И есть** напряжением +24 В на проводе Вг-736 у силового привода DD24-21B5-24-385 (блок А6),

**И есть** соединение на «массу» на проводе Ог-737 у силового привода DD24-21B5-24-385 (блок А6),

**И есть** соединение на «массу» на выводе 30 общего контакта реле KV11 (провод Ог-737),

**И есть** соединение на «массу» на проводе В-4 у вывода 88 нормально замкнутого контакта реле KV11,

**И есть** напряжение +24 В на выводе 30 общего контакта реле KV10 (провод Вг-736),

**И есть** напряжение +24 В на проводе В1-730 у вывода 87 нормально разомкнутого контакта реле KV10,

**И есть** напряжение +24 В на проводе G-734 у вывода 86 обмотки реле KV10,

**И есть** соединение на «массу» на проводе В-4 у вывода 85 обмотки реле KV10,

**И есть** напряжение +24 В на проводе В1-730 у предохранителя FU8.4 (10А),

**И есть** напряжение +24 В на проводе R-2А у предохранителя FU8.4 (10А),

...  
**И** напряжение +24 В на проводе R-2С у предохранителя FU1.1(60А) *отсутствует*,

**ТО неисправен** предохранитель FU1.1(60А).

**Для устранения неисправности** замените предохранитель FU1.1(60А).

Знание атрибута «исправен»/«неисправен» определяется дополни-

тельными диагностическими операциями, например: измерение напряжения на входе катушки электромагнита, измерение напряжения на выходе выключателя и т. п.

### Обсуждение и заключение

Задача поиска причин неисправностей в системах и агрегатах сложных сельскохозяйственных машин является важной. Ее решение в условиях уборки зависит в основном от практического опыта и компетентности механизатора или мастера-диагноста. Для обеспечения информационной поддержки при решении задач диагностирования неисправностей с целью сокращения времени на поиск причин неисправностей целесообразно использование интеллектуальных информационных систем (экспертных систем). При построении таких систем необходимо иметь модель знаний процесса принятия решений. На основе рассматриваемой стратегии поиска неисправности в системах и агрегатах машины предложена методика структуризации знаний предметной области. Данная методика иллюстрирована примером анализа подсистемы электрооборудования зерноуборочного комбайна ACROS-550. Показано, что для определения оптимальной последовательности элементарных проверок целесообразно использовать различные критерии оценки весомости проверок. В результате анализа и моделирования рассматриваемой предметной области (электрооборудование комбайна) сформирована база знаний, включающая более 1 200 производственных правил.

Использование данного подхода при внедрении интеллектуальной информационной системы поддержки принятия решений позволит увеличить коэффициент использования эксплуатационного времени работы комбайна, уменьшить время простоев на устранение неисправностей и, как следствие, повысить результативность уборочных работ.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Выбор стратегии в задаче корректировки регулировочных параметров комбайна / Л. В. Борисова, И. Н. Нурутдинова, В. П. Димитров [и др.]. – DOI [10.15507/2658-4123.030.202001.060-075](https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.060-075) // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 60–75. – Рез. англ.
2. Research of Vibroacoustic Diagnostics of Fuel System of Engines of Combine Harvesters / I. Rogovskii, L. Titova, A. Novitskii, V. Rebenko. – DOI [10.22616/ERDev2019.18.N451](https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N451) // Proceedings of International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (22–24 May 2019). – Jelgava, 2019. – Pp. 291–298.
3. Research of Diagnostic of Combine Harvesters at Levels of Hierarchical Structure of Systems and Units of Hydraulic System / I. L. Rogovskii, B. S. Liubarets, S. A. Voinash [et al.]. – DOI [10.1088/1742-6596/1679/4/042038](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/4/042038). – Текст : электронный // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1679.
4. Дунаев, А. В. Актуальность стандартов по техобслуживанию и ремонту сельхозтехники / А. В. Дунаев, В. А. Казакова, В. А. Шинкевич // Стандарты и качество. – 2018. – № 1. – С. 36–38. – URL: <https://ria-stk.ru/stq/adetail.php?ID=165761> (дата обращения: 12.03.2021). – Рез. англ.
5. Liang, Z. Grain Sieve Loss Fuzzy Control System in Rice Combine Harvesters / Z. Liang, Y. Li, L. Xu. – DOI [10.3390/app9010114](https://doi.org/10.3390/app9010114). – Текст : электронный // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9, Issue 1.
6. Research of Daubechies Wavelet Spectrum of Vibroacoustic Signals for Diagnostic of Diesel Engines of Combine Harvesters / L. L. Titova, Yu. M. Chernik, Yu. O. Gumenyuk, M. M. Korobko. – DOI [10.1088/1755-1315/548/3/032030](https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/3/032030). – Текст : электронный // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 548, Issue 3.
7. Blockage Fault Diagnosis Method of Combine Harvester Based on BPNN and DS Evidence Theory / J. Chen, K. Xu, Y. F. Wang [et al.]. – DOI [10.1117/12.2265524](https://doi.org/10.1117/12.2265524). – Текст : электронный // Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Electronics and Information Engineering (23 January 2017). – Nanjing, 2017.
8. Evaluation of Bearing Reliability of Combine Harvester Straw Chopper / E. Jotautiene, A. Juostas, A. Janulevicius, A. Aboltins. – DOI [10.22616/ERDev2019.18.N332](https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N332) // Proceedings of International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (22–24 May 2019). – Jelgava, 2019. – Pp. 625–629.
9. Чеботарев, М. И. Экспертный метод факторного анализа эксплуатационной надежности зерноуборочных комбайнов / М. И. Чеботарев, Б. Ф. Тарасенко, Е. А. Шапиро. – DOI [10.21515/1990-4665-136-006](https://doi.org/10.21515/1990-4665-136-006) // Научный журнал КубГАУ. – 2018. – № 136. – С. 71–86. – Рез. англ.
10. Гумелёв, В. Ю. Оптимизация поиска неисправностей электрооборудования автомобиля / В. Ю. Гумелёв. – Текст : электронный // Исследования в области естественных наук. – 2014. – № 4. – URL: <http://science.snauka.ru/2014/04/6722> (дата обращения: 12.03.2021). – Рез. англ.
11. Афоничев, Д. Н. Повышение эффективности использования систем технического диагностирования в сельском хозяйстве / Д. Н. Афоничев, И. И. Аксенов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2015. – № 4 (47). – С. 109–114. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24986080> (дата обращения: 12.03.2021).
12. Operation Faults Monitoring of Combine Harvester Based on SDAE-BP[J] / X. Chenbo, Y. Guangyou, L. Lang [et al.]. – DOI [10.11975/j.issn.1002-6819.2020.17.006](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2020.17.006) // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. – 2020. – Vol. 36, Issue 17. – Pp. 46–53.
13. Design of Fuzzy Logic Control System Incorporating Human Expert Knowledge for Combine Harvester / M. Omid, M. Lashgari, H. Mobli [et al.]. – DOI [10.1016/j.eswa.2010.03.010](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.03.010) // Expert Systems with Applications. – 2010. – Vol. 37, Issue 10. – Pp. 7080–7085.
14. Разработка диагностических интеллектуальных систем на основе онтологий / М. А. Грищенко, Н. О. Дородных, С. А. Коршунов, А. Ю. Юрин. – DOI [10.18287/2223-9537-2018-8-2-265-284](https://doi.org/10.18287/2223-9537-2018-8-2-265-284) // Онтология проектирования. – 2018. – Т. 8, № 2 (28). – С. 265–284. – Рез. англ.
15. Chen, J. Remote Fault Information Acquisition and Diagnosis System of the Combine Harvester Based on LabVIEW / J. Chen, P. Wu, K. Xu. – DOI [10.1142/9789814733878\\_0041](https://doi.org/10.1142/9789814733878_0041) // Applied Mechanics, Mechatronics and Intelligent Systems. – 2016. – Pp. 285–292.

16. Development on Electrical System Performance Test Stand for Combine Harvester / D. Sun, D. Chen, S. Wang, X. Wang. – DOI [10.1016/j.ifacol.2018.08.195](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.195) // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51, Issue 17. – Pp. 363–367.

17. Electrical Modification and Experimental Study of Combine Harvester Reaping Unit / P. Wang, M. Tian, H. Wang [et al.]. – DOI [10.1088/1757-899X/790/1/012168](https://doi.org/10.1088/1757-899X/790/1/012168). – Текст : электронный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 790.

18. **Khan, A. U.** Analytical Hierarchy Process (AHP) and Analytic Network Process Methods and Their Applications: A Twenty Year Review from 2000–2019 / A. U. Khan, Y. Ali. – DOI [10.13033/ijahp.v12i3.822](https://doi.org/10.13033/ijahp.v12i3.822). – Текст : электронный // International Journal of the Analytic Hierarchy Process. – 2020. – Vol. 12, Issue 3.

19. **Рябов, С. Ю.** Интеллектуальный подход к автоматизации технологических и производственных процессов / С. Ю. Рябов. – DOI [10.15827/0236-235X.133.106-113](https://doi.org/10.15827/0236-235X.133.106-113) // Программные продукты и системы. – 2021. – № 1. – С. 106–113. – Рез. англ.

*Поступила 15.03.2021; одобрена после рецензирования 25.04.2021; принята к публикации 14.05.2021*

*Об авторах:*

**Димитров Валерий Петрович**, заведующий кафедрой управления качеством ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: E-4908-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1439-1674>, Scopus ID: 57195505958, kaf-qm@donstu.ru

**Борисова Людмила Викторовна**, заведующий кафедрой менеджмента и бизнес-процессов ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: E-4863-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6611-4594>, borisovalv09@mail.ru

**Хубиян Капрел Луспаронович**, доцент кафедры управления качеством ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8743-6672>, intelagro-edu@rambler.ru

*Заявленный вклад соавторов:*

В. П. Димитров – анализ предметной области, моделирование знаний.

Л. В. Борисова – разработка схемы формализации знаний и структурно-логической схемы подсистемы электрооборудования.

К. Л. Хубиян – разработка таблицы функций неисправностей, построение дерева решений, получение результатов иллюстративного примера, формулировка правил базы знаний.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Borisova L.V., Nurutdinova I.N., Dimitrov V.P., et al. Selecting a Strategy for Determining the Combine Harvester Parameter Settings. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems*. 2020; 30(1):60-75. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.060-075>

2. Rogovskii I., Titova L., Novitskii A., Rebenko V. Research of Vibroacoustic Diagnostics of Fuel System of Engines of Combine Harvesters. In: Proceedings of International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (22-24 May 2019). Jelgava; 2019. Pp. 291-298. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N451>

3. Rogovskii I.L., Liubarets B.S., Voinash S.A., et al. Research of Diagnostic of Combine Harvesters at Levels of Hierarchical Structure of Systems and Units of Hydraulic System. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1679. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/4/042038>
4. Dunaev A.V., Kazakova V.A., Shinkevich V.A. Relevance of Standards on Servicing and Repair of Agricultural Machinery. *Standarty i kachestvo = Standarts and Quality*. 2018; (1):36-38. Available at: <https://ria-stk.ru/stq/adetail.php?ID=165761> (accessed 12.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
5. Liang Z., Li Y., Xu L. Grain Sieve Loss Fuzzy Control System in Rice Combine Harvesters. *Applied Sciences*. 2019; 9(1). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/app9010114>
6. Titova L.L., Chernik Yu.M., Gumenyuk Yu.O., Korobko M.M. Research of Daubechies Wavelet Spectrum of Vibroacoustic Signals for Diagnostic of Diesel Engines of Combine Harvesters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 548(3). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/3/032030>
7. Chen J., Xu K., Wang Y.F., et al. Blockage Fault Diagnosis Method of Combine Harvester Based on BPNN and DS Evidence Theory. In: Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Electronics and Information Engineering (23 January 2017). Nanjing; 2017. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2265524>
8. Jotautiene E., Juostas A., Janulevicius A., Aboltins A. Evaluation of Bearing Reliability of Combine Harvester Straw Chopper. In: Proceedings of International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (22-24 May 2019). Jelgava; 2019. Pp. 625-629. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N332>
9. Chebotaryev M.I., Tarasenko B.F., Shapiro E.A. Expert Method of Factor Analysis of Operational Reliability of Combine Harvesters. *Nauchnyy zhurnal KubGAU = Scientific Journal of KubSAU*. 2018; (136):71-86. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-136-006>
10. Gumelev V.Yu. Optimization of Search of Malfunctions Vehicle Electric Equipments. *Issledovaniya v oblasti estestvennykh nauk = Researches in Science*. 2014; (4). Available at: <http://science.snauka.ru/2014/04/6722> (accessed 12.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
11. Afonichev D.N., Aksenov I.I. Increasing the Efficiency of Using Technical Diagnostic Systems in Agriculture. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Voronezh State Agrarian University Bulletin*. 2015; (4):109-114. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24986080> (accessed 12.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
12. Chenbo X., Guangyou Y., Lang L., et al. Operation Faults Monitoring of Combine Harvester Based on SDAE-BP[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2020; 36(17):46-53. (In Chin., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2020.17.006>
13. Omid M., Lashgari M., Mobli H., et al. Design of Fuzzy Logic Control System Incorporating Human Expert Knowledge for Combine Harvester. *Expert Systems with Applications*. 2010; 37(10):7080-7085. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.03.010>
14. Grischenko M.A., Dorodnykh N.O., Korshunov S.A., Yurin A.Yu. Ontology-Based Development of Diagnostic Intelligent Systems. *Ontologiya proektirovaniya = Ontology of Designing*. 2018; 8(2):265-284. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2018-8-2-265-284>
15. Chen J., Wu P., Xu K. Remote Fault Information Acquisition and Diagnosis System of the Combine Harvester Based on LabVIEW. *Applied Mechanics, Mechatronics and Intelligent Systems*. 2016; Pp. 285-292. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1142/9789814733878\\_0041](https://doi.org/10.1142/9789814733878_0041)
16. Sun D., Chen D., Wang S., Wang X. Development on Electrical System Performance Test Stand for Combine Harvester. *IFAC-PapersOnLine*. 2018; 51(17):363-367. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.195>
17. Wang P., Tian M., Wang H., et al. Electrical Modification and Experimental Study of Combine Harvester Reaping Unit. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 790. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/790/1/012168>
18. Khan A.U., Ali Y. Analytical Hierarchy Process (AHP) and Analytic Network Process Methods and Their Applications: A Twenty Year Review from 2000–2019. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*. 2020; 12(3). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.13033/ijahp.v12i3.822>

19. Ryabov S.Yu. The Intelligent Approach to Automation of Technological and Production Processes. *Programmnye produkty i sistemy* = Software & Systems. 2021; (1):106-113. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15827/0236-235X.133.106-113>

*Received 15.03.2021; approved after reviewing 25.04.2021; accepted for publication 14.05.2021*

*About the authors:*

**Valeriy P. Dimitrov**, Head of the Chair of Quality Management, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), D.Sc. (Engr.), Professor, Researcher ID: E-4908-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1439-1674>, Scopus ID: 57195505958, kaf-qm@donstu.ru

**Lyudmila V. Borisova**, Head of the Chair of Management and Business Processes, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), D.Sc. (Engr.), Professor, Researcher ID: E-4863-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6611-4594>, borisovalv09@mail.ru

**Kaprel L. Hubiyani**, Associate Professor of the Chair of Quality Management, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), Cand.Sc. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8743-6672>, intelagro-edu@rambler.ru

*Contribution of the authors:*

V. P. Dimitrov – subject area analysis, knowledge modeling.

L. V. Borisova – development of the knowledge formalization scheme and the structural-logical scheme of the electrical equipment subsystem.

K. L. Hubiyani – developing a table of fault functions, constructing a decision tree, obtaining the results of an illustrative example, formulating knowledge base rules.

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

# ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА / TECHNOLOGIES AND MEANS OF AGRICULTURAL MECHANIZATION

УДК 631.53.04

DOI: 10.15507/2658-4123.031.202103.380-402

Оригинальная статья



## Результаты лабораторных исследований просеиваемости почвы пруткового элеватора с асимметричным расположением встряхивателей и регулируемым углом наклона полотна

А. С. Дорохов, А. В. Сибирёв\*, А. Г. Аксенов,  
М. А. Мосяков

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

\*sibirev2011@yandex.ru

*Введение.* Увеличение выхода товарной продукции с занимаемой площади вегетации как овощных корнеплодов, так и всей сельскохозяйственной продукции способствует повышению нагрузки на машинно-технологический комплекс при выполнении уборочных работ. Это обусловлено отсутствием функционирующих элементов в конструкторных машинно-технологических комплексов, определяющих качественное отделение поступающего на обработку вороха. Цель исследования – выявление участков с минимальной величиной просеивания почвы на поверхности пруткового элеватора в зависимости от угла наклона полотна, а также разработка рекомендаций и предложений по повышению полноты сепарации.

*Материалы и методы.* Описана методика лабораторных исследований пруткового элеватора с регулируемым углом наклона полотна при асимметричном расположении встряхивателей, а также изложены результаты изучения просеиваемости почвы на рабочей поверхности. Использовалась методика комплексной оценки качества выполнения и стабильности технологических операций на основе количественных критериев оптимизации.

*Результаты исследования.* Наибольшее значение массы просеянной почвы наблюдается на участке затухания длины волны рабочей ветви пруткового элеватора 1 020 мм от воздействия эллиптического встряхивателя при угле наклона полотна 5 град.

*Обсуждение и заключение.* Прутковый элеватор с асимметричным расположением встряхивателей и регулируемым углом наклона полотна пруткового элеватора повышает просеивание почвы по всей длине полотна на 10 %, а следовательно, увеличивает полноту сепарации корнеплодов от почвенных примесей.

**Ключевые слова:** прутковый элеватор, встряхиватель, угол наклона, подача вороха, поступательная скорость движения, качество сепарации, почвенные примеси

© Дорохов А. С., Сибирёв А. В., Аксенов А. Г., Мосяков М. А., 2021



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

**Финансирование:** исследование выполнено при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (СП-1004.2021.1).

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

**Для цитирования:** Результаты лабораторных исследований просеваемости почвы пружкового элеватора с асимметричным расположением встряхивателей и регулируемым углом наклона полотна / А. С. Дорохов, А. В. Сибирёв, А. Г. Аксенов, М. А. Мосяков. – DOI 10.15507/2658-4123.031.202103.380-402 // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 3. – С. 380–402.

Original article

## Results of Laboratory Studies of Soil Sifting in a Rod Elevator with Asymmetric Arrangement of Web Agitators and Adjustable Elevator Apron Angle

A. S. Dorokhov, A. V. Sibirev\*, A. G. Aksenov, M. A. Mosyakov  
Federal Scientific Agroengineering Center VIM  
(Moscow, Russian Federation)

\*sibirev2011@yandex.ru

**Introduction.** An increase in crop production from the growing area of both vegetable root crops and all agricultural products results in grows of the load on the machine-technology complex when harvesting. The reason is that in the structure of machine-technological complexes there are not devices providing the qualitative screening of the heap incoming for processing. The purpose of the study is to identify the areas with the minimum value of soil screening on the rod elevator surface depending on the elevator apron angle and to develop recommendations and proposals for improving the separation quality.

**Materials and Methods.** The article describes the methodology and results of laboratory studies of rod elevators with an asymmetric arrangement of web agitators and an adjustable elevator apron angle to determine the soil screening quality on its surface. We used the method of comprehensive assessment of the quality and stability of technological operations based on quantitative optimization criteria.

**Results.** The highest value of the screened soil weight is at the wavelength attenuation section of the rod elevator working branch 1,020 mm cause by action of the elliptical web agitator at an elevation angle of 5 gon.

**Discussion and Conclusion.** The rod elevator with asymmetric arrangement of web agitators and adjustable elevator apron angle increases the soil screening quality along the entire length of the elevator apron by 10 %, and therefore increases the completeness of separation of root crops from soil impurities.

**Keywords:** rod elevator, web agitator, elevation angle, heap, forward speed, screening quality, soil impurities

**Funding:** The study was supported by the Council for Grants of the President of the Russian Federation (SP-1004.2021.1).

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

**For citation:** Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Aksenov A.G., Mosyakov M.A. Results of Laboratory Studies of Soil Sifting in a Rod Elevator with Asymmetric Arrangement of Web Agitators and Adjustable Elevator Apron Angle. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(3):380-402. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.380-402>

### Введение

Современные исследования машинного производства корнеплодов и лука не в полной мере решает проблему

наличия почвенных и растительных примесей при закладке товарной продукции на хранение [1–4]. Конструктивное исполнение сепарирующих

поверхностей машин для уборки корнеплодов и лука с различными видами интенсификаторов повышает качество уборки механических примесей в товарной продукции [5–7]. Однако использование данных рабочих органов приводит к повышению травмируемости овощной продукции, что происходит из-за отсутствия функционирующих элементов в конструкции машинно-технологических комплексов, определяющих качественное отделение поступающего на обработку вороха [8–11].

Данное обстоятельство обусловлено сильным развитием плужной подошвы при производстве корнеклубнеплодов, выраженным плотным горизонтом, что препятствует проникновению воды вглубь почвы, а также затрудняет развитие корнеклубнеплодов [12–15].

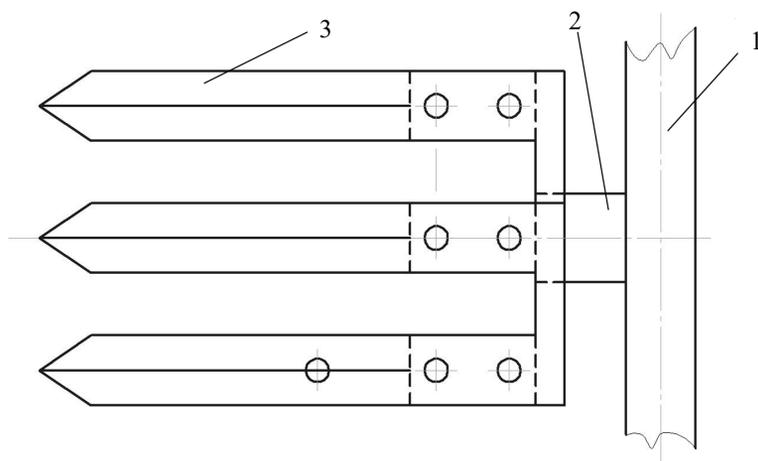
Плотность почвы зависит от гранулометрического и минерального состава, структуры и содержания гумуса, поэтому исключить образование плотных почвенных слоев, формирующих почвенные комки при взаимодействии

с корнеизвлекающими устройствами, не представляется возможным. Необходимо обеспечить разработку машин и технологий, способствующих отделению механических примесей на функционирующих элементах машинно-технологических комплексов для уборки овощных корнеклубнеплодов [16–19].

Цель исследования – выявление участков с минимальной величиной просеивания почвы на поверхности пруткового элеватора в зависимости от угла наклона полотна, а также разработка рекомендаций и предложений по повышению полноты сепарации.

### Обзор литературы

Для снижения вероятности попадания на устройства для очистки уборочных машин почвенных примесей совместно с товарной продукцией сконструированы рабочие органы для извлечения корнеплодов из почвы. К основным признакам данных устройств следует отнести наличие рабочей поверхности, выполненной в виде прутковой поверхности (рис. 1), что способствует предварительной сепарации на этапе извлечения [20; 21].



Р и с. 1. Общий вид подкапывающего лемеха с прутковой поверхностью:  
1 – рама; 2 – кронштейн; 3 – элемент подкапывающий

F i g. 1. General view of a burrowing share with a rod surface:  
1 – frame; 2 – bracket; 3 – dripping element

Следует отметить, что данное конструктивное исполнение подкапывающего рабочего органа не в полной мере способствует уменьшению примесей на этапе извлечения корнеплодов из почвы [22; 23].

В настоящее время сепарирующие поверхности машин для уборки корнеплодов и лука разрабатываются с различными видами интенсификаторов, обеспечивающих повышение качества уборки [24–27].

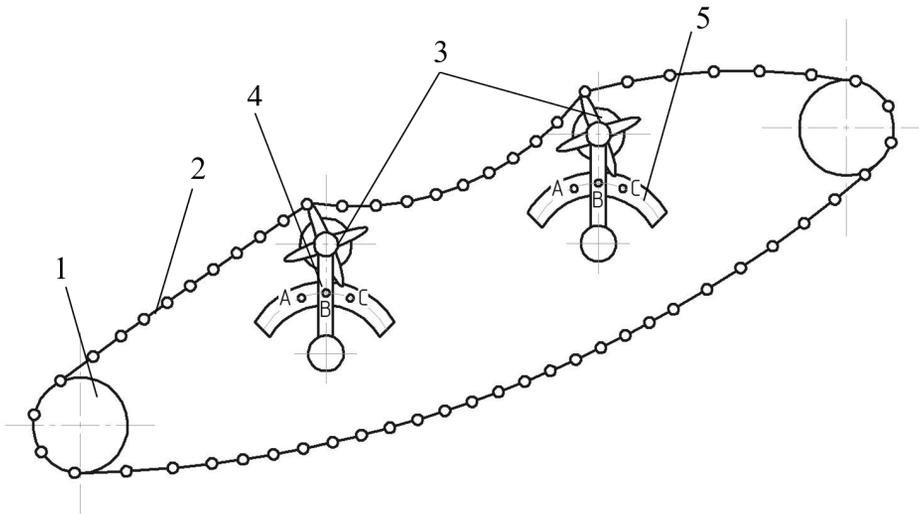
Сепарирующая поверхность пруткового элеватора выполнена с возможностью изменения амплитуды колебания полотна пруткового элеватора 2 перемещением рычага регулировки амплитуды 4 по направляющей 5 (рис. 2) для интенсификации процесса сепарации вороха корнеплодов и лука [5; 28–30]

Основным назначением механизма изменения амплитуды колебания полотна пруткового элеватора 2 при влиянии на рабочую поверхность трехплечикового встряхивателя 3 является интенсивное воздействие на

обрабатываемый ворох почвенно-растительных примесей. Его наличие обусловлено отрицательным инерционным воздействием от силы тяжести, что может травмировать товарную продукцию.

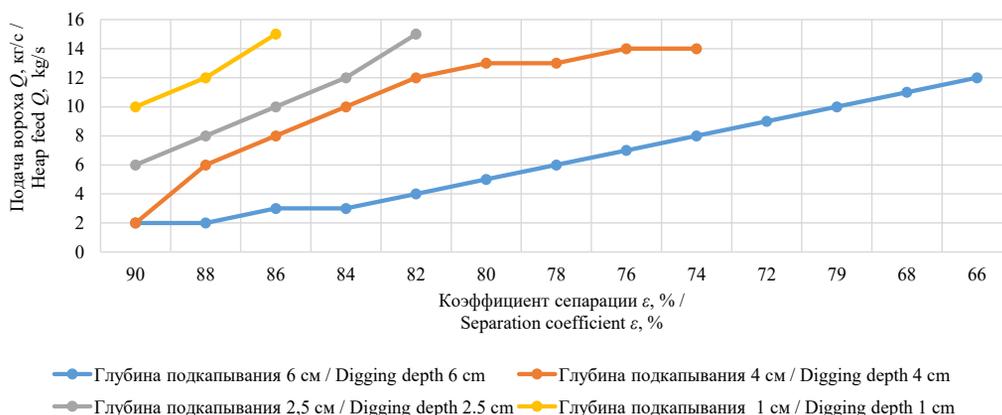
Одним из лимитирующих факторов, способствующих повышению качества уборки корнеклубнеплодов и лука, является несовершенство конструкции рабочих органов, что подтверждают результаты исследований технологического процесса подкапывания клубненосного вороха [6], свидетельствующие о снижении полноты очистки при повышении подачи вороха на сепарирующие устройства уборочной машины при увеличении глубины подкапывания и поступательной скорости движения (рис. 3).

Полученные А. А. Сорокиным эмпирические зависимости направлены на проектирование щелевых рабочих органов, определяющих качественные показатели очистки без устройств, интенсифицирующих процесс сепарации [7].



Р и с. 2. Общий вид сепарирующего пруткового элеватора: 1 – реверсивный резиновый ролик; 2 – полотно прутковое; 3 – встряхиватель; 4 – рычаг регулировки амплитуды; 5 – направляющая

F i g. 2. Separating chain digger: 1 – reversing rubber wheel; 2 – separation sieve; 3 – web agitators; 4 – front adjustment rubber wheel; 5 – guide



Р и с. 3. График зависимости коэффициента сепарации  $\varepsilon$  от подачи вороха  $Q$ :  
1, 2, 3, 4 – глубина подкапывания 6,0, 4,0, 2,5, 1,0 см

Fig. 3. Dependence plot of the separation coefficient  $\varepsilon$  on the supply of the heap  $Q$ :  
1, 2, 3, 4 – digging depth 6.0, 4.0, 2.5, 1.0 cm

Следовательно, проектирование, разработка и изготовление устройств первичной и вторичной очистки с установленными интенсификаторами сепарации современных машин для уборки корнеклубнеплодов на основании ранее полученных исследований не представляются возможными.

Для качественной уборки товарной продукции в современных условиях производства, в соответствии с агротехническими требованиями, необходимо не только дополнительное оснащение сепарирующих рабочих органов различными типами устройств, интенсифицирующими процесс очистки, но и определение закономерностей процесса сепарации при проектировании функционирующих элементов очистки. [5].

Данное обстоятельство связано с неудовлетворительным процессом просеивания почвенных примесей на наиболее распространенном рабочем органе первичной сепарации – прутковом элеваторе [6].

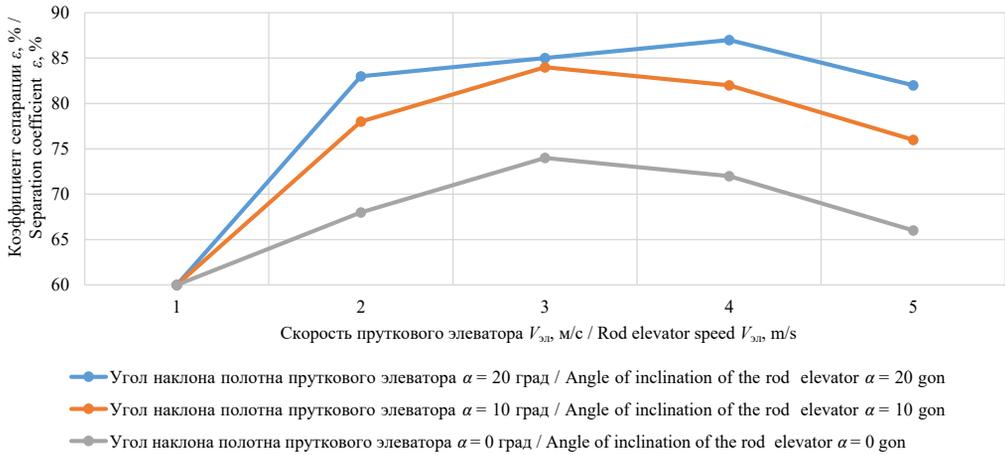
В ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» разработан сепарирующий прутковый элеватор с асимметричным расположением

встряхивателей, обеспечивающий повышение качества очистки при снижении повреждений корнеклубнеплодов, конструктивное исполнение которого было представлено ранее [5; 6].

Известно, что сепарирующая способность пруткового элеватора зависит от угла наклона  $\alpha$  и скорости движения элеватора  $V_{эл}$  (рис. 4).

Определено, что повышение коэффициента сепарации  $\varepsilon$  до предельного положительного значения определяется при пропорциональной зависимости увеличения поступательной скорости  $V_{эл}$  движения очистительного устройства с целевой рабочей поверхностью до предельного значения, достижение которого приводит к ухудшению вышеназванного показателя качества уборки.

При этом наиболее предпочтительным интервалом поступательной скорости движения сепарирующих устройств машин для уборки корнеклубнеплодов и лука является значение 2,0–2,5 м/с, при исключении неравномерности распределения вороха по рабочей поверхности очистительного рабочего органа.



Р и с. 4. График зависимости коэффициента сепарации пруткового элеватора  $\varepsilon$  от угла наклона пруткового элеватора  $\alpha$  и поступательной скорости движения  $V_{эл}$

F i g. 4. The dependence of the separation coefficient of the rod elevator  $\varepsilon$  on the angle of inclination of the rod elevator  $\alpha$  and travel speed  $V_{эл}$

Высокие технологические показатели машинной уборки корнеклубнеплодов и лука приводят к снижению качества технологического процесса. Следовательно, необходимы исследования по выявлению участков с минимальной величиной просеивания почвы на поверхности пруткового элеватора в зависимости от угла наклона полотна, а также разработка рекомендаций и предложений по их повышению.

Результаты исследования позволяют разработать очистительные функционирующие элементы машинно-технологических комплексов для уборки корнеклубнеплодов и лука при известных величинах просеиваемости почвы по длине и ширине рабочего органа с щелевой поверхностью в установленных значениях подачи вороха на обработку.

#### Материалы и методы

Определение закономерности процесса очистки на представленных выше функционирующих элементах уборочных машин производилось на лабораторной установке (рис. 5) [6; 24].

*Technologies and means of agricultural mechanization*

Под верхней рабочей ветвью щелевого функционирующего элемента 3 установлены интенсификаторы сепарации, представляющие собой эллиптический встряхиватель 4 и поддерживающий ролик 5 с вариантом изменения расположения по длине полотна щелевого функционирующего элемента 3 по раме 1 на стойках встряхивателей 12 с закреплением соединительного раме 13 на раме 1.

Для определения массового и фракционного состава почвы на сходе с щелевого функционирующего элемента 3 в конструкции лабораторного стенда предусмотрен брезент сепарированной продукции 6 для сбора примесей.

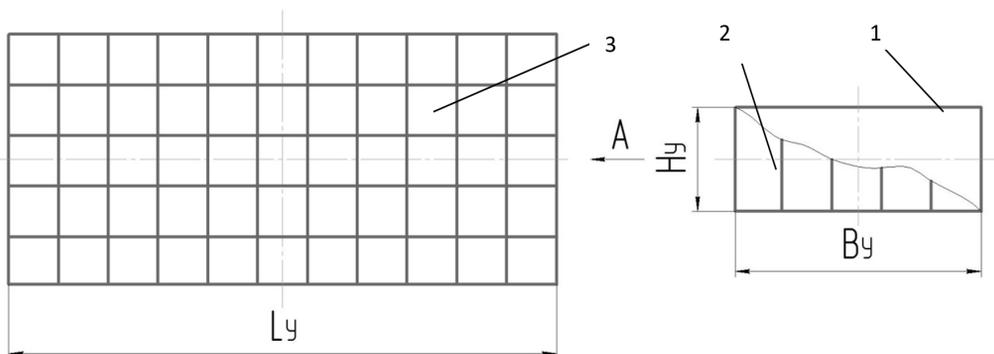
Изменение угла наклона щелевого функционирующего элемента 3 осуществлялось перемещением стоек 11 по раме 1 фиксированием болтовым соединением.

Для определения количества просеянной почвы через щелевой функционирующий элемент 3 под его поверхностью установлено устройство сбора примесей 15, схема которого представлена на рисунке 6.



Р и с. 5. Общий вид лабораторной установки для определения влияния технологических параметров сепарирующего пруткового элеватора на качественные показатели сепарации вороха лука-севка: 1 – рама; 2 – емкость для предварительного размещения вороха; 3 – щелевой функционирующий элемент; 4 – эллиптический встряхиватель; 5 – поддерживающий ролик; 6 – брезент сепарированной продукции; 7 – электродвигатель; 8 – редуктор одноступенчатый; 9 – преобразователь частотный; 10 – передача цепная; 11 – стойки опорные; 12 – стойки встряхивателей; 13 – кронштейн соединительный; 14 – плита опорная; 15 – устройство сбора примесей [1; 5]

Fig. 5. Laboratory installation for determining the impact of the process parameters of the separating rod elevator on the quality of onion set heap separation: 1 – frame; 2 – container for preliminary heap placement; 3 – chain digger; 4 – elliptical web agitator; 5 – supporting roller; 6 – tarpaulin of separated products; 7 – electric motor; 8 – single-stage gearbox; 9 – frequency converter; 10 – chain transmission; 11 – support posts; 12 – web agitator posts; 13 – connecting bracket; 14 – support plate; 15 – impurity collector



Р и с. 6. Устройство сбора примесей: 1 – лоток металлический; 2 – перегородка; 3 – ячейка  
 Fig. 6. General view of the impurity collector: 1 – metal tray; 2 – partition; 3 – cell

Устройство для сбора примесей (рис. 6) представляет из себя металлический лоток 1 длиной  $L_y = 2\ 040$  мм и шириной  $B_y = 1\ 020$  мм. Данные показатели превышают соответствующие величины пруткового элеватора.

Поверхность металлического лотка 1 разделена по длине и ширине перегородками 2, образующими ячейки 3 с высотой  $H_y$  и размерами  $170 \times 170 \times 100$  мм. Каждая ячейка для определения места просеивания почвы по поверхности пруткового элеватора имеет свой порядковый номер.

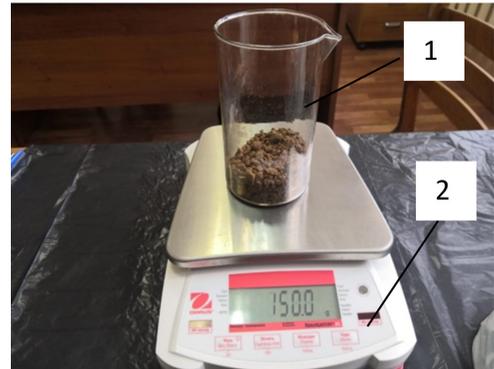
Исследования по определению закономерности процесса сепарации почвенных примесей на прутковом элеваторе с асимметричным расположением встряхивателей проводились при минимальной подаче вороха лука-севка  $Q_{\text{вп}} = 10$  кг/с [9]. Достижение предельного значения подачи  $Q_{\text{вп}} = 30$  кг/с выполнялось с интервалом варьирования в 10 кг/с при изменении поступательной скорости движения функционирующего элемента  $V_{\text{эл}}$  с щелевой рабочей поверхностью. Серия экспериментов проводилась при изменении межосевого расстояния  $S_1$  между пассивным эллиптическим встряхивателем 4 и поддерживающим роликом 5 (рис. 5) при установленных режимных и технологических параметрах для исследуемого значения подачи вороха  $Q_{\text{вп}} = 10, 20, 30$  кг/с [1; 9].

Методика проведения исследований заключалась в следующем. Проба почвы с определенным весом и влажностью укладывалась на поверхность емкости 2 для предварительного размещения вороха. Требуемая влажность почвы создавалась гидравлическим воздействием с последующей выдержкой по времени для получения верхнего значения искомой влажности почвы. Под щелевым функционирующим элементом 3 устанавливалось устройство для сбора примесей 15.

Оптимальные значения поступательной скорости движения пруткового элеватора  $V_{\text{эл}}$  и межосевого расстояния между пассивным эллиптическим встряхивателем 4 и поддерживающим роликом 5  $S_1$  установили в соответствии с результатами проведенных лабораторных исследований.

Выполнялась требуемая синхронная работа частотного преобразователя 9 и электродвигателя 7. Проба почвенных примесей подавалась при равномерном движении сепарирующего рабочего органа 3 из емкости для предварительного размещения вороха 2. Электродвигатель 7 отключали после прохождения почвенных примесей через сепарирующую поверхность пруткового элеватора 2 при исследуемом значении подачи почвенных примесей  $Q_{\text{вп}}$ .

Далее из каждой ячейки устройства для сбора примесей 15 извлекалась почва и взвешивалась на весах модели МК-15.2-A21 (рис. 7).



Р и с. 7. Весы электронные настольные МК-15.2-A21: 1 – колба стеклянная; 2 – весы электронные настольные

F i g. 7. Electronic desktop scales МК-15.2-A21: 1 – a glass bulb; 2 – electronic table scales

По результатам взвешивания просеянной почвы, изъятой из каждой ячейки устройства для сбора примесей и прошедшей через щелевые отверстия пруткового элеватора, определялась зависимость массы просеянных почвенных примесей  $K_{\text{пр}}$  по длине  $L_{\text{эл}}$  и ширине  $B_{\text{эл}}$  пруткового элеватора:

$$\begin{aligned} f(K_{\text{пр}}) &= Q_{\text{вп}}, V_{\text{эл}} = \text{const}; \\ S_1 &= \text{const}; \alpha = \text{const}. \end{aligned} \quad (2)$$

Кроме того, определялся коэффициент сепарации почвенных примесей  $K_c$  на прутковом элеваторе с асимметричным расположением встряхивателей по его длине  $L_{эл}$  и ширине  $B_{эл}$ :

$$K_c = (m_{пр} / m_{пост}) \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где  $m_{пр}$  – масса просеянных почвенных примесей (в устройстве сбора примесей), кг;  $m_{пост}$  – масса поступивших почвенных примесей, кг.

### Результаты исследования

Результаты проведенных исследований заносились в журнал наблюдений и представлены в таблицах 1–8.

Графическое отображение результатов исследований по определению закономерности сепарации почвенных примесей представлены на рисунках 8–15.

Используя представленные графические зависимости, можно определить массу просеянных почвенных примесей через щелевые отверстия пруткового элеватора с асимметричным расположением встряхивателей при изменении подачи почвенных примесей  $Q_{вп}$  с постоянными значениями технологических параметров  $V_{эл} = \text{const}$ ;  $S_1 = \text{const}$ ;  $\alpha = \text{const}$ .

Для этого после определения соответствующего участка по длине пруткового элеватора необходимо провести параллельно оси ординат прямую до пересечения с графиком.

По оси абсцисс указана изменяемая длина пруткового элеватора, по оси ординат – масса просеянных почвенных примесей.

Представленные графические зависимости показывают, что интенсивность просеивания почвы на прутковом элеваторе с асимметричным расположением встряхивателей обеспечивается при увеличении подачи почвенных примесей от 10 до 30 кг/с. Данное обстоятельство объясняется тем, что

при перемещении массы почвенных примесей по поверхности пруткового элеватора происходит процесс расклинивания крупными частицами промежутков в почвенной массе. Так как в почвенной навеске большей массы имеется содержание крупных частиц, то и процесс просеивания происходит более интенсивно при увеличении подачи примесей на поверхность пруткового элеватора, в отличие от навески меньшей массы. Максимальное значение массы  $K_{пр}$  просеянной почвы, вне зависимости от значения подачи почвенных примесей, наблюдается на участке затухания длины волны рабочей ветви пруткового элеватора, что обусловлено воздействием эллиптического встряхивателя на соответствующей длине пруткового элеватора  $L_{эл} = 1\,020$  мм.

При дальнейшем продвижении почвенной массы по длине пруткового элеватора происходит снижение интенсивности процесса просеивания почвенных примесей в результате затухания длины волны рабочей ветви пруткового элеватора от воздействия эллиптического встряхивателя.

### Обсуждение и заключение

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что основная масса почвенных примесей просеивается на участке расположения встряхивателей, формирующих длину волны встряхивания, которая при проведении исследований устанавливалась в интервале значений  $S_1 = 0,2–0,4$  м.

Полученные результаты исследований позволят обеспечить интенсификацию процесса сепарации корнеклубнеплодов и луковиц от почвенных примесей с помощью оптимального расположения встряхивателей по длине пруткового элеватора при известных значениях максимальной просеиваемости почвенных примесей.

Таблица 1  
Table 1

Результаты исследований по определению массы просеянных почвенных примесей  $K_{пр}$  по поверхности пруткового элеватора при  $Q_{бн} = 10$  кг/с,  $V_{зт} = 1,6$  м/с,  $S_1 = 0,4$  м,  $\alpha = 10$  град  
Results of research to determine the weight of screened soil impurities  $K_{пр}$  along the rod elevator surface at  $Q_{бн} = 10$  kg/s,  $V_{зт} = 1.6$  m/s,  $S_1 = 0.4$  m,  $\alpha = 10$  gon

Ширина пруткового элеватора $B_{зт}$ , мм / Chain Digger Width $B_{зт}$ , mm	Длина пруткового элеватора $L_{зт}$ , мм / Chain Digger Length $L_{зт}$ , mm										Итого, кг / Total, kg	
	170	340	510	680	850	1 020	1 190	1 360	1 530	1 700		1 870
170	0,03	0,04	0,13	0,15	0,13	0,16	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,08
340	0,05	0,07	0,15	0,18	0,15	0,17	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,05
510	0,06	0,07	0,24	0,25	0,32	0,28	0,16	0,15	0,14	0,14	0,13	0,12
680	0,07	0,08	0,26	0,28	0,33	0,29	0,16	0,15	0,13	0,12	0,11	0,09
850	0,06	0,08	0,25	0,27	0,33	0,29	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10
1 020	0,05	0,06	0,18	0,20	0,21	0,20	0,13	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07
												9,93

Таблица 2  
Table 2

Результаты исследований по определению массы просеянных почвенных примесей  $K_{пр}$  по поверхности пруткового элеватора при  $Q_{бн} = 20$  кг/с,  $V_{зт} = 1,6$  м/с,  $S_1 = 0,4$  м,  $\alpha = 10$  град  
Results of research to determine the weight of screened soil impurities  $K_{пр}$  along the rod elevator surface at  $Q_{бн} = 20$  kg/s,  $V_{зт} = 1.6$  m/s,  $S_1 = 0.4$  m,  $\alpha = 10$  gon

Ширина пруткового элеватора $B_{зт}$ , мм / Chain Digger Width $B_{зт}$ , mm	Длина пруткового элеватора $L_{зт}$ , мм / Chain Digger Length $L_{зт}$ , mm										Итого, кг / Total, kg	
	170	340	510	680	850	1 020	1 190	1 360	1 530	1 700		1 870
170	0,08	0,11	0,23	0,35	0,43	0,36	0,09	0,11	0,11	0,12	0,10	0,09
340	0,08	0,10	0,23	0,36	0,42	0,37	0,12	0,13	0,12	0,11	0,09	0,09
510	0,11	0,15	0,38	0,59	0,68	0,64	0,28	0,26	0,23	0,21	0,18	0,15
680	0,11	0,15	0,41	0,64	0,71	0,75	0,30	0,27	0,24	0,22	0,21	0,17
850	0,12	0,14	0,48	0,57	0,68	0,69	0,28	0,26	0,21	0,19	0,18	0,16
1 020	0,11	0,15	0,38	0,43	0,52	0,54	0,24	0,23	0,21	0,22	0,13	0,12
												19,68

Таблица 3  
Table 3

Результаты исследований по определению массы просеянных почвенных примесей  $K_{np}$  по поверхности  
 пруткового элеватора при  $Q_{вн} = 30$  кг/с,  $V_{зп} = 1,6$  м/с,  $S_1 = 0,4$  м,  $\alpha = 10$  град  
 Results of research to determine the weight of screened soil impurities  $K_{np}$  along the rod elevator surface  
 at  $Q_{вн} = 30$  kg/s,  $V_{зп} = 1.6$  m/s,  $S_1 = 0.4$  m,  $\alpha = 10$  gon

Ширина пруткового элеватора $B_{зп}$ , мм / Chain digger width $B_{зп}$ , mm	Длина пруткового элеватора $L_{зп}$ , мм / Chain digger length $L_{зп}$ , mm										Итого, кг / Total, kg	
	170	340	510	680	850	1 020	1 190	1 360	1 530	1 700		1 870
170	0,09	0,11	0,46	0,57	0,68	0,75	0,21	0,18	0,15	0,11	0,12	0,10
340	0,09	0,12	0,58	0,65	0,71	0,84	0,28	0,25	0,22	0,15	0,14	0,12
510	0,11	0,12	0,71	0,78	0,83	0,93	0,31	0,27	0,24	0,17	0,16	0,15
680	0,11	0,15	0,78	0,88	0,97	0,92	0,46	0,39	0,38	0,36	0,32	0,26
850	0,10	0,14	0,79	0,87	0,94	0,92	0,45	0,37	0,35	0,33	0,32	0,28
1 020	0,10	0,11	0,76	0,79	0,88	0,96	0,31	0,28	0,23	0,16	0,15	0,13

 Таблица 4  
Table 4

Результаты исследований по определению массы просеянных почвенных примесей  $K_{np}$  по поверхности  
 пруткового элеватора при  $Q_{вн} = 10$  кг/с,  $V_{зп} = 1,6$  м/с,  $S_1 = 0,4$  м,  $\alpha = 15$  град  
 Results of research to determine the weight of screened soil impurities  $K_{np}$  along the rod elevator surface  
 at  $Q_{вн} = 10$  kg/s,  $V_{зп} = 1.6$  m/s,  $S_1 = 0.4$  m,  $\alpha = 15$  gon

Ширина пруткового элеватора $B_{зп}$ , мм / Chain Digger Width $B_{зп}$ , mm	Длина пруткового элеватора $L_{зп}$ , мм / Chain digger length $L_{зп}$ , mm										Итого, кг / Total, kg	
	170	340	510	680	850	1 020	1 190	1 360	1 530	1 700		1 870
170	0,03	0,05	0,14	0,27	0,21	0,23	0,04	0,07	0,08	0,07	0,11	0,05
340	0,04	0,03	0,18	0,33	0,25	0,26	0,06	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03
510	0,06	0,06	0,20	0,30	0,38	0,31	0,11	0,09	0,10	0,09	0,10	0,07
680	0,03	0,03	0,22	0,27	0,41	0,37	0,12	0,10	0,09	0,07	0,07	0,04
850	0,02	0,05	0,18	0,42	0,38	0,41	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,05
1 020	0,03	0,07	0,15	0,41	0,47	0,43	0,10	0,08	0,06	0,08	0,07	0,06



Таблица 5  
Table 5

Результаты исследований по определению массы просеянных почвенных примесей  $K_{np}$  по поверхности пруткового элеватора при  $Q_{\text{вн}} = 20$  кг/с,  $V_{\text{эл}} = 1,6$  м/с,  $S_1 = 0,4$  м,  $\alpha = 15$  град  
Results of research to determine the weight of screened soil impurities  $K_{np}$  along the rod elevator surface at  $Q_{\text{вн}} = 20$  kg/s,  $V_{\text{эл}} = 1,6$  m/s,  $S_1 = 0,4$  m,  $\alpha = 15$  gon

Ширина пруткового элеватора $B_{\text{эл}}$ , мм / Chain Digger Width $B_{\text{эл}}$ , mm	Длина пруткового элеватора $L_{\text{эл}}$ , мм / Chain digger length $L_{\text{эл}}$ , mm										Итого, кг / Total, kg	
	170	340	510	680	850	1 020	1 190	1 360	1 530	1 700		1 870
170	0,07	0,08	0,21	0,38	0,47	0,41	0,08	0,09	0,10	0,11	0,10	0,08
340	0,06	0,09	0,23	0,41	0,44	0,40	0,14	0,11	0,09	0,10	0,08	0,07
510	0,09	0,12	0,31	0,64	0,73	0,68	0,35	0,28	0,21	0,18	0,15	0,12
680	0,10	0,10	0,34	0,68	0,75	0,77	0,38	0,30	0,24	0,22	0,18	0,12
850	0,10	0,10	0,43	0,70	0,73	0,76	0,32	0,34	0,27	0,21	0,23	0,14
1 020	0,10	0,12	0,33	0,52	0,58	0,60	0,26	0,25	0,28	0,25	0,18	0,10

Таблица 6  
Table 6

Результаты исследований по определению массы просеянных почвенных примесей  $K_{np}$  по поверхности пруткового элеватора при  $Q_{\text{вн}} = 30$  кг/с,  $V_{\text{эл}} = 1,6$  м/с,  $S_1 = 0,4$  м,  $\alpha = 15$  град  
Results of research to determine the weight of screened soil impurities  $K_{np}$  along the rod elevator surface at  $Q_{\text{вн}} = 30$  kg/s,  $V_{\text{эл}} = 1,6$  m/s,  $S_1 = 0,4$  m,  $\alpha = 15$  gon

Ширина пруткового элеватора $B_{\text{эл}}$ , мм / Chain Digger Width $B_{\text{эл}}$ , mm	Длина пруткового элеватора $L_{\text{эл}}$ , мм / Chain Digger Length $L_{\text{эл}}$ , mm										Итого, кг / Total, kg	
	170	340	510	680	850	1 020	1 190	1 360	1 530	1 700		1 870
170	0,05	0,08	0,24	0,58	0,72	0,78	0,36	0,28	0,23	0,24	0,18	0,20
340	0,06	0,11	0,34	0,69	0,77	0,89	0,38	0,31	0,29	0,25	0,19	0,19
510	0,15	0,16	0,37	0,82	0,87	0,98	0,37	0,33	0,31	0,25	0,18	0,21
680	0,18	0,21	0,42	0,91	0,92	0,92	0,46	0,41	0,41	0,40	0,38	0,36
850	0,12	0,16	0,42	0,93	0,96	0,95	0,53	0,42	0,44	0,43	0,42	0,34
1 020	0,14	0,16	0,45	0,89	0,90	0,92	0,38	0,31	0,27	0,19	0,18	0,15

Таблица 7  
Table 7

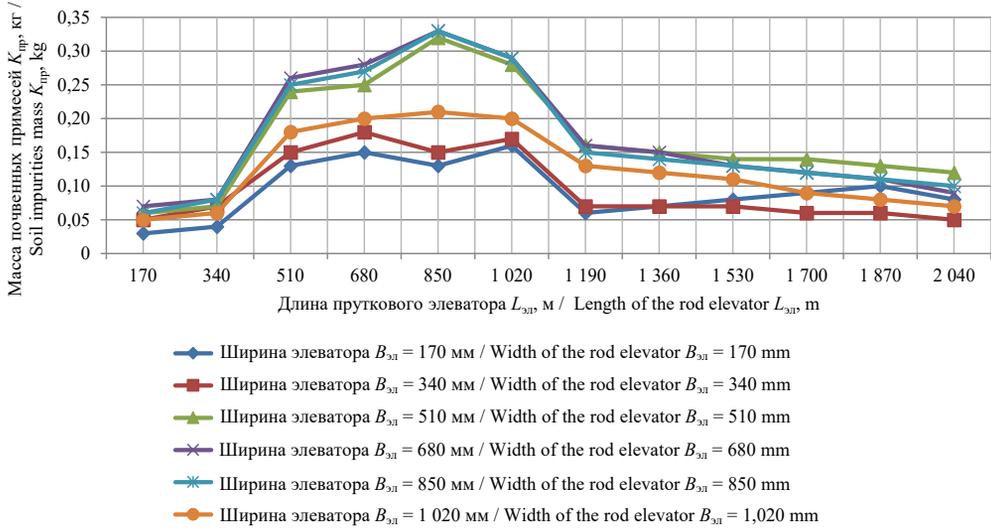
**Результаты исследований по определению массы просеянных почвенных примесей  $K_{пр}$  по поверхности пруткового элеватора при  $Q_{вн} = 10$  кг/с,  $V_{эл} = 1,6$  м/с,  $S_1 = 0,4$  м,  $\alpha = 20$  град**  
**Results of research to determine the weight of screened soil impurities  $K_{пр}$  along the rod elevator surface at  $Q_{вн} = 10$  kg/s,  $V_{эл} = 1.6$  m/s,  $S_1 = 0.4$  m,  $\alpha = 20$  gon**

Ширина пруткового элеватора $B_{эл}$ , мм / Chain Digger Width $B_{эл}$ , mm	Длина пруткового элеватора $L_{эл}$ , мм / Chain Digger Length $L_{эл}$ , mm										Итого, кг / Total, kg	
	170	340	510	680	850	1 020	1 190	1 360	1 530	1 700		1 870
170	0,05	0,07	0,19	0,18	0,18	0,16	0,14	0,14	0,11	0,09	0,09	0,07
340	0,05	0,07	0,20	0,24	0,22	0,21	0,18	0,19	0,17	0,11	0,11	0,10
510	0,06	0,06	0,18	0,25	0,26	0,25	0,16	0,15	0,15	0,12	0,12	0,11
680	0,06	0,07	0,19	0,25	0,25	0,26	0,17	0,17	0,15	0,11	0,11	0,09
850	0,05	0,05	0,18	0,32	0,33	0,35	0,18	0,16	0,14	0,12	0,13	0,08
1 020	0,05	0,08	0,17	0,23	0,26	0,25	0,18	0,17	0,15	0,13	0,11	0,11

 Таблица 8  
Table 8

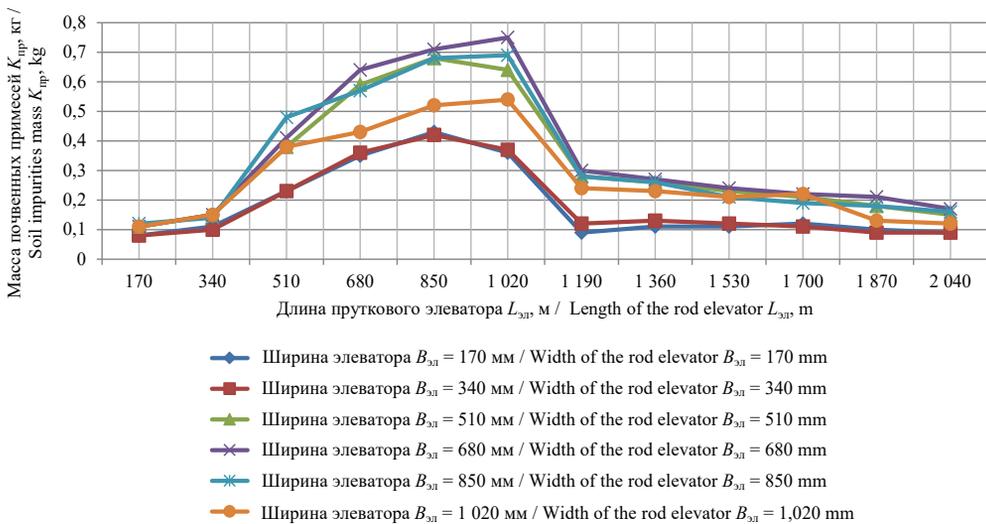
**Результаты исследований по определению массы просеянных почвенных примесей  $K_{пр}$  по поверхности пруткового элеватора при  $Q_{вн} = 20$  кг/с,  $V_{эл} = 1,6$  м/с,  $S_1 = 0,4$  м,  $\alpha = 20$  град**  
**Results of research to determine the weight of screened soil impurities  $K_{пр}$  along the rod elevator surface at  $Q_{вн} = 20$  kg/s,  $V_{эл} = 1.6$  m/s,  $S_1 = 0.4$  m,  $\alpha = 20$  gon**

Ширина пруткового элеватора $B_{эл}$ , мм / Chain Digger Width $B_{эл}$ , mm	Длина пруткового элеватора $L_{эл}$ , мм / Chain Digger Length $L_{эл}$ , mm										Итого, кг / Total, kg	
	170	340	510	680	850	1 020	1 190	1 360	1 530	1 700		1 870
170	0,09	0,07	0,23	0,48	0,32	0,36	0,32	0,28	0,11	0,12	0,11	0,11
340	0,10	0,08	0,26	0,48	0,34	0,38	0,39	0,28	0,12	0,12	0,11	0,11
510	0,10	0,13	0,26	0,42	0,36	0,47	0,46	0,31	0,19	0,15	0,13	0,12
680	0,09	0,14	0,35	0,55	0,48	0,47	0,41	0,38	0,20	0,21	0,14	0,15
850	0,08	0,14	0,46	0,56	0,58	0,48	0,46	0,40	0,26	0,22	0,20	0,12
1 020	0,08	0,15	0,38	0,57	0,54	0,44	0,48	0,36	0,28	0,22	0,18	0,14



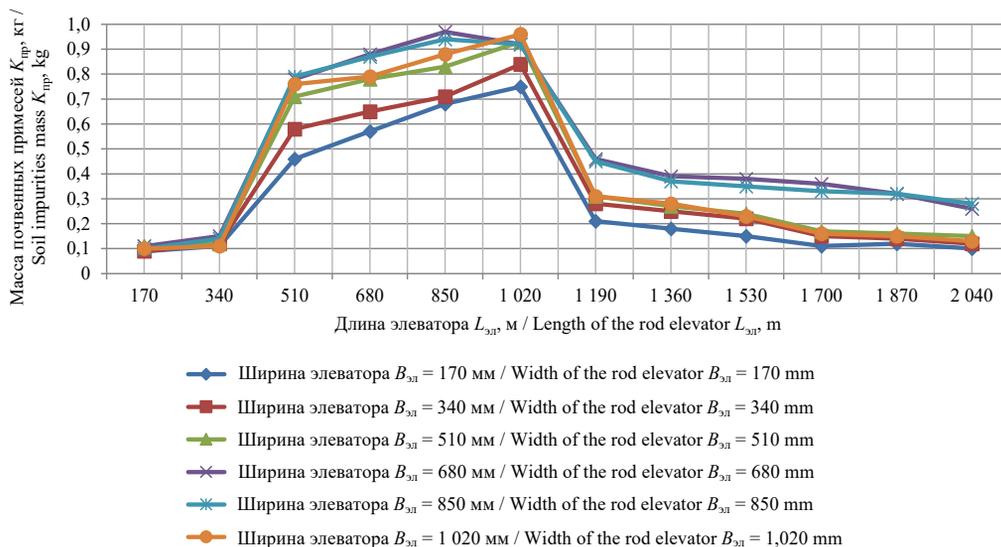
Р и с. 8. Зависимость просеивания почвы по длине и ширине пруткового элеватора с асимметричным расположением встряхивателей при  $Q_{вп} = 10$  кг/с,  $V_{эл} = 1,6$  м/с,  $S_1 = 0,4$  м,  $\alpha = 10$  град

F i g. 8. Dependence of soil screening along the length and width of the rod elevator with an asymmetric arrangement of web agitators at  $Q_{вп} = 10$  kg/s,  $V_{эл} = 1.6$  m/s,  $S_1 = 0.4$  m,  $\alpha = 10$  gon



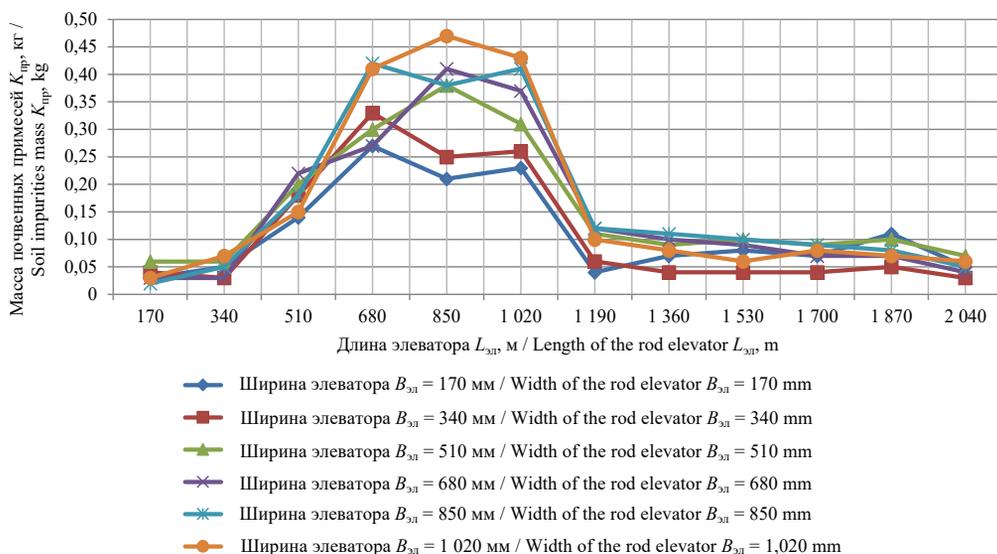
Р и с. 9. Зависимость просеивания почвы по длине и ширине пруткового элеватора с асимметричным расположением встряхивателей при  $Q_{вп} = 20$  кг/с,  $V_{эл} = 1,6$  м/с,  $S_1 = 0,4$  м,  $\alpha = 10$  град

F i g. 9. Dependence of soil screening along the length and width of the rod elevator with asymmetric arrangement of web agitators at  $Q_{вп} = 20$  kg/s,  $V_{эл} = 1.6$  m/s,  $S_1 = 0.4$  m,  $\alpha = 10$  gon



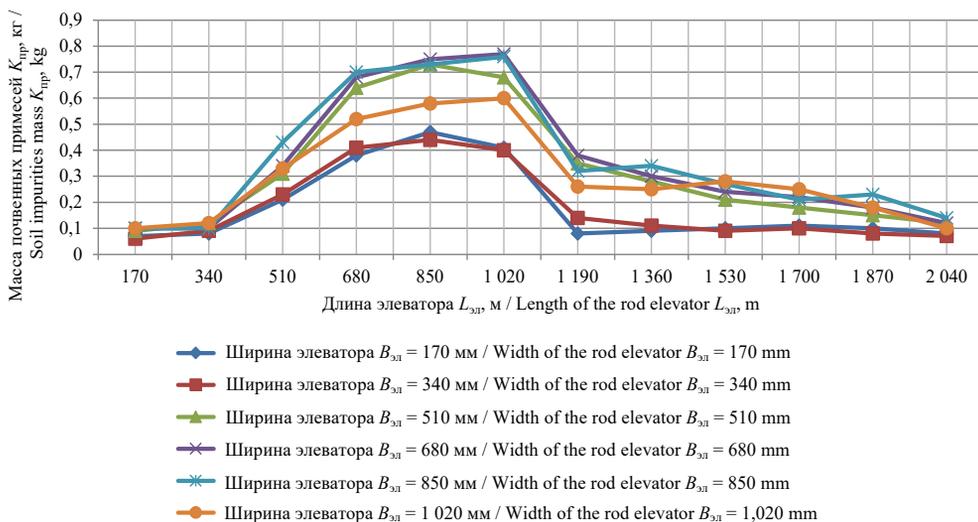
Р и с. 10. Зависимость просеивания почвы по длине и ширине пруткового элеватора с асимметричным расположением встряхивателей при  $Q_{вн} = 30$  кг/с,  $V_{эл} = 1,6$  м/с,  $S_1 = 0,4$  м,  $\alpha = 10$  град

F i g. 10. Dependence of soil screening along the length and width of the rod elevator with an asymmetric web agitator arrangement at  $Q_{вн} = 30$  kg/s,  $V_{эл} = 1.6$  m/s,  $S_1 = 0.4$  m,  $\alpha = 10$  gon



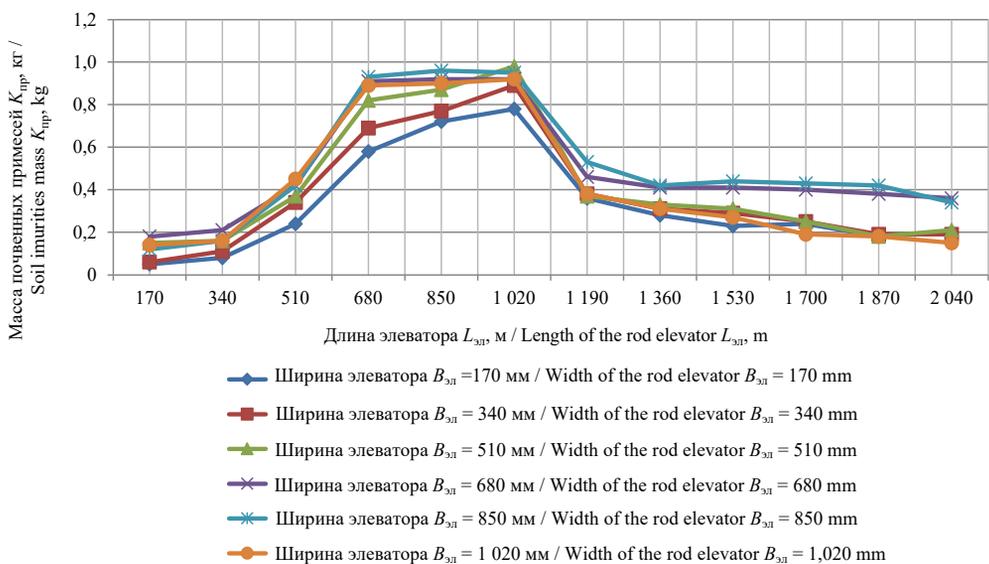
Р и с. 11. Зависимость просеивания почвы по длине и ширине пруткового элеватора с асимметричным расположением встряхивателей при  $Q_{вн} = 10$  кг/с,  $V_{эл} = 1,6$  м/с,  $S_1 = 0,4$  м,  $\alpha = 15$  град

F i g. 11. Dependence of soil screening along the length and width of the rod elevator with an asymmetric web agitator arrangement at  $Q_{вн} = 10$  kg/s,  $V_{эл} = 1.6$  m/s,  $S_1 = 0.4$  m,  $\alpha = 15$  gon



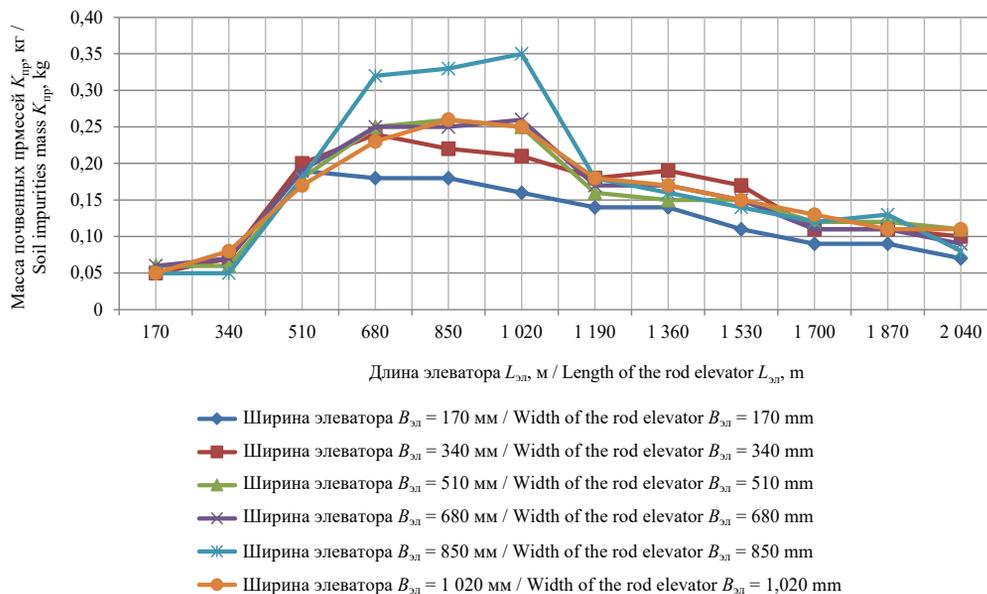
Р и с. 12. Зависимость просеивания почвы по длине и ширине пруткового элеватора с асимметричным расположением встряхивателей при  $Q_{вп} = 20$  кг/с,  $V_{эл} = 1,6$  м/с,  $S_1 = 0,4$  м,  $\alpha = 15$  град

F i g. 12. Dependence of soil screening along the length and width of the rod elevator with an asymmetric web agitator arrangement at  $Q_{вп} = 20$  kg/s,  $V_{эл} = 1.6$  m/s,  $S_1 = 0.4$  m,  $\alpha = 15$  gon



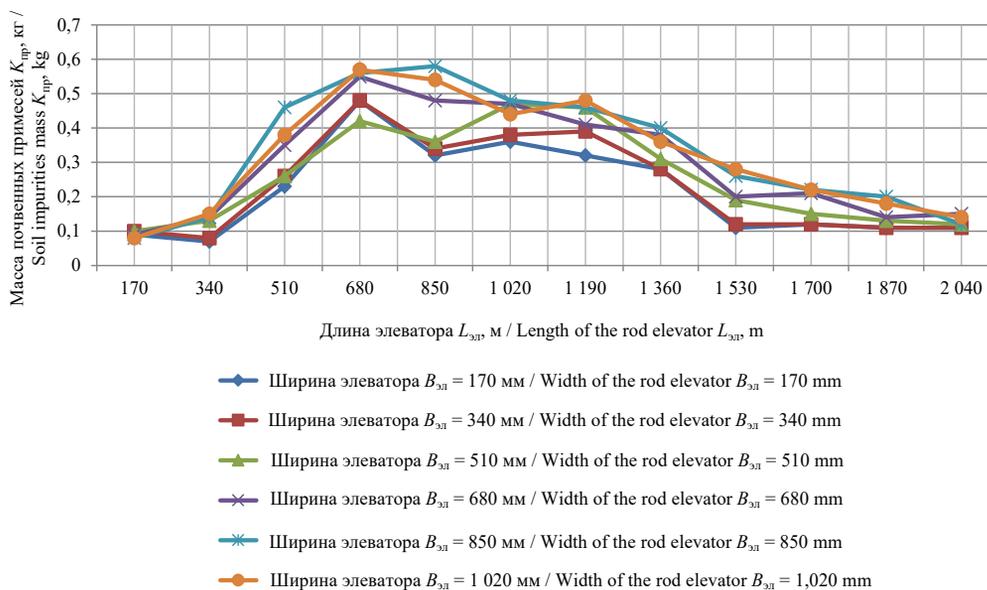
Р и с. 13. Зависимость просеивания почвы по длине и ширине пруткового элеватора с асимметричным расположением встряхивателей при  $Q_{вп} = 30$  кг/с,  $V_{эл} = 1,6$  м/с,  $S_1 = 0,4$  м,  $\alpha = 15$  град

F i g. 13. Dependence of soil screening along the length and width of the rod elevator with an asymmetric web agitator arrangement at  $Q_{вп} = 30$  kg/s,  $V_{эл} = 1.6$  m/s,  $S_1 = 0.4$  m,  $\alpha = 15$  gon



Р и с. 14. Зависимость просеивания почвы по длине и ширине пруткового элеватора с асимметричным расположением встряхивателей при  $Q_{вн} = 10$  кг/с,  $V_{эл} = 1,6$  м/с,  $S_1 = 0,4$  м,  $\alpha = 20$  град

F i g. 14. Dependence of soil screening along the length and width of the rod elevator with an asymmetric web agitator arrangement at  $Q_{вн} = 10$  kg/s,  $V_{эл} = 1.6$  m/s,  $S_1 = 0.4$  m,  $\alpha = 20$  gon



Р и с. 15. Зависимость просеивания почвы по длине и ширине пруткового элеватора с асимметричным расположением встряхивателей при  $Q_{вн} = 20$  кг/с,  $V_{эл} = 1,6$  м/с,  $S_1 = 0,4$  м,  $\alpha = 20$  град

F i g. 15. Dependence of soil screening along the length and width of the rod elevator with an asymmetric web agitator arrangement at  $Q_{вн} = 20$  kg/s,  $V_{эл} = 1.6$  m/s,  $S_1 = 0.4$  m,  $\alpha = 20$  gon

Приведенные данные указывают на высокую интенсивность процесса просеивания почвы на участке пруткового элеватора с оптимальным расположением встряхивателей. Затронутая проблема нуждается в разработке и станет объектом дальнейших исследований коллектива авторов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Сибирёв, А. В.** Обоснование конструктивных и технологических параметров сепарирующего пруткового транспортера с асимметричным расположением встряхивателей / А. В. Сибирёв, А. Г. Аксенов, М. А. Мосяков // Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2018. – № 4. – С. 15–20. – URL: <http://elib.timacad.ru/dl/full/vmgau-02-2018-04.pdf/download/vmgau-02-2018-04.pdf> (дата обращения: 18.12.2020). – Рез. англ.
2. Design Modification and Field Testing of Groundnut Digger / T. Asghar, A. Ghafoor, A. Munir [et al.] // Asian Journal of Science and Technology. – 2014. – Vol. 5, Issue 7. – Pp. 389–394. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/274373280\\_DESIGN\\_MODIFICATION\\_AND\\_FIELD\\_TESTING\\_OF\\_GROUNDNUT\\_DIGGER](https://www.researchgate.net/publication/274373280_DESIGN_MODIFICATION_AND_FIELD_TESTING_OF_GROUNDNUT_DIGGER) (дата обращения: 18.12.2020).
3. **Akdemir, B.** Mechanized Panting and Harvesting of Onion / B. Akdemir, P. Ulger, S. Arin // Agricultural Mechanization in Asia, Africa & Latin America. – 1993. – Vol. 24, Issue 4. – Pp. 23–26. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/289056030\\_Mechanized\\_panting\\_and\\_harvesting\\_of\\_onion](https://www.researchgate.net/publication/289056030_Mechanized_panting_and_harvesting_of_onion) (дата обращения: 18.12.2020).
4. **Sibirev, A. V.** Experimental Laboratory Research of Separation Intensity of Onion Set Heaps on Rod Elevator / A. V. Sibirev, A. G. Aksenov, M. A. Mosyakov // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2018. – Vol. 13, Issue 23. – Pp. 10086–10091. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/329752893\\_Experimental\\_laboratory\\_research\\_of\\_separation\\_intensity\\_of\\_onion\\_set\\_heaps\\_on\\_rod\\_elevator](https://www.researchgate.net/publication/329752893_Experimental_laboratory_research_of_separation_intensity_of_onion_set_heaps_on_rod_elevator) (дата обращения: 18.12.2020).
5. **Сибирёв, А. В.** Результаты экспериментальных исследований сепарации вороха лука-севка на прутковом элеваторе с асимметрично установленными встряхивателями / А. В. Сибирёв, А. Г. Аксенов, М. А. Мосяков. – DOI 10.15507/2658-4123.029.201901.091-107 // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 1. – С. 91–107. – Рез. англ.
6. **Дорохов, А. С.** Результаты полевых исследований машины для уборки лука-севка, оснащенной прутковым элеватором с асимметричным расположением встряхивателей / А. С. Дорохов, А. В. Сибирёв, А. Г. Аксенов. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202001.133-148 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 133–148. – Рез. англ.
7. **Pasaman, B.** The Determination of the Parameters of a Ploughshare-Rotor Potato Digger / B. Pasaman, V. Zakharchuk // ECONTECHMOD. – 2012. – no. 2. – Pp. 43–47. – URL: <http://www.journals.pan.pl/dlibra/publication/98931/edition/85237/content> (дата обращения: 18.12.2020).
8. **Abd El-Rahman, M. M.** Development and Performance Evaluation of a Simple Grading Machine Suitable for Onion Sets / M. M. Abd El-Rahman. – DOI 10.21608/JSSAE.2011.55418 // Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering. – 2011. – Vol. 2, Issue 2. – Pp. 213–226.
9. **Khura, T. I C A R** Design and Development of Tractor-Drawn Onion (Allium Cepa) Harvester / T. Khura, I. Mani, A. Srivastava // Indian Journal of Agricultural Sciences. – 2011. – Vol. 81, Issue 6. – Pp. 528–532. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/267251851\\_I\\_C\\_A\\_R\\_Design\\_and\\_development\\_of\\_tractor-drawn\\_onion\\_Allium\\_cepa\\_harvester](https://www.researchgate.net/publication/267251851_I_C_A_R_Design_and_development_of_tractor-drawn_onion_Allium_cepa_harvester) (дата обращения: 18.12.2020).
10. **Indraja, D.** A Review Paper Based on Design and Development of an Onion Harvesting Machine / D. Indraja, J. Ajkhilesh, P. Vishal [et al.] // Journal of Information and Computational Science. – 2019. – Vol. 9, Issue 12. – Pp. 333–337. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/339201506> (дата обращения: 18.12.2020).
11. **Bachche, S.** Deliberation on Design Strategies of Automatic Harvesting Systems: A Survey / S. Bachche. – DOI 10.3390/robotics4020194 // Robotics. – 2015. – Vol. 4, Issue 2. – Pp. 194–222.

12. **Dai, F.** Design and Experiment of Combined Operation Machine for Potato Harvesting and Plastic Film Pneumatic Auxiliary Collecting / F. Dai, W. Zhao, W. Sun. – DOI 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.009 // Transactions of the CSAM. – 2018. – Vol. 49, Issue 3. – Pp. 104–113.
13. Stability Tests of Two-Finger Tomato Grasping for Harvesting Robots / Z. Li, P. Li, H. Yang, Y. Wang. – DOI 10.1016/j.biosystemseng.2013.07.017 // Biosystems Engineering. – 2013. – Vol. 116, Issue 2. – Pp. 163–170.
14. О взаимодействии клубненосного пласта с рабочими органами копателя / Н. В. Бышов, С. Н. Борычев, Н. Н. Якутин [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. – 2018. – № 4 (40). – С. 161–167. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36673758> (дата обращения: 18.12.2020). – Рез. англ.
15. Исследование тягового сопротивления лемеха с переменным углом наклона / Э. О. Нестерович, Н. В. Бышов, М. Ю. Костенко [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. – 2018. – № 1 (37). – С. 84–89. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35056434> (дата обращения: 18.12.2020). – Рез. англ.
16. Модернизация копателя КСТ-1,4 / Н. В. Бышов, Н. Н. Якутин, Р. Ю. Ковешников [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. – 2016. – № 2 (30). – С. 75–78. – URL: [http://vestnik.rgatu.ru/archive/2016\\_2.pdf](http://vestnik.rgatu.ru/archive/2016_2.pdf) (дата обращения: 18.12.2020). – Рез. англ.
17. **Bachche, S.** Modeling and Performance Testing of End-Effector for Sweet Pepper Harvesting Robot / S. Bachche, K. Oka. – DOI 10.20965/jrm.2013.p0705 // Journal of Robotics and Mechatronics. – 2013. – Vol. 25, Issue 4. – Pp. 705–717.
18. **Якутин, Н. Н.** Результаты экспериментальных исследований процесса машинной уборки картофеля усовершенствованным копателем КТН-2В / Н. Н. Якутин, Н. В. Бышов, Г. К. Рембалович // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 99 (5). – С. 1052–1061. – URL: <https://clck.ru/WcRIE> (дата обращения: 18.12.2020). – Рез. англ.
19. Выбор и обоснование параметров экологического состояния агроэкосистемы для мониторинга технологических процессов возделывания сельскохозяйственных культур / А. Б. Калинин, В. А. Смелик, И. З. Теплинский, О. Н. Первухина // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2015. – № 39. – С. 315–319. – URL: <https://clck.ru/Wcs6y> (дата обращения: 18.12.2020). – Рез. англ.
20. **Протасов, А. А.** Технология и средства механизации для двухфазной уборки лука-репки / А. А. Протасов, С. А. Макаров. – DOI 10.28983/asj.v0i10.592 // Аграрный научный журнал. – 2018. – № 10. – С. 59–62. – Рез. англ.
21. **Kumar, D.** Performance Evaluation of Tractor Drawn Potato Digger Cum – Elevator / D. Kumar, A. Tripathi // International Journal of Agricultural Science and Research. – 2017. – Vol. 7, Issue 2. – Pp. 433–448. – URL: <http://www.tjprc.org/publishpapers/2-50-1490605027-55.IJASRAPR201755.pdf> (дата обращения: 18.12.2020).
22. **Massah, J.** Effect of Blade Angle and Speed of Onion Harvester on Mechanical Damage of Onion Bulbs / J. Massah, A. Lotfi, A. Arabhosseini // Agricultural Mechanization in Asia, Africa & Latin America. – 2012. – Vol. 43, Issue 3. – Pp. 60–63. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/287778155\\_Effect\\_of\\_Blade\\_Angle\\_and\\_Speed\\_of\\_Onion\\_Harvester\\_on\\_Mechanical\\_Damage\\_of\\_Onion\\_Bulbs](https://www.researchgate.net/publication/287778155_Effect_of_Blade_Angle_and_Speed_of_Onion_Harvester_on_Mechanical_Damage_of_Onion_Bulbs) (дата обращения: 18.12.2020).
23. **Jothi Shanmugam, C.** Indigenous Development of Low Cost Harvesting Machine / C. Jothi Shanmugam, G. Senthilkumar // ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2017. – Vol. 12, Issue 5. – Pp. 4489–4490. – URL: [http://www.arpnjournals.org/jreas/research\\_papers/rp\\_2017/jreas\\_0817\\_6236.pdf](http://www.arpnjournals.org/jreas/research_papers/rp_2017/jreas_0817_6236.pdf) (дата обращения: 18.12.2020).
24. **Mayer, V.** Measurement of Potato Tubers Resistance against Mechanical Loading / V. Mayer, D. Vejchar, L. Pastorková. – DOI 10.17221/708-RAE // Research in Agricultural Engineering. – 2008. – Vol. 54, Issue 1. – Pp. 22–31.

25. Патент № 2638190 Российская Федерация, МПК A01 D33/00. Сепарирующий транспортер корнеклубнеуборочной машины : № 2017107814 : заявл. 10.03.2017 : опубл. 12.12.2017 / Сибирёв А. В., Аксенов А. Г., Колчин Н. Н., Пономарев А. Г. ; заявитель и патентообладатель ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. – 8 с. – URL: [https://viewer.rusneb.ru/ru/000224\\_000128\\_0002638190\\_20171212\\_C1\\_RU?page=1&rotate=0&theme=white](https://viewer.rusneb.ru/ru/000224_000128_0002638190_20171212_C1_RU?page=1&rotate=0&theme=white) (дата обращения: 18.12.2020). – Рез. англ.

26. Experiment on Poke Finger Wheel Type Potato Digger / J. Wu, H. Li, W. Sun [et al.]. – DOI 10.3969/j.issn.1000-1298.2010.12.016 // Transactions of the CSAE. – 2011. – Vol. 27, Issue 7. – Pp. 173–177.

27. Design and Experiment on Potato Digger of Disc Ce-Grate Type / L. R. Shi, J. M. Wu, W. Y. Zhao [et al.]. – Текст : непосредственный // Transactions of the CSAE. – 2012. – Vol. 28, Issue 24. – Pp. 15–21.

28. Experiment and Analysis of Potato-Soil Separation Based on Impact Recording Technology / Z. Weil, H. Li, Y. Mao [et al.] // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. – 2019. – Vol. 12, Issue 5. – Pp. 71–80. – URL: <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/4573> (дата обращения: 18.12.2020).

29. Impact of Soil Compaction on the Engineering Properties of Potato Tubers / M. K. Edriss, K. A. Al-Gaadi, A. A. Hassaballa [et al.] // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. – 2020. – Vol. 13, Issue 2. – Pp. 163–167. – URL: <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/4818/pdf> (дата обращения: 18.12.2020).

30. Advances in Machine Vision Applications for Automatic Inspection and Quality Evaluation of Fruits and Vegetables / S. Cubero, N. Aleixos, E. Moltó [et al.]. – DOI 10.1007/s11947-010-0411-8 // Food and Bioprocess Technology. – 2011. – Vol. 4. – Pp. 287–502.

*Поступила 20.12.2020; одобрена после рецензирования 25.01.2021; принята к публикации 07.02.2021*

*Об авторах:*

**Дорохов Алексей Семёнович**, заместитель директора по научно-организационной работе ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, Researcher ID: [H-4089-2018](https://orcid.org/0000-0002-4758-3843), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>, [dorokhov@rgau-msha.ru](mailto:dorokhov@rgau-msha.ru)

**Сибирёв Алексей Викторович**, старший научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат технических наук, Researcher ID: [M-6230-2016](https://orcid.org/0000-0002-9442-2276), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>, [sibirev2011@yandex.ru](mailto:sibirev2011@yandex.ru)

**Аксенов Александр Геннадьевич**, ведущий научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат технических наук, Researcher ID: [V-5572-2017](https://orcid.org/0000-0002-9546-7695), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9546-7695>, [1053vim@mail.ru](mailto:1053vim@mail.ru)

**Мосяков Максим Александрович**, старший научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат технических наук, Researcher ID: [A-8482-2019](https://orcid.org/0000-0002-5151-7312), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5151-7312>, [maks.mosyakov@yandex.ru](mailto:maks.mosyakov@yandex.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

А. С. Дорохов – формулирование основной концепции исследования.

А. В. Сибирёв – литературный и патентный анализ, подготовка начального варианта текста.

А. Г. Аксенов – критический анализ.

М. А. Мосяков – проведение экспериментов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Sibirev A.V., Aksenov A.G., Mosyakov M.A. Determining Design and Technological Parameters of the Separating Rod Conveyor with Assymetrical Shakers. *Vestnik FGOU VPO "Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina"* = Moscow Goryachkin Agroengineering University Bulletin. 2018; (4):15-20. Available at: <http://elib.timacad.ru/dl/full/vmgau-02-2018-04.pdf/download/vmgau-02-2018-04.pdf> (accessed 18.12.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
2. Asghar T., Ghafoor A., Munir A., et al. Design Modification and Field Testing of Groundnut Digger. *Asian Journal of Science and Technology*. 2014; 5(7):389-394. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/274373280\\_DESIGN\\_MODIFICATION\\_AND\\_FIELD\\_TESTING\\_OF\\_GROUNDNUT\\_DIGGER](https://www.researchgate.net/publication/274373280_DESIGN_MODIFICATION_AND_FIELD_TESTING_OF_GROUNDNUT_DIGGER) (accessed 18.12.2020). (In Eng.)
3. Akdemir B., Ulger P., Arin S. Mechanized Panting and Harvesting of Onion. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa & Latin America*. 1993; 24(4):23-26. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/289056030\\_Mechanized\\_panting\\_and\\_harvesting\\_of\\_onion](https://www.researchgate.net/publication/289056030_Mechanized_panting_and_harvesting_of_onion) (accessed 18.12.2020). (In Eng.)
4. Sibirev A.V., Aksenov A.G., Mosyakov M.A. Experimental Laboratory Research of Separation Intensity of Onion Set Heaps on Rod Elevator. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018; 13(23):10086-10091. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/329752893\\_Experimental\\_laboratory\\_research\\_of\\_separation\\_intensity\\_of\\_onion\\_set\\_heaps\\_on\\_rod\\_elevator](https://www.researchgate.net/publication/329752893_Experimental_laboratory_research_of_separation_intensity_of_onion_set_heaps_on_rod_elevator) (accessed 18.12.2020). (In Eng.)
5. Sibirev A.V., Aksenov A.G., Mosyakov M.A. The Results of the Experimental Study of Onions Separation Using a Rod Elevator with Asymmetric Installed Burners. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(1):91-107. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.091-107>
6. Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Aksenov A.G. The Results of Field Tests of an Onion Set Harvesting Machine Equipped with a Shaker Arrangement Asymmetrical Bar Elevator. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(1):133-148. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.133-148>
7. Pasaman B., Zakharchuk V. The Determination of the Parameters of a Ploughshare-Rotor Potato Digger. *ECONTECHMOD*. 2012; (2):43-47. Available at: <http://www.journals.pan.pl/dlibra/publication/98931/edition/85237/content> (accessed 18.12.2020). (In Eng.)
8. Abd El-Rahman M.M. Development and Performance Evaluation of a Simple Grading Machine Suitable for Onion Sets. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*. 2011; 2(2):213-226. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.21608/JSSAE.2011.55418>
9. Khura T., Mani I., Srivastava A. I C A R Design and Development of Tractor-Drawn Onion (Allium Cepa) Harvester. *Indian Journal of Agricultural Sciences*. 2011; 81(6):528-532. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/267251851\\_I\\_C\\_A\\_R\\_Design\\_and\\_development\\_of\\_tractor-drawn\\_onion\\_Allium\\_cepa\\_harvester](https://www.researchgate.net/publication/267251851_I_C_A_R_Design_and_development_of_tractor-drawn_onion_Allium_cepa_harvester) (accessed 18.12.2020). (In Eng.)
10. Indrāja D., Ajkhilesh J., Vishal P., et al. A Review Paper Based on Design and Development of an Onion Harvesting Machine. *Journal of Information and Computational Science*. 2019; 9(12):333-337. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/339201506> (accessed 18.12.2020). (In Eng.)
11. Bachche S. Deliberation on Design Strategies of Automatic Harvesting Systems: A Survey. *Robotics*. 2015; 4(2):194-222. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/robotics4020194>
12. Dai F., Zhao W., Sun W. Design and Experiment of Combined Operation Machine for Potato Harvesting and Plastic Film Pneumatic Auxiliary Collecting. *Transactions of the CSAM*. 2018; 49(3):104-113. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.009>
13. Li Z., Li P., Yang H., Wang Y. Stability Tests of Two-Finger Tomato Grasping for Harvesting Robots. *Biosystems Engineering*. 2013; 116(2):163-170. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.07.017>
14. Byshov N.V., Borychev S.N., Yakutin N.N., et al. On The Interaction of the Tuber Band with the Working Bodies of the Lifter. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva* = Bulletin of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev.

2018; (4):161-167. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36673758> (accessed 18.12.2020). (In Russ., abstract in Eng.)

15. Nesterovich E.O., Byshov N.V., Kostenko M.Yu., et al. Investigation of the Lemech Type Resistance with a Variable Tilt Angle. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva* = Bulletin of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev. 2018; (1):84-89. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35056434> (accessed 18.12.2020). (In Russ., abstract in Eng.)

16. Byshov N.V., Yakutin N.N., Koveshnikov R.Y., et al. Modernization of Digging Machine KST-1.4. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva* = Bulletin of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev. 2016; (2):75-78. Available at: [http://vestnik.rgatu.ru/archive/2016\\_2.pdf](http://vestnik.rgatu.ru/archive/2016_2.pdf) (accessed 18.12.2020). (In Russ., abstract in Eng.)

17. Bachche S., Oka K. Modeling and Performance Testing of End-Effector for Sweet Pepper Harvesting Robot. *Journal of Robotics and Mechatronics*. 2013; 25(4):705-717. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.20965/jrm.2013.p0705>

18. Yakutin N.N., Byshov N.V., Rembalovich G.K. Results of Experimental Research of Improved Potato Digger KTN-2V Harvesting Process. *Politematicheskiiy setevoj elektronnyiy nauchnyiy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University. 2014; (99):1052-1061. Available at: <https://clck.ru/WcriE> (accessed 18.12.2020). (In Russ., abstract in Eng.)

19. Kalinin A.B., Smelik V.A., Teplinskiy I.Z., Pervukhina O.N. Choice and Justification Parameters of Ecological State in the Agroecosystem for Monitoring Technology Process Growing Agricultural Crops. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of the St. Petersburg State Agrarian University. 2015; (39):315-319. Available at: <https://clck.ru/Wcs6y> (accessed 18.12.2020). (In Russ., abstract in Eng.)

20. Protasov A.A., Makarov S.A. Technology and Means of Mechanization for Two-Phase Harvesting of Seed Onion and Universal Harvesting Machines. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = Agrarian Scientific Journal. 2018; (10):59-62. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.v0i10.592>

21. Kumar D., Tripathi A. Performance Evaluation of Tractor Drawn Potato Digger Cum – Elevator. *International Journal of Agricultural Science and Research*. 2017; 7(2):433-448. Available at: <http://www.tjprc.org/publishpapers/2-50-1490605027-55.IJASRAPR201755.pdf> (accessed 18.12.2020). (In Eng.)

22. Massah J., Lotfi A., Arabhosseini A. Effect of Blade Angle and Speed of Onion Harvester on Mechanical Damage of Onion Bulbs. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa & Latin America*. 2012; 43(3):60-63. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/287778155\\_Effect\\_of\\_Blade\\_Angle\\_and\\_Speed\\_of\\_Onion\\_Harvester\\_on\\_Mechanical\\_Damage\\_of\\_Onion\\_Bulbs](https://www.researchgate.net/publication/287778155_Effect_of_Blade_Angle_and_Speed_of_Onion_Harvester_on_Mechanical_Damage_of_Onion_Bulbs) (accessed 18.12.2020). (In Eng.)

23. Jothi Shanmugam C., Senthilkumar G. Indigenous Development of Low Cost Harvesting Machine. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017; 12(5):4489-4490. Available at: [http://www.arnpjournals.org/jeas/research\\_papers/rp\\_2017/jeas\\_0817\\_6236.pdf](http://www.arnpjournals.org/jeas/research_papers/rp_2017/jeas_0817_6236.pdf) (accessed 18.12.2020). (In Eng.)

24. Mayer V., Vejchar D., Pastorková L. Measurement of Potato Tubers Resistance against Mechanical Loading. *Research in Agricultural Engineering*. 2008; 54(1):22-31. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17221/708-RAE>

25. Sibirev A.V., Aksenov A.G., Kolchin N.N., Ponomarev A.G. Separating Conveyor of Root and Tuber Crops Harvesting Machine. Patent 2,638,190 Russian Federation. 12 December 2017. 8 p. Available at: [https://viewer.rusneb.ru/ru/000224\\_000128\\_0002638190\\_20171212\\_C1\\_RU?page=1&rotate=0&theme=white](https://viewer.rusneb.ru/ru/000224_000128_0002638190_20171212_C1_RU?page=1&rotate=0&theme=white) (accessed 18.12.2020). (In Russ., abstract in Eng.)

26. Wu J., Li H., Sun W., et al. Experiment on Poke Finger Wheel Type Potato Digger. *Transactions of the CSAE*. 2011; 27(7):173-177. (In Chin.) DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1298.2010.12.016>

27. Shi L.R., Wu J.M., Zhao W.Y., et al. Design and Experiment on Potato Digger of Disc Ce-Grate Type. *Transactions of the CSAE*. 2012; 28(24):15-21. (In Eng.)

28. Weil Z., Li H., Mao Y., et al. Experiment and Analysis of Potato-Soil Separation Based on Impact Recording Technology. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2019; 12(5):71-80. Available at: <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/4573> (accessed 18.12.2020). (In Eng.)

29. Edrris M.K., Al-Gaadi K.A., Hassaballa A.A., et al. Impact of Soil Compaction on the Engineering Properties of Potato Tubers. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2020; 13(2):163-167. Available at: <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/4818/pdf> (accessed 18.12.2020). (In Eng.)

30. Cubero S., Aleixos N., Moltó E., et al. Advances in Machine Vision Applications for Automatic Inspection and Quality Evaluation of Fruits and Vegetables. *Food and Bioprocess Technology*. 2011; 4:287-502. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0411-8>

*Submitted 20.12.2020; approved after reviewing 25.01.2021; accepted for publication 07.02.2021*

*About the authors:*

**Aleksey S. Dorokhov**, Deputy Director on Scientific and Organizational Work, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), Corresponding Member of RAS, D.Sc. (Engr.), Professor, Researcher ID: H-4089-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>, [dorokhov@rgau-msha.ru](mailto:dorokhov@rgau-msha.ru)

**Alexey V. Sibirev**, Senior Researcher of the Department of Technology and Machines in Vegetable Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), Cand.Sc. (Engr.), Researcher ID: M-6230-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>, [sibirev2011@yandex.ru](mailto:sibirev2011@yandex.ru)

**Aleksandr G. Aksenov**, Leading Researcher of the Department of Technology and Machines in Vegetable Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), Cand.Sc. (Engr.), Researcher ID: V-5572-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9546-7695>, [1053vim@mail.ru](mailto:1053vim@mail.ru)

**Maxim A. Mosyakov**, Senior Researcher of the Department of Technology and Machines in Vegetable Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), Cand.Sc. (Engr.), Researcher ID: A-8482-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5151-7312>, [maks.mosyakov@yandex.ru](mailto:maks.mosyakov@yandex.ru)

*Contribution of the authors:*

A. S. Dorokhov – formulating the basic concept of the study.

A. V. Sibirev – literature and patent analysis, writing the draft.

A. G. Aksenov – critical analysis.

M. A. Mosyakov – experimentation.

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



## Исследование очесывающего аппарата устройства для уборки зерновых культур как колебательной системы

**В. Ю. Савин**

*Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана»*

*(г. Калуга, Российская Федерация)*

*savin.study@yandex.ru*

*Введение.* Потери зерна неочесом являются основной проблемой, которую необходимо решать при разработке устройств очесывающего типа. Для их снижения предложена конструкция очесывающего аппарата с виброприводом. Устройство совмещает процессы очеса зерновых культур и вибрационного воздействия гребенок на колос растений. Важнейшим этапом математического описания данных процессов является составление дифференциального уравнения движения гребенки.

*Материалы и методы.* Предложена расчетно-графическая схема колебательной системы с одной степенью свободы. Для составления дифференциального уравнения движения очесывающей гребенки использован метод, основанный на применении уравнения Лагранжа II рода. Колебания рассматриваемой системы возникают благодаря приведению в движение точки системы по заданному закону. Задача о кинематическом возбуждении сведена к задаче о силовом возмущении. Данный этап исследований проведен без учета сил сопротивления.

*Результаты исследования.* Получено уравнение движения гребенки, совершающей вибрационные возвратно-поступательные движения. Предложено в расчетной схеме выделить упругий элемент и получить более общий случай движения очесывающей гребенки. Движение гребенки в данном случае рассмотрено как сложное. Характерной особенностью математического описания является наличие обобщенной силы потенциальных сил. Получены дифференциальное уравнение движения гребенки при наличии упругого элемента и решение данного уравнения.

*Обсуждение и заключение.* Вынужденные колебания очесывающей гребенки будут являться гармоническими с постоянной амплитудой. Отмечено, что при близких значениях угловой частоты колебаний выходного звена вибропривода и корня из отношения коэффициента жесткости упругого элемента к массе гребенки имеет место случай резонанса. Параметры системы необходимо выбирать таким образом, чтобы избежать возникновения данного явления.

**Ключевые слова:** колебательная система, уборка зерновых, вибропривод, очесывающее устройство, очесывающий барабан, очесывающая гребенка

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Савин, В. Ю. Исследование очесывающего аппарата устройства для уборки зерновых культур как колебательной системы / В. Ю. Савин. – DOI 10.15507/2658-4123.031.202103.403-413 // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 3. – С. 403–413.



## Study of a Stripper Header for Grain Harvesting as a Vibrating System

V. Yu. Savin

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

*savin.study@yandex.ru*

*Introduction.* Grain losses caused by stripping defects are the main problem to be solved in designing a stripper header. To reduce these losses, a design of a stripper header with a vibration drive is proposed. This device combines the processes of stripping grain crops and the vibration effect of the stripping fingers upon the ears of plants. The most important stage of the mathematical description of these processes is composing the differential equation of the stripping fingers motion.

*Materials and Methods.* A computational-graphic diagram of an oscillatory system with one degree of freedom is proposed. To compose the differential equation of the stripping fingers motion, a method based on the application of the Lagrange equation was used. The oscillations of the system under studying arise from the motion of a point in the system according to a given law. The problem of kinematic excitation is reduced to the problem of force perturbation. This stage of the study was carried out without taking into account the resistance forces.

*Results.* An equation for motion of stripping fingers making vibrational reciprocating movements is obtained. It is proposed to select the elastic element in the design scheme and consider a more general case of the stripping fingers movement. In this case, the movement of the stripping fingers is considered to be difficult. A characteristic feature of the mathematical description is the presence of a generalized force of potential forces. The differential equation of motion of a comb in the presence of an elastic element and the solution of this equation are composed.

*Discussion and Conclusion.* Forced oscillations of a system without resistance, excited by a harmonic disturbing force, are harmonic oscillations with constant amplitude. On close values of the angular frequency of vibration of the drive output link and the root of the ratio of the stiffness coefficient of the elastic element to the stripping fingers mass, the case of resonance takes place. The system parameters must be selected so as to avoid this negative phenomenon.

**Keywords:** oscillating system, grain harvesting, vibration drive, stripping device, stripping cylinder, stripping fingers

**Conflict of interest:** The author declares no conflict of interest.

**For citation:** Savin V.Yu. Study of a Stripper Header for Grain Harvesting as a Vibrating System. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(3):403-413. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.403-413>

### Введение

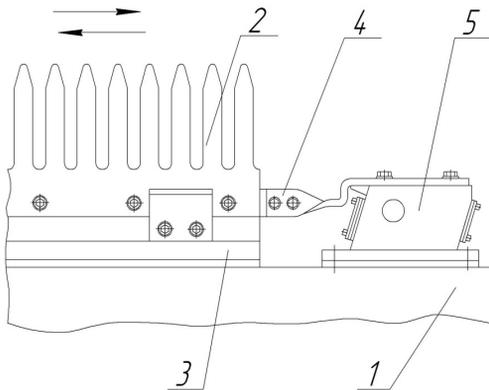
Одним из перспективных нетрадиционных способов уборки зерновых культур является уборка с использованием устройства, очесывающего растения на корню. Способ известен достаточно давно, но именно сейчас получает развитие. Жатки очесывающего типа к зерноуборочным комбайнам пока не

получили широкого распространения, но уже выпускаются серийно в России и за рубежом [1–3].

Пропускную способность комбайна ограничивают соломотряс и очистка. Уменьшение подачи соломы оптимизирует процессы сепарации и очистки и создает предпосылки для увеличения производительности зерноуборочного

комбайна [4]. Высокое содержание свободного зерна в очесанном ворохе дает предпосылки для создания перспективных малогабаритных прицепных очесывающих устройств для уборки зерновых [5; 6].

Основной проблемой, которую необходимо решать при разработке, являются потери зерна неочесом. Для снижения потерь мы предлагаем конструкцию очесывающего аппарата с виброприводами (рис. 1) [7].



Р и с. 1. Очесывающий аппарат с вибрационным возвратно-поступательным движением гребенок

Fig. 1. Stripping device with vibrating reciprocating motion of stripping fingers

Данное устройство совмещает очес зерновых культур и вибрационное воздействие гребенок на колос растений. Основными составляющими очесывающего аппарата являются барабан 1 с кронштейнами 3, гребенки 2, виброприводы 5. Кронштейны 4 соединяют гребенки, собранные на брусках, с виброприводами 5.

В процессе захвата растений и очеса колосьев гребенки в направляющих совершают вибрационные возвратно-поступательные движения с определенной частотой и амплитудой. Колебательные движения облегчают внедрение гребенок в стеблевой. Кроме того, колосья растений

воспринимают вибрационное воздействие гребенок, что способствует более полному выделению зерна из колоса.

Определение и оптимизация параметров рабочего процесса очеса зерновых культур предполагают создание математической модели процесса. Важнейшим этапом математического описания данного колебательного процесса является составление дифференциального уравнения движения гребенки.

Цель исследования – составление расчетной схемы и дифференциального уравнения движения очесывающей гребенки, совершающей вибрационные возвратно-поступательные движения.

### Обзор литературы

Прочность связи зерна с колосом неравномерна по длине колоса. Менее прочно связаны с колосом зерна, расположенные в средней части. Данные факторы обуславливают потери зерна неочесом при работе очесывающих устройств. В одной из работ приведены данные по общим потерям зерна и потерям неочесом при использовании адаптеров различной конструкции [8]. Так, после внедрения адаптера фирмы Shelbourne Reynolds потери зерна неочесом изменялись в диапазоне 0,32–0,97 %. При этом они возрастали пропорционально скорости комбайна. Потери неочесом на хлебах с полеглистостью 80 % достигали 3,15 %. Необходимо также отметить данные по потерям зерна в оборванных колосьях при работе адаптера конструкции ЦНИИМЭСХ, разработанного совместно с ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ». Указанные потери зерна изменялись в пределах 0,40–4,52 %.

В другой работе приведены результаты экспериментальных исследований при уборке овса и пшеницы методом очеса. При этом отмечено, что рабочая скорость комбайна при уборке овса

выше, чем при уборке пшеницы. Это зависит от более прочной связи зерна пшеницы с колосом. В то же время отмечена более прочная связь метелки овса со стеблем, чем колоса пшеницы с растением [9].

В результате анализа указанных исследований можно отметить важность снижения усилия очеса растений и улучшение процесса отделения зерен от колосьев. Это дает предпосылки не только для снижения потерь неочесом, но и для снижения потерь зерна в оборванных колосьях, так как основной причиной данного процесса остается превышение усилия отделения зерна над обрывом колоса. Использование очесывающего аппарата с виброприводами позволит снизить указанные потери.

Был произведен обзор литературных источников, посвященных использованию вибропроводов в промышленности, на путевых машинах. Кроме того, рассмотрены методики описания движения механических систем в рамках теории колебаний.

Рассмотрены конструктивные особенности и режимы работы вибрационных машин. Отмечено, что виброприводы современных транспортирующих механизмов и машин выдают прямолинейные гармонические колебания [10].

Основными рабочими органами путевых выправочно-подбивочно-рихтовочных машин являются подбивочные блоки. Подбойки подбивочных блоков внедряются в балласт и производят его обжатие. Подбойки колеблются с частотой 35 Гц. Это упрощает их внедрение в балласт и придает ему подвижность, необходимую для уплотнения [11]. Гидропривод машины обеспечивает вращение эксцентрикового вибровала, движение кривошипного механизма и, соответственно, вибрацию подбоек.

Анализируется проблема избыточного вибровоздействия, приводящего, в том числе, и к разрушению балласта [12].

Автор следующей статьи вводит понятие «время вибровоздействия» применительно к путевым машинам и балласту. Отмечено, что увеличение времени вибровоздействия является резервом повышения качества подбивки балласта. Отмечена зависимость величины передаваемой энергии от частоты вибрации. Значительно возрастает передаваемая на балласт энергия при переходе от частоты вибровоздействий в 45 Гц к частоте в 35 Гц [13].

Другая статья посвящена проблематике резания полимерных композиционных материалов. Такие материалы обладают специфической структурой, а также анизотропией свойств, значительно усложняющих их механическую обработку. Можно добиться значительного повышения качества обработки и снижения сил резания (до 80 %), используя комбинацию традиционного сверления и вибрационного воздействия на заготовку в ультразвуковом диапазоне. Одним из факторов, обеспечивающих указанные эффекты, является значительное улучшение процесса стружкообразования [14].

Аналогичный прием предложен для обработки глинозема. Указывается, что ротационная ультразвуковая обработка – один из наиболее эффективных методов для хрупких материалов. Также отмечены снижение силы резания и негативное влияние на процесс резания боковой вибрации. Предложена методика ее минимизации [15].

Положения рассмотренных выше работ [14; 15] позволяют предложить гипотезу о снижении сил очеса растений при использовании очесывающего аппарата с виброприводами.

Исследованы усилия очеса при использовании аппарата традиционной

конструкции [16]. Вопросы прочности связи зерна с колосом рассмотрены в другой работе [17]. Подтверждение или опровержение предложенной гипотезы в теоретической плоскости возможно только при подробном математическом описании колебательного процесса очеса.

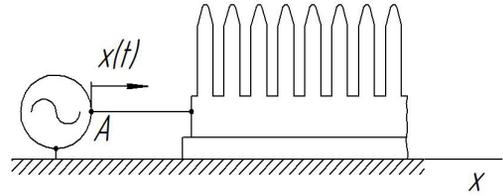
Авторы анализируют преимущества и конструктивные особенности бесшатунных механизмов преобразования движения. Составлена кинематическая схема, получены основные уравнения кинематики и динамики механизма, а также предложена методика определения степени влияния параметров системы на кинематические и динамические характеристики механизма. При этом отмечена необходимость уравновешивания сил инерции и их моментов [18].

Рассмотрены особенности математического описания колебательных процессов под действием внешних сил. Внимание уделено методологии определения и представления механической мощности и ее составляющих. Инерционная мощность отмечена как характерная для вибромашин. Проведена аналогия между механическими и электрическими составляющими мощности [19].

### Материалы и методы

Важнейшим этапом построения расчетной схемы является определение числа степеней свободы системы. Так как гребенка движется в направляющих, ограничивающих ее продольное перемещение, она работает только в поперечном направлении. Данная система может рассматриваться как имеющая одну степень свободы.

Предложенная расчетно-графическая схема колебательной системы представлена на рисунке 2. После выбора расчетной схемы составим уравнения движения системы.



Р и с. 2. Расчетно-графическая схема колебательной системы

F i g. 2. Calculation and graphic diagram of an vibrating system

Наиболее общим является метод, предполагающий использование уравнения Лагранжа II рода. Оно является дифференциальным уравнением второго порядка:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} = Q^{\text{П}} + Q^{\Phi} + Q^{\text{В}}, \quad (1)$$

где  $T$  – кинетическая энергия колебательной системы;  $x$  – обобщенная координата колебательной системы;  $Q^{\text{П}}$  – обобщенная сила потенциальных сил;  $Q^{\Phi}$  – обобщенная сила от действия сил сопротивления;  $Q^{\text{В}}$  – обобщенная сила от возмущающих сил.

Рассматриваемая система совершает вынужденные колебания. В данном случае они вызываются не заданными силами, а возникают благодаря приведению в движение по заданному закону точки системы, то есть точки на гребенке. Такое возбуждение будет являться кинематическим. При этом задачу о кинематическом возбуждении нетрудно свести к задаче о силовом возмущении. На данном этапе составления расчетной схемы пренебрегаем силами трения и силами сопротивления, связанными с воздействием на колос.

При составлении уравнения Лагранжа на первом этапе вычисляем кинетическую энергию системы.

### Результаты исследования

Запишем выражение для кинетической энергии гребенки:

$$T = \frac{mV^2}{2} = \frac{1}{2}m\dot{x}^2, \quad (2)$$

где  $m$  – масса гребенки,  $V$  – скорость гребенки.

Имеем:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} = m\dot{x}; \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0; \quad \frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} = m\ddot{x}.$$

Так как выходное звено вибратора совершает гармонические колебания, то

$$x = x_0 \sin(\omega t + \delta), \quad (3)$$

где  $\omega$  – угловая частота колебаний выходного звена вибропривода;  $\delta$  – начальная фаза колебаний.

В этом случае

$$m\ddot{x} = mx_0\omega^2 \sin(\omega t + \delta). \quad (4)$$

В данном уравнении роль обобщенной силы выполняет величина  $mx_0\omega^2 \sin(\omega t + \delta)$ .

Перепишем уравнение (4) в следующем виде:

$$m\ddot{x} = H \sin(\omega t + \delta), \quad (5)$$

где

$$H = mx_0\omega^2. \quad (6)$$

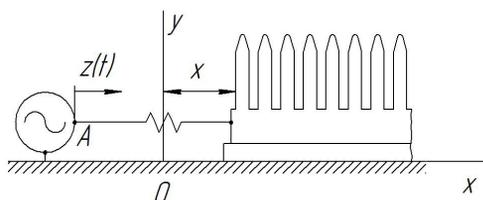
В уравнении (6)  $H$  – постоянная, характеризующая обобщенную силу и являющаяся ее амплитудой.

Как видно из уравнения (6), в нашем случае при кинематическом возбуждении заданием движения  $x = x_0 \sin(\omega t + \delta)$  гребенки  $H$  пропорционально  $\omega^2$ .

Уравнение (5) будет являться дифференциальным уравнением движения гребенки, совершающей вибрационные возвратно-поступательные движения.

Если рассматривать кронштейн 4 (рис. 1) как упругий элемент, уравнение

движения гребенки будет иным. Расчетно-графическая схема для данного случая представлена на рисунке 3. При составлении расчетной модели учтем силы сопротивления при движении гребенки и очесе зерновых культур.



Р и с. 3. Расчетно-графическая схема колебательной системы с упругим элементом  
F i g. 3. Calculation and graphic diagram of an vibrating system with an elastic element

Составим уравнение Лагранжа для гребенки относительно подвижной системы отсчета  $Oxy$ , начало которой движется вместе с точкой  $A$  так, что  $OA$  при движении остается постоянным.

В данном случае в уравнении (1) появляется обобщенная сила потенциальных сил  $Q^{\Pi}$ :

$$Q^{\Pi} = -\frac{\partial \Pi}{\partial x} = -cx, \quad (7)$$

где  $\Pi$  – потенциальная энергия системы;  $c$  – коэффициент жесткости упругого элемента.

Силу сопротивления запишем следующим образом:

$$Q^{\Phi} = -\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}} = -\mu\dot{x}, \quad (8)$$

где  $\Phi$  – обобщенная сила сил сопротивления при движении гребенки и очесе;  $\mu$  – коэффициент сопротивления.

Движение гребенки в данном случае будем рассматривать как сложное, состоящее из переносного вместе с точкой  $A$  и относительного по отношению к подвижной системе координат  $Oxy$ .

Кинетическая энергия гребенки в данном случае будет равна:

$$T = \frac{mV^2}{2} = m \frac{(\dot{x} + \dot{z})^2}{2}. \quad (9)$$

Для производных от кинетической энергии имеем:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} = m(\dot{x} + \dot{z});$$

$$\frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial T}{\partial \ddot{x}} = m(\ddot{x} + \ddot{z}).$$

Подставляя полученные выражения в уравнение (1), получим:

$$m(\ddot{x} + \ddot{z}) = -cx - \mu\dot{x}$$

или

$$m\ddot{x} + \mu\dot{x} + cx = -m\ddot{z}. \quad (10)$$

В данном уравнении роль обобщенной силы выполняет величина  $-mz$ .

С учетом (3) уравнение (10) примет вид:

$$m\ddot{x} + \mu\dot{x} + cx = mz_0\omega^2 \sin(\omega t + \delta). \quad (11)$$

Уравнение (11) и будет являться дифференциальным уравнением движения гребенки при наличии упругого элемента.

Выделим постоянную  $H$ , характеризующую обобщенную силу, по аналогии с уравнением (5):

$$H = mz_0\omega^2. \quad (12)$$

Здесь величина  $H$ , так же как и в уравнении (6), пропорциональна  $\omega^2$ .

Тогда

$$m\ddot{x} + \mu\dot{x} + cx = H \sin(\omega t + \delta). \quad (13)$$

Для приведения уравнения (13) к стандартному виду разделим обе

*Technologies and means of agricultural mechanization*

части на  $m$  и введем обозначения  $k = \frac{c}{m}$ ;

$$h = \frac{H}{m}; \quad n = \frac{\mu}{m}.$$

Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний в окончательной форме будет иметь следующий вид:

$$\ddot{x} + n\dot{x} + kx = h \sin(\omega t + \delta). \quad (14)$$

Для решения дифференциального уравнения (14) воспользуемся пакетом прикладных программ MATLAB.

Аналитическая запись решения будет иметь следующий вид:

$$x = C_1 e^{-0.5\left(\frac{n}{2}(n^2-4k)\right)^{0.5}} + C_2 e^{-0.5\left(\frac{n}{2}(n^2-4k)\right)^{0.5}} -$$

$$\frac{h e^{-0.5\left(\frac{n}{2}(n^2-4k)\right)^{0.5}} e^{0.5\left(\frac{n}{2}(n^2-4k)\right)^{0.5}} + \frac{nt}{2} U_1}{n^2(n^2-4k)^{0.5} - 4kn - 2k(n^2-4k)^{0.5} + 2\omega^2(n^2-4k)^{0.5} + n^3}$$

$$- \frac{h e^{-0.5\left(\frac{n}{2}(n^2-4k)\right)^{0.5}} e^{\frac{nt}{2} - 0.5\left(\frac{n}{2}(n^2-4k)\right)^{0.5}} U_2}{n^2(n^2-4k)^{0.5} + 4kn - 2k(n^2-4k)^{0.5} + 2\omega^2(n^2-4k)^{0.5} - n^3}, \quad (15)$$

где

$$U_1 = \sin(\omega t + \delta)(n^2 - 4k)^{0.5} -$$

$$- 2\omega \cos(\omega t + \delta) + n \sin(\omega t + \delta),$$

$$U_2 = \sin(\omega t + \delta)(n^2 - 4k)^{0.5} +$$

$$+ 2\omega \cos(\omega t + \delta) - n \sin(\omega t + \delta).$$

Вид кривой колебаний будет зависеть от соотношения  $k$  и  $\omega$ . При близких значениях  $\sqrt{k}$  и  $\omega$  имеет место случай резонанса, то есть совпадение частот собственных колебаний и возмущающей сил. Наличие сопротивления определяет следующую особенность протекания резонансных явлений: амплитуда колебаний остается постоянной, а не изменяется с течением времени.

Вынужденные колебания очесывающей гребенки при  $\sqrt{k} \neq \omega$  будут являться гармоническими колебаниями с постоянной амплитудой. Частота колебаний

гребенки будет совпадать с частотой возмущающей силы или, применительно к нашему случаю, с частотой колебания выходного звена вибропривода.

### Обсуждение и заключение

Предложена расчетная модель для описания движения гребенок очесывающего аппарата с виброприводом. Получено уравнение движения гребенки, совершающей вибрационные возвратно-поступательные движения.

Предложено в расчетной схеме выделить упругий элемент и получить более общий случай движения очесывающей гребенки и, соответственно, более общее математическое описание данного движения. Движение гребенки в данном случае рассмотрено как сложное. Характерной особенностью математического описания является наличие обобщенной силы

потенциальных сил и обобщенной силы от действия сил сопротивления. Получено дифференциальное уравнение движения гребенки при наличии упругого элемента, а также решение данного уравнения.

При отсутствии резонансных явлений вынужденные колебания очесывающей гребенки будут являться гармоническими с постоянной амплитудой и частотой, равной частоте колебания выходного звена вибропривода.

Отмечено, что при близких значениях  $\sqrt{k}$  и  $\omega$  имеет место случай резонанса, то есть возрастание амплитуды до величин, несоизмерных с амплитудой синусоидальной силы, вызывающей само колебание системы. Параметры системы необходимо выбирать таким образом, чтобы избежать этого негативного, в данном случае, явления.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Алдошин, Н. В.** Совершенствование конструкции очесывающих устройств для уборки зернобобовых культур / Н. В. Алдошин, М. А. Мосяков. – DOI [10.26897/1728-7936-2018-2-23-27](https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-23-27) // Вестник ФГБОУ ВО «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горькина». – 2018. – № 2. – С. 23–27. – Рез. англ.
2. **Ковлягин, Ф. В.** Уборка зерновых культур методом очеса / Ф. В. Ковлягин, Г. Г. Маслов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1991. – № 8. – С. 5–6. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26520095> (дата обращения: 04.02.2021).
3. **Савин, В. Ю.** Очесывающие устройства для уборки зерновых / В. Ю. Савин, И. В. Горбачев // Сельский механизатор. – 2019. – № 3. – С. 8–10. – URL: [http://selmech.msk.ru/319.html#\\_Очесывающие\\_устройства\\_для](http://selmech.msk.ru/319.html#_Очесывающие_устройства_для) (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.
4. Review of Grain Threshing Theory and Technology / J. Fu, Z. Chen, L. Han, L. Ren. – DOI [10.25165/j.ijabe.20181103.3432](https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181103.3432) // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. – 2018. – Vol. 11, Issue 3. – Pp. 12–20.
5. **Жалнин, Э. В.** Уборка с очесом на корню: за и против / Э. В. Жалнин // Сельский механизатор. – 2013. – № 8. – С. 10–12. – URL: [http://selmech.msk.ru/813.html#\\_Уборка\\_с\\_очесом](http://selmech.msk.ru/813.html#_Уборка_с_очесом) (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.
6. **Савин, В. Ю.** Определение состава очесанного вороха при уборке пшеницы с использованием прицепного очесывающего устройства / В. Ю. Савин. – DOI [10.17238/issn2071-2243.2016.4.96](https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2016.4.96) // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2016. – № 4 (51). – С. 96–99. – Рез. англ.
7. Патент № 2726110 Российская Федерация, МПК А01D 41/08, А01F 12/00. Очесывающий аппарат : № 2019117319 : заявл. 04.06.2019 : опубл. 09.07.2020 / Савин В. Ю. ; заявитель и патентообладатель Савин В. Ю. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2726110C1\\_20200709](https://yandex.ru/patents/doc/RU2726110C1_20200709) (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.
8. Сравнительная оценка очесывающих адаптеров различных конструкций / Э. В. Жалнин, А. Т. Табашников, В. А. Анисимов [и др.] // Научно-технический бюллетень Всероссийского

научно-исследовательского института механизации сельского хозяйства. – 1992. – № 83. – С. 21–24. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25438516> (дата обращения: 04.02.2021).

9. Уборка зерновых культур методом очеса / П. А. Шабанов, А. Н. Шокарев, И. К. Голубев [и др.]. – Текст : непосредственный // Техника в сельском хозяйстве. – 1985. – № 8. – С. 12.

10. Конструктивные особенности вибрационных транспортно-технологических машин / А. А. Дерябин, Д. Ю. Проскура, А. И. Федорова, С. Д. Угрюмова // Научные труды Дальрыбвтуза. – 2014. – Т. 32. – С. 117–121. – URL: [https://nauch-tr.dalrybvvtuz.ru/images/Issues/32/32\\_16.pdf](https://nauch-tr.dalrybvvtuz.ru/images/Issues/32/32_16.pdf) (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

11. **Шурлаков, М. А.** Проведение исследований в области создания новых антифрикционных материалов в узлах трения тяжелых путевых машин / М. А. Шурлаков, С. И. Баташов // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2019. – № 14. – С. 115–122. – URL: <https://elib.pstu.ru/vufind/EdsRecord/edselr,edselr.38558378> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

12. Experimental and Theoretical Evaluation of Side Tamping Method for Ballasted Railway Track Maintenance / M. Przybylowicz, M. Sysyn, V. Kovalchuk [et al.]. – DOI 10.21307/tp-2020-036 // Transport Problems. – 2020. – Vol. 15, Issue 3. – Pp. 93–106.

13. **Маслов, Н. А.** Модернизация привода спутника путевых машин Duomatic 09-32 CSM и ПМА-1 / Н. А. Маслов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 1 (40). – С. 57–65. – URL: <https://elib.pstu.ru/EdsRecord/edselr,edselr.28351862> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

14. **Дударев, А. С.** Эффективность вибрационного сверления полимерных композиционных материалов / А. С. Дударев, А. Г. Добринский. – DOI 10.15593/2224-9877/2019.4.05 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – № 4 (21). – С. 42–48. – Рез. англ.

15. **Alkhalefah, H.** Precise Drilling of Holes in Alumina Ceramic (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) by Rotary Ultrasonic Drilling and Its Parameter Optimization Using MOGA-II / H. Alkhalefah. – DOI 10.3390/ma13051059. – Текст : электронный // Materials. – 2020. – Vol. 13, Issue 5.

16. **Савин, В. Ю.** Определение усилий, необходимых для очеса колоса пшеницы / В. Ю. Савин. – DOI 10.15507/2658-4123.029.201903.456-466 // Инженерные технологии и системы. – 2019. – № 3. – С. 456–466. – Рез. англ.

17. **Липовский, М. И.** Обоснование рационального двухфазного обмолота зерновых культур / М. И. Липовский // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2004. – № 76. – С. 25–38. – URL: <https://clck.ru/Wdv3W> (дата обращения: 04.02.2021).

18. **Хоанг, К. Л.** Кинематика и динамика бесшатунных механизмов преобразования движения / К. Л. Хоанг, А. Ф. Дорохов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2015. – № 3. – С. 79–87. – URL: <https://clck.ru/WdvCq> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

19. **Попов, И. П.** Диссипативная, реактивная и полная мощности виброприводов машин / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2019. – № 3 (5). – С. 72–74. – URL: <https://vestnik.vogu35.ru/docs/2019/tekhnich/3/72.pdf> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

*Поступила 06.02.2021; одобрена после рецензирования 10.03.2021; принята к публикации 20.03.2021*

*Об авторе:*

**Савин Владимир Юрьевич**, доцент кафедры тепловых двигателей и гидромашин Калужского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана» (248000, Российская Федерация, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2), кандидат технических наук, Researcher ID: D-4378-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2476-9768>, savin.study@yandex.ru

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Aldoshin N.V., Mosyakov M.A. Improving the Design of a Combing Device for Harvesting Leguminous Crops. *Vestnik FGOU VPO "Moskovskiy gosudarstvennyiy agroinzhenernyiy universitet imeni V.P. Goryachkina"* = Goryachkin Moscow State Agroengineering University Bulletin. 2018; (2):23-27. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-23-27>
2. Kovliagin F.V., Maslov G.G. Harvesting of Grain Crops by Combing. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva* = Mechanization and Electrification of Agriculture. 1991; (8):5-6. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26520095> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
3. Savin V.Yu., Gorbachov I.V. Grain Cleaning Devices. *Selskiy Mekhanizator* = Rural Mechanic. 2019; (3):8-10. Available at: [http://selmech.msk.ru/319.html#\\_Очесывающие\\_устройства\\_для](http://selmech.msk.ru/319.html#_Очесывающие_устройства_для) (accessed 04.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
4. Fu J., Chen Z., Han L., Ren L. Review of Grain Threshing Theory and Technology. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018; 11(3):12-20. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181103.3432>
5. Zhalnin E.V. Cleaning with a Comb on the Roots: Pros and Cons. *Selskiy Mechanizator* = Country Mechanic. 2013; (8):10-12. Available at: [http://selmech.msk.ru/813.html#\\_Уборка\\_с\\_очесом](http://selmech.msk.ru/813.html#_Уборка_с_очесом) (accessed 04.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
6. Savin V.Yu. Determination of Composition of Threshed Heap at Harvesting Wheat Using the Trail-Type Rippler. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Voronezh State Agrarian University Bulletin. 2016; (4):96-99. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2016.4.96>
7. Savin V.Yu. Combing Device. Patent 2,726,110 Russian Federation. 2020 July 09. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2726110C1\\_20200709](https://yandex.ru/patents/doc/RU2726110C1_20200709) (accessed 04.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
8. Zhalnin E.V., Tabashnikov A.T., Anisimov V.A., et al. [Comparative Evaluation of Stripping Adapters of Various Designs]. *Nauchno-tekhnicheskiiy byulleten Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii selskogo khozyaystva* = Scientific and Technical Bulletin of the All-Russian Research Institute of Agricultural Mechanization. 1992; (83):21-24. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25438516> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
9. Shabanov P.A., Shokarev A.N., Golubev I.K., et al. [Harvesting Crops by Combing Method]. *Tekhnika v selskom khozyaystve* = Machinery in Agriculture. 1985; (8):12. (In Russ.)
10. Deryabin A.A., Proskura D.Y., Fedorova A.L., Ugryumova S.D. Design Features of Vibration Transportation and Technological Machines. *Nauchnye trudy Dalrybvvtuza* = Scientific Proceedings of the Far Eastern Fisheries Higher Technical Educational Institution. 2014; 32:117-121. Available at: [https://nauch-tr.dalrybvvtuz.ru/images/Issues/32/32\\_16.pdf](https://nauch-tr.dalrybvvtuz.ru/images/Issues/32/32_16.pdf) (accessed 04.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
11. Shurlakov M.A., Batashov S.I. Conducting Research in the Field of Creating New Friction Materials. *Vnedrenie sovremennykh konstruksiy i peredovykh tekhnologiy v putevoe khozyaystvo* = Introduction of Modern Designs and Advanced Technologies in Track Facilities. 2019; (14):115-122. Available at: <https://elib.pstu.ru/vufind/EdsRecord/edselr,edselr.38558378> (accessed 04.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
12. Przybylowicz M., Sysyn M., Kovalchuk V., et al. Experimental and Theoretical Evaluation of Side Tamping Method for Ballasted Railway Track Maintenance. *Transport Problems*. 2020; 15(3):93-106. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.21307/tp-2020-036>
13. Maslov N.A. Modernization of the Satellite's Drive of Duomatic 09-32 CSM and PMA-1 Liner-Tamper-Surfacers. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* = Bulletin of the Siberian State University of Railways. 2017; (1):57-65. Available at: <https://elib.pstu.ru/EdsRecord/edselr,edselr.28351862> (accessed 04.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
14. Dudarev A.S., Dobrinsky A.G. Efficiency of Vibration Drilling Polymer Composite Materials. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroyeniye, materialovedeniye* = Bulletin PNRPU. Mechanical Engineering, Materials Science. 2019; (4):42-48. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2019.4.05>



15. Alkhalefah H. Precise Drilling of Holes in Alumina Ceramic (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) by Rotary Ultrasonic Drilling and Its Parameter Optimization Using MOGA-II. *Materials*. 2020; 13(5). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13051059>

16. Savin V.Yu. Determination of the Force Required for Stripping the Wheat Ear. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):456-466. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.456-466>

17. Lipovsky M.I. Justification of Rational Two-Phase Threshing of Grain Crops. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanized Crop and Livestock Production. 2004; (76):25-38. Available at: <https://clck.ru/Wdv3W> (accessed 04.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

18. Khoang K.L., Dorokhov A.F. Kinematics and Dynamics of Conrod-Free Mechanisms of Transformation of Motion. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* = Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies. 2015; (3):79-87. Available at: <https://clck.ru/WdvCq> (accessed 04.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

19. Popov I.P. Dissipative, Reactive and Full Capacity of Machine Vibric Drives. *Vestnik Vologodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* = Bulletin of the Vologda State University. Series: Technical Sciences. 2019; (3):72-74. Available at: <https://vestnik.vogu35.ru/docs/2019/tekhnich/3/72.pdf> (accessed 04.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

*Received 06.02.2021; approved after reviewing 10.03.2021; accepted for publication 20.03.2021*

*About the author:*

**Vladimir Yu. Savin**, Associate Professor of the Chair of Heat Engines and Hydromachines, Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University (2 Bazhenov St., Kaluga 248000, Russian Federation), Cand.Sc. (Engr.), Researcher ID: D-4378-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2476-9768>, [savin.study@yandex.ru](mailto:savin.study@yandex.ru)

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



## Исследование погружения зерна потоком в жидкость различной плотности методами планирования эксперимента

А. В. Сайтов<sup>1,2</sup>, В. А. Сысуев<sup>1</sup>, В. Е. Сайтов<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого»  
(г. Киров, Российская Федерация)

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (г. Киров, Российская Федерация)

\*[vicsait-valita@e-kirov.ru](mailto:vicsait-valita@e-kirov.ru)

**Введение.** В зерновом ворохе ржи кроме зерна могут содержаться ядовитые склероции спорыньи. Современные зерноочистительные машины не обеспечивают выделение склероциев спорыньи за один технологический процесс из-за схожести физических свойств по линейным размерам. Выделение склероциев спорыньи из зерна ржи за один технологический процесс по плотности возможно с применением водных растворов неорганических солей. Цель исследования – определение эффективной высоты расположения загрузочного бункера относительно поверхности жидкости. Эти данные повысят качество технологического процесса разрабатываемой машины.

**Материалы и методы.** Рассматривается подача зерна ржи потоком из выпускного отверстия загрузочного бункера в жидкость с помощью варьирования удельной зерновой нагрузки, плотности жидкости и высоты подачи. Для постановки опытов реализована методика планирования эксперимента. Обработка опытных данных осуществлена с помощью статистического пакета Statgraphics Plus 5.1.

**Результаты исследования.** Проведена оценка эффективной высоты расположения выпускного отверстия загрузочного бункера относительно поверхности жидкости при подаче зернового материала потоком. Получены регрессионные модели для доли зерен, непотонувших и всплывших с пузырьками воздуха на поверхность жидкости.

**Обсуждение и заключение.** Установлено, что на показатели доли зерен, непотонувших и всплывших с пузырьками воздуха на поверхность жидкости, существенное влияние оказывает плотность водного раствора соли. Наименьшие значения при разных плотности жидкости и удельной зерновой нагрузке достигаются при высоте подачи зерна  $56,0 \cdot 10^{-3}$  м.

**Ключевые слова:** зерно озимой ржи, склероции спорыньи, метод планирования эксперимента, водный раствор соли, поверхностное натяжение жидкости, дисперсионный анализ

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

**Для цитирования:** Сайтов, А. В. Исследование погружения зерна потоком в жидкость различной плотности методами планирования эксперимента / А. В. Сайтов, В. А. Сысуев, В. Е. Сайтов. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202103.414-429](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.414-429) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 3. – С. 414–429.

© Сайтов А. В., Сысуев В. А., Сайтов В. Е., 2021



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

## Studying Grain Flow Immersion into Liquids of Various Densities Based on the Methods of Experiment Design

A. V. Saitov<sup>a,b</sup>, V. A. Sysuev<sup>a</sup>, V. E. Saitov<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>Federal Agricultural Research Center of the North-East Named after N. V. Rudnitsky (Kirov, Russian Federation)

<sup>b</sup>Vyatka State Agricultural Academy (Kirov, Russian Federation)

\*vicsait-valita@e-kirov.ru

**Introduction.** In addition to grain, a grain heap of rye may contain poisonous *ergot sclerotia*. Modern grain cleaning machines do not isolate *ergot sclerotia* in one technological process because of the similarity of physical properties in linear dimensions. Isolation of *ergot sclerotia* from rye grain in one technological process is possible through the use of aqueous solutions of inorganic salts. The purpose of the study is to determine the optimum elevation of the loading hopper relative to the liquid surface. The data obtained contribute to increasing the quality of the technological process of the machine being developed.

**Materials and Methods.** The paper considers the delivery of rye grain flow from the loading hopper outlet into the liquid by varying the specific grain load, liquid density and the delivery height. To set up the experiments, the experiment design methods have been used. The experimental data have been processed using the statistical package Statgraphics Plus 5.1.

**Results.** The estimation of the effective elevation of the loading hopper outlet relative to the liquid surface when delivering grain flow has been carried out. There have been obtained regression models for the fraction of grains, which did not submerge and rose up to the liquid surface with air bubbles.

**Discussion and Conclusion.** It has been found that the density of the aqueous salt solution has a significant effect on the percentage of grains, which did not submerge and rose up to the liquid surface with air bubbles. The smallest values of at different density of the liquid and specific grain load are achieved at a grain delivery height  $56.0 \cdot 10^{-3}$  m.

**Keywords:** grain of winter rye, ergot sclerotia, experimental design method, aqueous salt solution, liquid surface tension, analysis of variance

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

**For citation:** Saitov A.V., Sysuev V.A., Saitov V.E. Studying Grain Flow Immersion into Liquids of Various Densities Based on the Methods of Experiment Design. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(3):414-429. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.414-429>

### Введение

Посевы озимой ржи в период цветения заражаются спорами спорыньи. При созревании колосьев в них вместо зерен образуются склероции гриба *Claviceps purpurea tul.* (спорынья), которые ядовиты [1; 2]. При попадании с продуктами питания в организм человека или животного они вызывают ряд заболеваний [3–5].

При уборке урожая ржи современными зерноуборочными комбайнами

в зерновом материале могут содержаться ядовитые склероции из-за несовершенства системы очистки комбайна [6–8]. Большинство склероциев имеют такой же цвет, линейные размеры и парусность, что и зерно ржи. Их коэффициент внутреннего скольжения также сопоставим [9–12].

Поэтому для отделения *Claviceps purpurea tul.* требуется многократный пропуск зернового материала через очистительные механизмы

зерноочистительного пункта [13–16]. Это обстоятельство значительно повышает затратность технологического процесса очистки зерна от примесей [17–19]. Совершенствование конструкции машин не решает данную проблему [20–23].

В то же время склерозии имеют меньшую плотность по сравнению с полновесным зерном ржи. Данное отличие позволяет разделять их по этому критерию. Можно использовать способ выделения примесей в водном растворе неорганической соли, что поможет отделить склерозии от зерна за один технологический процесс [23]. Затраты на него незначительны по сравнению с работой зерноочистительных машин. Для отделения *Claviceps purpurea tul.* в водном растворе предложено устройство, для привода которого требуется электродвигатель небольшой мощности [24].

Для отделения ядовитых склероциев гриба необходимо определить высоту расположения выпускного отверстия загрузочного бункера  $h$  относительно поверхности жидкости различной плотности  $\rho_{\text{ж}}$ . Цель исследования – найти данные параметры.

### Обзор литературы

Результаты экспериментальных исследований по падению тела в жидкость приводятся в работах ряда ученых<sup>1</sup> [25–28]. Отмечается, что при погружении тела в жидкость происходит захват и увлечение за собой пузырька воздуха. Отрываясь от тела, пузырек воздуха всплывает на поверхность жидкости, при этом образуется кумулятивный эффект в виде всплеска столбика воды.

Процессы, происходящие при погружении в воду стального шарика диаметром  $10 \cdot 10^{-3}$  м, совпадающего по линейному размеру длины с большинством зерновок ржи, представлены в работе В. В. Майера<sup>2</sup>. В результате погружения процесс, описанный выше, повторяется.

Очевидно, что захват пузырька воздуха зерновкой очищаемого материала и образование при этом кумулятивного эффекта будет ухудшать отделение ядовитых склероциев и увеличивать потери зерна.

Рассматривается падение отдельных зерен ржи, пшеницы, ячменя и овса, подверженных заражению ядовитой спорыньей, в жидкость различной плотности. Обосновано, что высота установки загрузочного бункера для преодоления поверхностного натяжения жидкости всеми зерновками должна составлять  $57,1 \cdot 10^{-3}$  м [29; 30].

Представлены результаты практических опытов по бросанию единичных зерен озимой ржи сорта «Фаленская 4» в жидкость плотностью 1 000, 1 090 и 1 150 кг/м<sup>3</sup>. Установлено, что стопроцентное погружение зерен в воду происходит при высоте не менее  $43 \cdot 10^{-3}$  м, а в водный раствор соли –  $58 \cdot 10^{-3}$  м [31].

Однако при разработке устройства нужно учесть, что движение зерна будет происходить потоком, и исключить появление нежелательного захвата пузырька воздуха зерновкой, который будет ухудшать результаты отделения примесей от зерна и увеличивать потери зерна.

<sup>1</sup> Григолюк Э. И., Горшков А. Г. Взаимодействие упругих конструкций с жидкостью (удар и погружение). Л.: Судостроение, 1978. 200 с.; Shibue T., Ito A., Nakayama E. Structural Response Analysis of Cylinders under Water Impact // Proceedings of the International Conference “Hydroelasticity in Marine Technology”. Trondheim, 1994. Pp. 221–228. URL: <https://www.tib.eu/en/search/id/BLCP:CN005619750/Structural-response-analysis-of-cylinders-under?cHash=1cb62d3b58e5ff39bc8e9d11ebee3c52> (дата обращения: 10.04.2021).

<sup>2</sup> Майер В. В. Кумулятивный эффект в простых опытах. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 192 с.

### Материалы и методы

Определение эффективной высоты расположения выпускного отверстия загрузочного бункера при погружении потоком зерна озимой ржи сорта «Фаленская 4» осуществлялось на экспериментальной установке, представленной на рисунке 1.

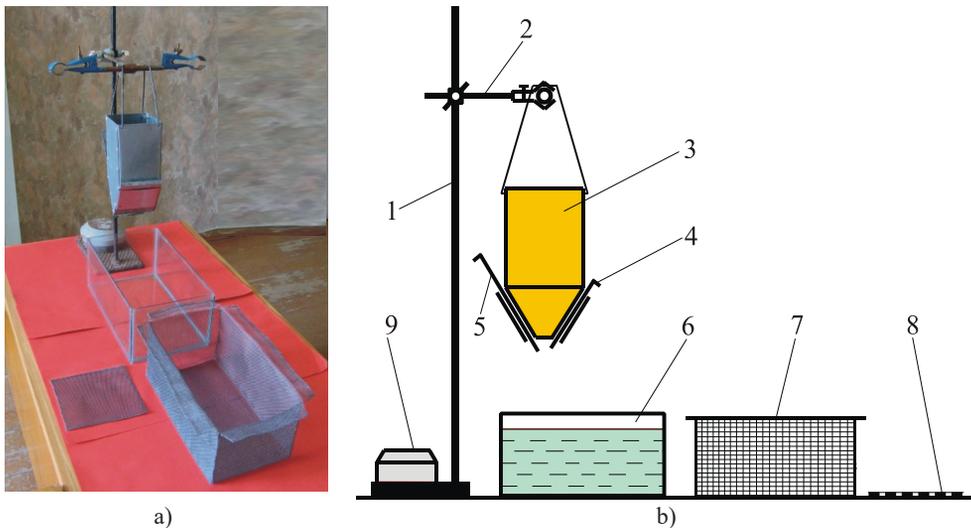
Экспериментальная установка для исследования состояла из лабораторного штатива 1, бункера 3 (патент № 2631556), ванны 6, сетки 8 для съема плавающих на поверхности раствора зерен и сита 7 для отделения зерен от раствора соли [32]. Лабораторный штатив оснащен противовесом 9 для придания устойчивости. На вертикальную стойку при помощи муфты с зажимными винтами закрепляется держатель 2, подвешивается бункер 3.

Процесс погружения зерна потоком в водный раствор соли заключается в следующем. Зерновой материал из бункера 3 подается потоком в ванну 6

с жидкостью различной плотности, в которой предварительно размещено сито 7. При поступлении материала в жидкость зерна, имеющие большую плотность, чем водный раствор соли, опускаются на дно ванны 6, а зерна с меньшей плотностью всплывают на поверхность раствора соли.

При варьировании  $h$  и удельной зерновой нагрузки  $g_{уд}$ , которое осуществляется открытием выпускного окна загрузочного бункера с помощью заслонки 4, потонувшие зерна могут всплывать на поверхность жидкости различной плотности с захваченными пузырьками воздуха. Зерна, оказавшиеся на поверхности, снимаются сеткой 8 для подсчета количества потонувших и всплывших зерен.

Зерно процеживается от водного раствора соли с помощью сита 7 из ванны 6 и раскладывается на просушку. Процесс может повторяться.



Р и с. 1. Экспериментальная установка для исследования погружения зерна потоком в жидкость различной плотности: а) общий вид установки; б) схема установки; 1 – лабораторный штатив; 2 – держатель; 3 – бункер; 4 – регулировочная заслонка; 5 – скатная плоскость; 6 – ванна; 7 – сито; 8 – сетка; 9 – противовес

Fig. 1. Experimental setup for studying the immersion of grain flow into liquid of different density: а) general view of the setup; б) scheme of the setup; 1 – laboratory stand; 2 – holder; 3 – bunker; 4 – adjusting flap; 5 – pitched plane; 6 – bath; 7 – sieve; 8 – mesh; 9 – counterweight

Отношение непотонувших и всплывших с пузырьками воздуха зерен к числу брошенных зерен определяется по формуле (%):

$$P_3 = \frac{n_2}{n_1} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $n_1$  – количество зерен, поступающих в жидкость различной  $\rho_{ж}$ , 10 000 шт.;  $n_2$  – количество зерен, оказавшихся на поверхности жидкости различной  $\rho_{ж}$ , шт.

При определении эффективной высоты  $h$  использовался метод планирования эксперимента [30]. В результате реализации плана эксперимента получены регрессионные модели. Для исключения гипотезы о случайной природе значения коэффициентов уравнения проводилось сравнение расчетного  $P$ -уровня значимости с принятым уровнем значимости, равным 0,05. Также осуществлялось сопоставление расчетных значений  $F$ -статистики ( $F_{расч}$ ) коэффициентов уравнения с табличным значением  $F$ -критерия Фишера ( $F_{табл}$ ) для уровня значимости  $\alpha = 0,05$  при числе степеней свободы  $k_1 = m$ ,  $k_2 = n - m - 1$  ( $n$  – число проведенных опытов,  $m$  – количество факторов)<sup>3</sup>. Оценку полученной адекватной математической модели рабочего процесса поточного погружения зерна производили с помощью сравнения фактических значений с расчетными скорректированным коэффициентом множественной детерминации  $R^2_c$  ( $R$ -squared (adjusted for d.f.)). Точность регрессионной модели определялась через стандартную ошибку оценки (Standard error of est.) и среднюю абсолютную ошибку (Mean absolute error).

Для автокорреляции между опытными данными использовался критерий Durbin – Watson statistic ( $DW$ ) и остаточная автокорреляция (Lag 1 residual autocorrelation). Изучение полученной адекватной регрессионной модели осуществлялось с помощью трехмерных графиков поверхности отклика, созданных в CorelDRAW 12<sup>4</sup> [30].

### Результаты исследования

Для оценки эффективной высоты расположения выпускного отверстия загрузочного бункера  $h$  относительно поверхности жидкости при погружении зерна ржи потоком в воду ( $\rho_{ж} = 1\,000$  кг/м<sup>3</sup>) и водный раствор соли (NaCl) ( $\rho_{ж} = 1\,090$  кг/м<sup>3</sup>) и варьировании удельной зерновой нагрузки  $g_{уд}$  были предварительно проведены однофакторные опыты на экспериментальной установке (рис. 1).

Доказано, что с увеличением  $g_{уд}$  при любом фиксированном значении  $h$  доля зерен, непотонувших и всплывших на поверхность воды  $P_{31000}$  и водного раствора соли  $P_{31090}$ , возрастает. При этом между исследуемыми параметрами существует нелинейная связь, а поверхность отклика  $P_{31090}$  несет такую же информацию, что и поверхность отклика  $P_{31000}$ . Однако значения  $P_{31090}$  возрастают на порядок, вследствие повышения коэффициента поверхностного натяжения водного раствора соли, по сравнению с водой, для преодоления которой зерновому потоку требуется большая высота подачи  $h$ . Минимальные значения  $P_{31000}$  и  $P_{31090}$  фиксируются в области  $h = (40,0 \dots 80,0) \cdot 10^{-3}$  м при любой  $g_{уд}$  [30].

Для определения оптимальных параметров  $h$ ,  $g_{уд}$  и  $\rho_{ж}$  применен почти

<sup>3</sup> Шанченко Н. И. Лекции по эконометрике. Ульяновск: УлГТУ, 2008. 139 с.

<sup>4</sup> STATGRAPHICS Plus 5.1 [Электронный ресурс]. URL: <https://statgraphics-plus.updatestar.com/> (дата обращения: 21.04.2020); Сысцев В. А. Энергосберегающие машины и оборудование для кормоприготовления: исследования методами планирования эксперимента. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 1999. 294 с.

ротатабельный план Бокса – Бенкина второго порядка<sup>5</sup>. Кодированные обозначения исследуемых факторов представлены в таблице. Уровни факторов и их интервалы варьирования выбраны, исходя из предварительных исследований.

После обработки опытных данных с помощью статистического пакета Statgraphics Plus 5.1, полученных в результате реализации матрицы планирования эксперимента, создана регрессионная модель для доли зерен  $P_3$  (Var\_1), непотонувших и всплывших на поверхность водного раствора соли<sup>6</sup>:

$$P_3 = 3,1 + 0,363x_1 + 0,688x_2 + 2,9x_3 - 0,875x_1x_2 + 0,1x_1x_3 + 0,25x_2x_3 + 1,163x_1^2 + 1,363x_2^2 + 0,038x_3^2. \quad (2)$$

Однако в полученной регрессионной модели (2)  $F_{\text{расч}}$  четырех коэффициентов регрессии при  $x_1$ (A),  $x_1x_3$ (AC),  $x_2x_3$ (BC),  $x_3x_3$ (CC) составляет 2,41, 0,09, 0,57, 0,01 соответственно.  $F_{\text{расч}}$  этих ко-

эффициентов регрессии меньше  $F_{\text{табл}}$ , который для уровня значимости 0,05 и числа степеней свободы  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 11$  составляет 3,59 ( $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$ ). Статистическая незначимость данных четырех коэффициентов регрессии также подтверждается тем, что их  $P$ -уровень значимости ( $P$ -Value) больше принятого уровня значимости ( $P_{x_1(A)} = 0,1814 > 0,05$ ;  $P_{x_1x_3(AC)} = 0,7743 > 0,05$ ;  $P_{x_2x_3(BC)} = 0,4833 > 0,05$  и  $P_{x_3x_3(CC)} = 0,9174 > 0,05$ ).

Графическая интерпретация значимости коэффициентов регрессии выражения (2), в сравнении с табличным значением  $t$ -критерия Стьюдента ( $t_{\text{табл}}$ ), приведена также на рисунке 2а.

На графике нанесена вертикальная линия, которая при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и числе степеней свободы  $n = 5$  соответствует  $t_{\text{табл}}$ , равному 2,57. Расчетные значения  $t$ -статистики только пяти коэффициентов регрессии при  $x_3$ (C),  $x_2$ (B),  $x_2x_2$ (BB),  $x_1x_1$ (AA) и  $x_1x_2$ (AB) больше табличного значения  $t$ -критерия Стьюдента ( $t_{\text{расч}} > t_{\text{табл}}$ ).

Т а б л и ц а

T a b l e

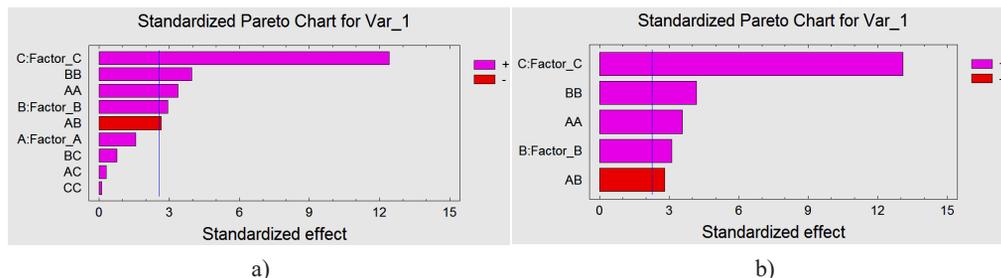
**Исследуемые факторы, их обозначения, единицы измерения, уровни и интервалы варьирования**

**The investigated factors, their designations, units of measurement, levels and intervals of variation**

Исследуемый фактор / The investigated factor	Обозначение / Designation	Единица измерения / Unit	Кодированное обозначение / Coded designation	Уровни / Levels			Интервал / Interval
				-1	0	+1	
Высота расположения загрузочного бункера / Elevation of the loading hopper	$h$	$10^{-3}$ м / $10^{-3}$ m	$x_1$ (Factor_A)	20,000	80,000	140,000	60,000
Удельная зерновая нагрузка / Specific grain load	$g_{\text{уд}}$	кг/(с·м) / kg/(s·m)	$x_2$ (Factor_B)	0,674	3,948	7,221	3,274
Плотность жидкости / Density of liquid	$\rho_{\text{ж}}$	$10^3$ кг/м <sup>3</sup> / $10^3$ kg/m <sup>3</sup>	$x_3$ (Factor_C)	1,000	1,090	1,180	0,090

<sup>5</sup> Там же.

<sup>6</sup> STATGRAPHICS Plus 5.1; Шанченко Н. И. Лекции по эконометрике.



Р и с. 2. Статистическая значимость коэффициентов регрессии исследуемого критерия оптимизации  $P_3$  (Var\_1) в сравнении с табличным значением  $t$ -критерия Стьюдента: а) до исключения незначимых коэффициентов регрессии; б) после исключения незначимых коэффициентов регрессии

Fig. 2. The statistical significance of the regression coefficients of the investigated criterion for the optimization  $P_3$  (Var\_1) in comparison with the tabular value of the Student's  $t$ -test: a) until the exclusion of insignificant regression coefficients; b) after excluding insignificant regression coefficients

Это подтверждает статистическую значимость данных коэффициентов модели регрессии (2).

Тогда, в результате исключения незначимых коэффициентов регрессии из выражения (2) математическая модель рабочего процесса погружения зерна потоком в водный раствор соли описывается следующим уравнением:

$$P_3 = 3,123 + 0,688x_2 + 2,9x_3 - 0,875x_1x_2 + 1,159x_1^2 + 1,359x_2^2. \quad (3)$$

В полученной регрессионной модели (3)  $F_{\text{расч}}$  всех коэффициентов регрессии ( $F$ -Ratio = 7,81–171,59) больше значения  $F_{\text{табл}}$ , который для уровня значимости 0,05 и числа степеней свободы ( $k_1 = 3$ ;  $k_2 = 11$ ) составляет 3,59 ( $F_{\text{расч}} > F_{\text{табл}}$ ). Статистическая значимость данных пяти коэффициентов регрессии также подтверждается тем, что их  $P$ -уровень ( $P$ -Value), имеющий значения 0,00001–0,02090, меньше принятого ( $P$ -Value < 0,05). Графическая интерпретация значимости коэффициентов регрессии, в сравнении с табличным значением  $t$ -критерия Стьюдента, приведена на рисунке 2б. На графике  $t_{\text{табл}}$  для уровня значимо-

сти  $\alpha = 0,05$  и числа степеней свободы  $n = 9$  составляет 2,26 (вертикальная линия). Расчетные значения  $t$ -статистики всех коэффициентов регрессии больше табличного значения  $t$ -критерия Стьюдента ( $t_{\text{расч}} > t_{\text{табл}}$ ). Поэтому гипотеза о случайной природе значений коэффициентов регрессии исключается.

Из полученного уравнения (3) следует, что на показатели  $P_3$ , по сравнению с  $g_{\text{уд}}(x_2)$  и  $h(x_1)$ , оказывает влияние  $\rho_{\text{ж}}(x_3)$ . Достоверность полученной регрессионной модели выражается малыми отклонениями фактических значений от расчетных  $|P_3 - \bar{P}_3|$ , составляющих по модулю 0,0230–1,0798 %. Скорректированный коэффициент множественной детерминации  $R^2_c$  показывает, что 93,8 % изменения функции  $P_3 = f(h, g_{\text{уд}}, \rho_{\text{ж}})$  объясняется вариацией ее переменных  $h, g_{\text{уд}}$  и  $\rho_{\text{ж}}$ . Остальные 6,2 % изменения функции  $P_3 = f(h, g_{\text{уд}}, \rho_{\text{ж}})$  объясняются факторами, не учтенными в принятой модели. Полученную регрессионную модель можно считать достаточно качественной. Стандартная ошибка оценки модели регрессии показывает стандартное отклонение остатков, которые составляют незначительную величину 0,626, что говорит о точности регрессионной модели. Средняя абсолютная ошибка,

характеризующая величину, на которую теоретические значения, рассчитанные по модели, в среднем отклоняются от фактических, имеет малое значение, равное 0,340. Это также свидетельствует о высокой точности полученной регрессионной модели. Показатель  $DW$  составляет 2,588. Признаков последовательной автокорреляции между опытными данными нет, поскольку  $P$ -значение, равное 0,0832, больше 0,05. Это подтверждает остаточная автокорреляция 0,295, близкая к нулю. Следовательно, полученная регрессионная модель (3) адекватно описывает реальный процесс, а потому значима и способна характеризовать  $P_3$  на поверхности жидкости различной  $\rho_{ж}$  при поточном погружении в результате варьирования значений  $h$ ,  $g_{уд}$  и  $\rho_{ж}$ .

Для анализа адекватной регрессионной модели (3) использована объемная графика поверхности отклика при фиксировании на нулевом уровне факторов  $x_1(h)$ ,  $x_2(g_{уд})$  и  $x_3(\rho_{ж})$ . Поверхности отклика представлены на рисунке 3.

При фиксировании фактора  $x_3(\rho_{ж} = 1\ 090\ \text{кг/м}^3)$  на нулевом уровне поверхность отклика (рис. 3а) показывает, что при  $h = 20,0 \cdot 10^{-3}\ \text{м}$  ( $x_1 = -1$ ) доля  $P_3$  при наименьшей  $g_{уд} = 0,674\ \text{кг/(с·м)}$  ( $x_2 = -1$ ) составляет 4,079 %, а с повышением  $g_{уд}$  значение  $P_3$  увеличивается и при  $g_{уд} = 7,221\ \text{кг/(с·м)}$  ( $x_2 = 1$ ) равно 7,205 %. Это обусловлено тем, что значительное количество зерен не может преодолеть силу поверхностного натяжения жидкости с такой высоты.

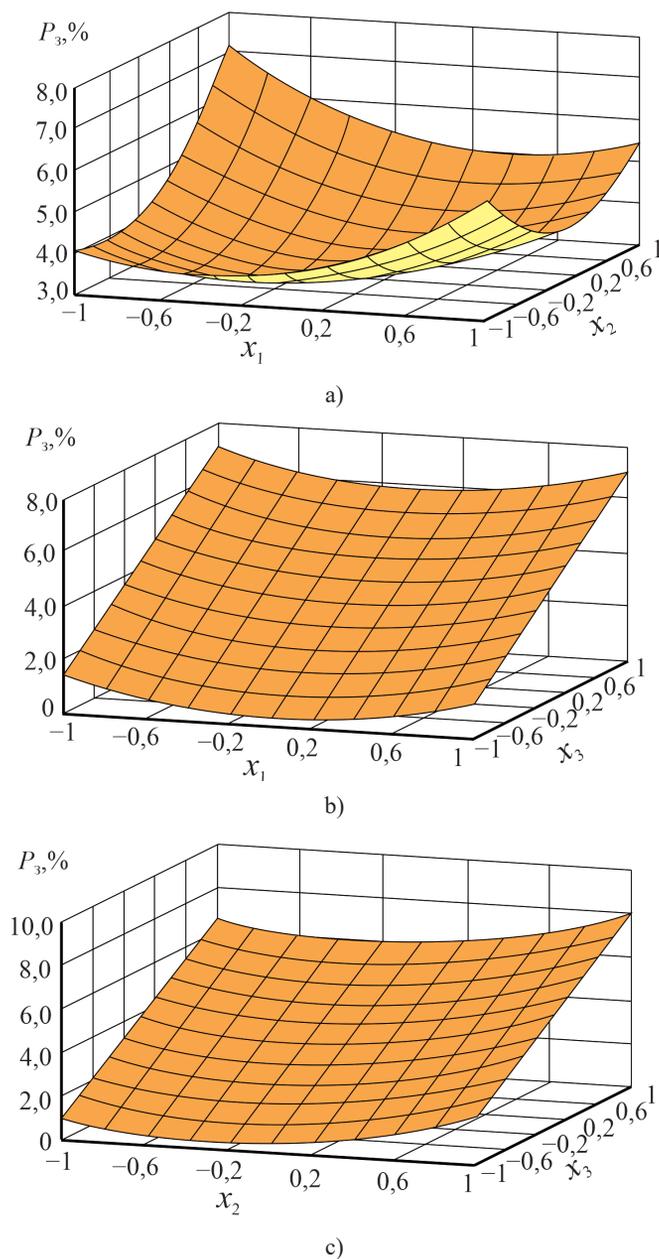
Повышение  $h$  ( $x_1$ ) вызывает возрастание критерия  $P_3$ , который при  $h = 140,0 \cdot 10^{-3}\ \text{м}$  ( $x_1 = 1$ ) и  $g_{уд} = 0,674\ \text{кг/(с·м)}$  ( $x_2 = -1$ ) составляет 5,829 %, а при данной высоте  $h$  и  $g_{уд} = 7,221\ \text{кг/(с·м)}$  ( $x_2 = 1$ ) равен 5,460 %. Это обусловлено захватом зернами пузырьков воздуха, группированием в комочки и активным всплытием на поверхность раствора.

Область минимальных значений  $P_3$  наблюдается при  $h =$

$(44,0-80,0) \cdot 10^{-3}\ \text{м}$  ( $x_1 = -0,6 \dots 0,2$ ) и  $g_{уд} = 0,674-3,412\ \text{кг/(с·м)}$  ( $x_2 = -1 \dots -0,2$ ), которые составляют 3,051–3,388 %. Причем при  $h = 56,0 \cdot 10^{-3}\ \text{м}$  ( $x_1 = -0,4$ ) и  $g_{уд} = 1,359-3,412\ \text{кг/(с·м)}$  ( $x_2 = -0,4 \dots -0,6$ ) фиксируются минимальные значения  $P_3$ , которые составляют 3,111 и 3,176 % соответственно, что обуславливается исключением захвата пузырьков воздуха зернами.

При фиксировании на нулевом уровне фактора  $x_2$  ( $g_{уд} = 3,948\ \text{кг/(с·м)}$ ) поверхность отклика функции  $P_3 = f(h, \rho_{ж})$  (рис. 3б) показывает, что при любом значении  $h$  ( $x_1$ ) с увеличением  $\rho_{ж}$  ( $x_3$ ) значения  $P_3$  возрастают. При этом значения анализируемой переменной  $P_3$  в угловых точках  $x_1 = -1$  ( $h = 20,0 \cdot 10^{-3}\ \text{м}$ ) и  $x_3 = -1$  ( $\rho_{ж} = 1\ 090\ \text{кг/м}^3$ ), а также  $x_1 = 1$  ( $h = 140,0 \cdot 10^{-3}\ \text{м}$ ) и  $x_3 = -1$  ( $\rho_{ж} = 1\ 090\ \text{кг/м}^3$ ) составляют 1,383 %. При показателях  $x_1 = -1$  ( $h = 20,0 \cdot 10^{-3}\ \text{м}$ ) и  $x_3 = 1$  ( $\rho_{ж} = 1\ 180\ \text{кг/м}^3$ ), а также  $x_1 = 1$  ( $h = 140,0 \cdot 10^{-3}\ \text{м}$ ) и  $x_3 = 1$  ( $\rho_{ж} = 1\ 180\ \text{кг/м}^3$ ) значение  $P_3$  равно 7,183 %. При этом наименьшие показатели  $P_3$  фиксируются в области варьирования  $h$ , равной  $(56,0 \dots 92,0) \cdot 10^{-3}\ \text{м}$  ( $x_1 = -0,4 \dots 0,2$ ), которые при  $\rho_{ж} = 1\ 000\ \text{кг/м}^3$  ( $x_3 = -1$ ) составляют 0,409–0,269 % соответственно, а при увеличении плотности  $\rho_{ж}$  ( $x_3$ ) жидкости показатели  $P_3$  имеют меньшие значения по сравнению с его угловыми точками. Это связано с тем, что зерна не могут преодолеть силу поверхностного натяжения жидкости при  $h$  ( $x_1$ ) менее  $56,0 \cdot 10^{-3}\ \text{м}$ . При  $h$  ( $x_1$ ) более  $92,0 \cdot 10^{-3}\ \text{м}$  происходит захват зернами пузырьков воздуха и всплытие их на поверхность раствора.

Поверхность отклика для функции  $P_3 = f(g_{уд}, \rho_{ж})$  (рис. 3с), полученная при фиксировании фактора  $x_1$  ( $h = 80,0 \cdot 10^{-3}\ \text{м}$ ) на нулевом уровне, несет идентичную информацию, что и поверхность отклика количества  $P_3 = f(h, \rho_{ж})$  (рис. 3б) при фиксировании на нулевом уровне



Р и с. 3. Поверхности отклика, характеризующие долю  $P_3$  (Var\_1) зерен, непотонувших и всплывших на поверхность воды и водного раствора соли:

а) при  $x_1 (h) = 0$ ; б) при  $x_2 (g_{yd}) = 0$ ; в) при  $x_3 (\rho_{ж}) = 0$

Fig. 3. Response surfaces characterizing the fraction  $P_3$  (Var\_1) of grains, which did not submerge and rose to the liquid surface of water and aqueous salt solution:

a) at  $x_1 (h) = 0$ ; b) at  $x_2 (g_{yd}) = 0$ ; c) at  $x_3 (\rho_{ж}) = 0$

фактора  $x_2$  ( $g_{уд} = 3,948$  кг/(с·м)). При этом с повышением  $g_{уд}$  ( $x_2$ ) и  $\rho_{ж}$  ( $x_3$ ) значения  $P_3$  возрастают. Так, при  $x_2 = -1$  ( $g_{уд} = 0,674$  кг/(с·м)) и  $x_3 = -1$  ( $\rho_{ж} = 1\,000$  кг/м<sup>3</sup>) значение  $P_3$  составляет 0,895 %, а с повышением  $\rho_{ж}$  возрастает, и при  $x_3 = 1$  ( $\rho_{ж} = 1\,180$  кг/м<sup>3</sup>)  $P_3 = 6,695$  %. Для  $x_2 = 1$  ( $g_{уд} = 7,221$  кг/(с·м)) и  $x_3 = -1$  ( $\rho_{ж} = 1\,000$  кг/м<sup>3</sup>) значение  $P_3$  уже составляет 2,270 %, а при  $x_3 = 1$  ( $\rho_{ж} = 1\,180$  кг/м<sup>3</sup>)  $P_3 = 8,070$  %. Наименьшие показатели  $P_3$  с увеличением  $\rho_{ж}$  фиксируются в области варьирования  $g_{уд}$  ( $x_2$ ) = 0,674–3,412 кг/(с·м) ( $x_2 = -1 \dots -0,2$ ), которая при  $\rho_{ж} = 1\,000$  кг/м<sup>3</sup> ( $x_2 = -1$ ) составляют 0,895–0,140 % соответственно, а при  $\rho_{ж} = 1\,180$  кг/м<sup>3</sup> ( $x_2 = -0,2$ ) равна 6,695–5,940 % соответственно. Повышение доли  $P_3$  на поверхности жидкости с увеличением  $g_{уд}$  ( $x_2$ ) связано с тем, что ядро более плотного зернового потока, создавая каверну, увлекает за собой воздушный пузырь, который затем всплывает на поверхность жидкости, увлекая за собой часть зерна. Повышение  $\rho_{ж}$  также вызывает увеличение значения  $P_3$ .

### Обсуждение и заключение

Таким образом, из результатов проведенных исследований погружения зерна озимой ржи сорта «Фаленская 4» потоком в жидкость различной плотности  $\rho_{ж}$ , следует, что на показатели  $P_3$ , по сравнению с  $g_{уд}$  ( $x_2$ ) и  $h$  ( $x_1$ ), существенное влияние оказывает  $\rho_{ж}$  ( $x_3$ ). С увеличением  $\rho_{ж}$  ( $x_3$ ) значения  $P_3$  возрастают. При этом наименьшие значения доли  $P_3$  зерен, непотонувших и всплывших на поверхность воды и водного раствора соли с пузырьками воздуха, при разных  $\rho_{ж}$  и  $g_{уд}$  достигаются при высоте подачи зерна  $h = 56,0 \cdot 10^{-3}$  м, что согласуется с теоретическими исследованиями [30; 31]. При этом значении  $h$  не происходит нежелательный захват пузырьков воздуха зернами при поточном погружении в жидкость. Это определяет повышение качества технологического процесса разрабатываемой машины. С точки зрения конструкционной целесообразности при разработке машины необходимо принять высоту расположения выпускного отверстия загрузочного бункера  $h$  над поверхностью водного раствора соли  $60,0 \cdot 10^{-3}$  м.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Щеклеина, Л. М. Проблема спорыньи злаков (*Claviceps purpurea* (fr.) tul.): история и современность (обзор) / Л. М. Щеклеина, Т. К. Шешегова. – DOI [10.25750/1995-4301-2013-1-005-012](https://doi.org/10.25750/1995-4301-2013-1-005-012) // Теоретическая и прикладная экология. – 2013. – № 1. – С. 5–12. – Рез. англ.
2. Шешегова, Т. К. Иммунологическая характеристика сортов озимой ржи / Т. К. Шешегова, Л. М. Щеклеина, Е. И. Уткина. – DOI [10.30766/2072-9081.2018.65.4.30-35](https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.65.4.30-35) // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2018. – Т. 65, № 4. – С. 30–35. – Рез. англ.
3. Щеклеина, Л. М. Вредоносность спорыньи на новых сортах озимой ржи в Кировской области / Л. М. Щеклеина, Т. К. Шешегова. – DOI [10.30914/2411-9687-2018-4-2-83-89](https://doi.org/10.30914/2411-9687-2018-4-2-83-89) // Вестник Марийского государственного университета. – 2018. – Т. 4, № 2. – С. 83–90. – Рез. англ.
4. Щеклеина, Л. М. Влияние погодных факторов на отдельные периоды развития гриба *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul и уровень вредоносности спорыньи в Кировской области / Л. М. Щеклеина. – DOI [10.30766/2072-9081.2019.20.2.134-143](https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.2.134-143) // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2019. – Т. 20, № 2. – С. 134–143. – Рез. англ.
5. Устойчивость сортов ржи к спорынье и содержание эргоалкалоидов в склероциях *Claviceps purpurea* в условиях Кировской области / Т. К. Шешегова, Л. М. Щеклеина,

В. П. Желифонова [и др.]. – DOI [10.1134/S0026364819030127](https://doi.org/10.1134/S0026364819030127) // Микология и фитотерапия. – 2019. – Т. 53, № 3. – С. 177–182. – Рез. англ.

6. Seed Refinement in the Harvesting and Post-Harvesting Process / V. I. Orobinsky, A. M. Gievsky, I. V. Baskhakov, A. V. Chernyshov. – DOI [10.2991/agrosmart-18.2018.163](https://doi.org/10.2991/agrosmart-18.2018.163) // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “AgroSMART – Smart Solutions For Agriculture” (AgroSMART 2018). – 2018. – Pp. 870–874.

7. **Aldoshin, N.** Harvesting Lupinus Albus Axial Rotary Combine Harvester / N. Aldoshin, O. Didmanidze. – DOI [10.17221/107/2017-RAE](https://doi.org/10.17221/107/2017-RAE) // Research in Agricultural Engineering. – 2018. – Vol. 64, Issue 4. – Pp. 209–214.

8. Work Improvement of Air-and-Screen Cleaner of Combine Harvester / N. Aldoshin, O. Didmanidze, N. Lysin, M. Mosyakov. – DOI [10.22616/ERDev2019.18.N110](https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N110) // Proceedings of 18<sup>th</sup> International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (22–24 May 2019). – Jelgava, 2019. – Pp. 100–104.

9. **Волхонов, М. С.** Анализ состояния предварительной очистки зерна в хозяйствах Северо-Западного региона Российской Федерации и перспективы совершенствования / М. С. Волхонов, И. Б. Зимин, Ю. Н. Островский. – DOI [10.12737/2073-0462-2020-82-86](https://doi.org/10.12737/2073-0462-2020-82-86) // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2020. – Т. 15, № 2 (58). – С. 82–86. – Рез. англ.

10. Параметры и режимы очистки семян на вибропневматическом сепараторе усовершенствованной конструкции / В. Д. Галкин, А. Д. Галкин, В. А. Хандриков [и др.]. – DOI [10.24411/2307-2873-2020-10012](https://doi.org/10.24411/2307-2873-2020-10012) // Пермский аграрный вестник. – 2020. – № 1 (29). – С. 4–12. – Рез. англ.

11. Increase of Seed Cleaning Efficiency by Better Use of Air Stream Properties / V. E. Saitov, P. Savinych, W. Golka, J. Kamionka. – DOI [10.14654/ir.2015.155.139](https://doi.org/10.14654/ir.2015.155.139) // Agricultural Engineering. – 2015. – Issue 3. – Pp. 89–99.

12. Mathematical Modeling of the Grain Material Separation in the Pneumatic System of the Grain-Cleaning Machine / I. Badretdinov, S. Mudarisov, M. Tuktarov [et al.]. – DOI [10.5937/jaes17-22640](https://doi.org/10.5937/jaes17-22640) // Journal of Applied Engineering Science. – 2019. – Vol. 17, Issue 4. – Pp. 529–534.

13. Improving the Mechanization of High-Quality Seed Production / V. I. Orobinsky, A. P. Tarasenko, A. M. Gievsky [et al.]. – DOI [10.2991/agrosmart-18.2018.159](https://doi.org/10.2991/agrosmart-18.2018.159) // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “AgroSMART – Smart Solutions For Agriculture” (AgroSMART 2018). – 2018. – Pp. 849–852.

14. **Гиевский, А. М.** Пути повышения производительности универсальных зерноочистительных машин / А. М. Гиевский, В. А. Гулевский, В. И. Оробинский. – DOI [10.26897/1728-7936-2018-3-12-16](https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-3-12-16) // Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2018. – № 3 (85). – С. 12–16. – Рез. англ.

15. **Saitov, V. E.** Assessing the Adequacy of Mathematical Models of Light Impurity Fractionation in Sedimentary Chambers of Grain Cleaning Machines / V. E. Saitov, R. F. Kurbanov, A. N. Suvorov. – DOI [10.1016/j.proeng.2016.06.728](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.728) // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – Pp. 107–110.

16. Development and Theoretical Studies of Grain Cleaning Machine for Fractional Technology of Flattening Forage Grain / P. Savinyh, Y. Sychugov, V. Kazakov, S. Ivanovs. – DOI [10.22616/ERDev2018.17.N156](https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N156) // Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (23–25 May 2018). – Jelgava, 2018. – Pp. 124–130.

17. Substantiation of Basic Scheme of Grain Cleaning Machine for Preparation of Agricultural Crops Seeds / A. M. Giyevskiy, V. I. Orobinsky, A. P. Tarasenko [et al.]. – DOI [10.1088/1757-899X/327/4/042035](https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042035). – Текст : электронный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 327, Issue 4.

18. Research of a Diametrical Fan with Suction Channel / V. E. Saitov, V. G. Farafonov, R. G. Gataulin, A. V. Saitov. – DOI [10.1088/1757-899X/327/4/042035](https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042035). – Текст : электронный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 473.

19. **Ермольев, Ю. И.** Моделирование процесса сепарации измельченного соломистого вороха в пневмосепараторе с тремя пневмоканалами / Ю. И. Ермольев, А. А. Дорошенко, С. В. Белов. – DOI [10.12737/19691](https://doi.org/10.12737/19691) // Вестник Донского государственного технического университета. – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 59–68. – Рез. англ.
20. Исследование эффективности очистки вороха яровой пшеницы для семенных целей с помощью воздушно-ситового сепаратора / В. И. Орбинский, А. М. Гиевский, А. П. Тарасенко [и др.]. – DOI [10.17238/issn2071-2243.2019.2.34](https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2019.2.34) // Вестник Донского государственного технического университета. – 2019. – Т. 12, № 2. – С. 34–42.
21. Studying the Design and Operational Parameters of the Sieve Module of the Grain Cleaning Machine / M. K. Kharitonov, A. M. Gievsky, V. I. Orobinsky. – DOI [10.1088/1755-1315/488/1/012021](https://doi.org/10.1088/1755-1315/488/1/012021). – Текст : электронный // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 488.
22. **Astanakulov, K. D.** Design of a Grain Cleaning Machine for Small Farms / K. D. Astanakulov, Y. Z. Karimov, G. Fozilov // Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. – 2011. – Vol. 42, Issue 4. – С. 37–40. – URL: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20123047308> (дата обращения: 10.04.2021).
23. **Saitov, V. E.** Experimental Substantiation of the Effective Height of a Grain Falling by a Stream of Liquid in an Ergot Release Device / V. E. Saitov, V. G. Farafonov, A. V. Saitov. – DOI [10.1088/1755-1315/341/1/012123](https://doi.org/10.1088/1755-1315/341/1/012123). – Текст : электронный // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 341.
24. Патент № 2689470 Российская Федерация, МПК В03В 5/48, В02В 1/04. Машина для отделения спорыньи от семян ржи : № 2018136461/03 : заявл. 15.10.2018 : опубл. 28.05.2019 / Сайтов А. В., Гатауллин Р. Г., Сайтов В. Е. ; заявитель и патентообладатель Сайтов А. В. – 12 с. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2689470C1\\_20190528](https://yandex.ru/patents/doc/RU2689470C1_20190528) (дата обращения: 10.04.2021). – Рез. англ.
25. **Архипов, В. А.** Образование вторичных капель при ударном взаимодействии капли с поверхностью жидкости / В. А. Архипов, В. Ф. Трофимов // Прикладная механика и техническая физика. – 2005. – Т. 46, № 1. – С. 55–62. – URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/90c/90cb0d4f0081d8015dacf0baf07ff566.pdf> (дата обращения: 10.04.2021).
26. **Комаров, А. А.** Падение тела в резервуар с жидкостью и расчет возникающих при этом динамических нагрузок / А. А. Комаров, В. В. Казеннов. – DOI [10.22227/1997-0935.2014.5.135-143](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2014.5.135-143) // Вестник МГСУ. – 2014. – № 5. – С. 135–143. – Рез. англ.
27. **Scolan, Y.-M.** Energy Distribution from Vertical Impact of a Three-Dimensional Solid Body onto the Flat Free Surface of an Ideal Fluid / Y.-M. Scolan, A. A. Korobkin. – DOI [10.1016/S0889-9746\(02\)00118-4](https://doi.org/10.1016/S0889-9746(02)00118-4) // Journal of Fluids and Structures. – 2003. – Vol. 17, Issue 2. – Pp. 275–286.
28. **Scolan, Y.-M.** Mixed Boundary Value Problem in Potential Theory: Application to the Hydrodynamic Impact (Wagner) Problem / Y.-M. Scolan, A. A. Korobkin. – DOI [10.1016/j.crme.2012.09.006](https://doi.org/10.1016/j.crme.2012.09.006) // Comptes Rendus Mécanique. – 2012. – Vol. 340, Issue 10. – Pp. 702–705.
29. Theoretical Background of Calculation of the Parameters of the Device for Grain Cleaning from Ergot Sclerotia / V. A. Sysuev, V. E. Saitov, V. G. Farafonov [et al.]. – DOI [10.3103/S1068367417030156](https://doi.org/10.3103/S1068367417030156) // Russian Agricultural Sciences. – 2017. – Vol. 43, Issue 3. – Pp. 273–276.
30. **Сайтов, В. Е.** Теоретическое обоснование высоты расположения выхода загрузочного бункера в машине выделения вредных примесей мокрым способом / В. Е. Сайтов, В. Г. Фарафонов, А. В. Сайтов. – DOI [10.15507/2658-4123.030.202003.355-376](https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.355-376) // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 3. – С. 355–376. – Рез. англ.
31. **Saitov, A. V.** The Relative Frequency of Immersion of Rye Grains in Liquid / A. V. Saitov, V. G. Farafonov, V. E. Saitov. – DOI [10.1088/1755-1315/723/2/022078](https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/2/022078). – Текст : электронный // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 723.
32. Патент № 2631556 Российская Федерация, МПК В65D 88/26. Бункер для сыпучих материалов : № 2016140581 : заявл. 14.10.2016 : опубл. 25.09.2017 / Сайтов В. Е., Фарафонов В. Г.,

Суворов А. Н., Сайтов А. В. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Вятская госуд. с.-х. академия». – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2631556C1\\_20170925](https://yandex.ru/patents/doc/RU2631556C1_20170925) (дата обращения: 10.04.2021). – Рез. англ.

*Поступила 14.04.2021; одобрена после рецензирования 16.05.2021; принята к публикации 25.05.2021*

*Об авторах:*

**Сайтов Алексей Викторович**, младший научный сотрудник лаборатории озимой ржи ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (610007, Российская Федерация, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а), аспирант инженерного факультета ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (610017, Российская Федерация, г. Киров, Октябрьский пр-т, д. 133), Researcher ID: B-7315-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0266-4727>, alexeysaitov@yandex.ru

**Сысуев Василий Алексеевич**, научный руководитель ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (610007, Российская Федерация, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а), академик РАН, доктор технических наук, профессор, Researcher ID: B-8519-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1172-005X>, sisuev@mail.ru

**Сайтов Виктор Ефимович**, старший научный сотрудник лаборатории механизации полеводства ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (610007, Российская Федерация, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: B-6098-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5548-8483>, vicsait-valita@e-kirov.ru

*Заявленный вклад соавторов:*

А. В. Сайтов – обзор и анализ научных источников, проведение практических опытов, оформление графического материала.

В. А. Сысуев – формулирование основной концепции исследования и доработка текста.

В. Е. Сайтов – подготовка первоначального варианта текста и формирование выводов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Shchekleina L.M., Sheshhegova T.K. [The Ergot Problem of Grains (*Claviceps purpurea* (fr.) tul.): History and Modernity (overview)]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* = Theoretical and Applied Ecology. 2013; (1):5-12. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2013-1-005-012>
2. Sheshhegova T.K., Shchekleina L.M., Utkina E.I. Immunologic Characteristics of Winter Rye Varieties. *Agrarnaya nauka Yevro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2018; 65(4):30-35. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.65.4.30-35>
3. Shchekleina L.M., Sheshhegova T.K. Spurred Rye Harmfulness on New Winter Rye Varieties in the Kirov Region. *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo universiteta* = Vestnik Mari State University. 2018; 4(2):83-90. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2018-4-2-83-89>
4. Shchekleina L.M. Influence of Weather Factors on Separate Periods of Fungus *Claviceps Purpurea* (Fr.) Tul Development and Level of Ergot Harmfulness in Kirov Region. *Agrarnaya nauka Yevro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2019; 20(2):134-143. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.2.134-143>
5. Sheshhegova T.K., Shchekleina L.M., Zhelifonova V.P., et al. A Resistance of Rye Varieties to Ergot and Ergot Alkaloid Content in *Claviceps Purpurea Sclerotia* on the Kirov Region Environments.

*Mikologiya i fitoterapiya* = Mycology and Phytotherapy. 2019; 53(3):177-182. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S0026364819030127>

6. Orobinsky V.I., Gievsky A.M., Baskhakov I.V., Chernyshov A.V. Seed Refinement in the Harvesting and Post-Harvesting Process. In: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “AgroSMART – Smart Solutions For Agriculture” (AgroSMART 2018). 2018. Pp. 870-874. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2991/agrosmart-18.2018.163>

7. Aldoshin N., Didmanidze O. Harvesting Lupinus Albus Axial Rotary Combine Harvester. *Research in Agricultural Engineering*. 2018; 64(4):209-214. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17221/107/2017-RAE>

8. Aldoshin N., Didmanidze O., Lylin N., Mosyakov M. Work Improvement of Air-and-Screen Cleaner of Combine Harvester. In: Proceedings of 18<sup>th</sup> International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (22-24 May 2019). Jelgava; 2019. Pp. 100-104. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N110>

9. Volhonov M.S., Zimin I.B., Ostrovskiy Yu.N. Analysis of the Status of Preliminary Grain Cleaning in Farms of the North-Western Region of the Russian Federation and Prospects for Improvement. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2020; 15(2):82-86. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2020-82-86>

10. Galkin V.D., Galkin A.D., Khandrikov V.A., et al. Seed Purification Parameters and Modes by Improved Vibration-Pneumatic Separator. *Permskiy agrarnyy vestnik* = Perm Agrarian Journal. 2020; (1):4-12. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.24411/2307-2873-2020-10012>

11. Saitov V.E., Savinyh P., Golka W., Kamionka J. Increase of Seed Cleaning Efficiency by Better Use of Air Stream Properties. *Agricultural Engineering*. 2015; (3):89-99. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.14654/ir.2015.155.139>

12. Badretdinov I., Mudarisov S., Tuktarov M., et al. Mathematical Modeling of the Grain Material Separation in the Pneumatic System of the Grain-Cleaning Machine. *Journal of Applied Engineering Science*. 2019; 17(4):529-534. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes17-22640>

13. Orobinsky V.I., Tarasenko A.P., Gievsky A.M., et al. Improving the Mechanization of High-Quality Seed Production. In: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “AgroSMART – Smart Solutions For Agriculture” (AgroSMART 2018). 2018. Pp. 849-852. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2991/agrosmart-18.2018.159>

14. Gievskiy A.M., Gulevskiy V.A., Orobinskiy V.I. Ways of Increasing Performance of Universal Grain Cleaning Machines. *Vestnik FGOU VPO “Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina”* = Moscow Goryachkin Agroengineering University Bulletin. 2018; (3):12-16. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-3-12-16>

15. Saitov V.E., Kurbanov R.F., Suvorov A.N. Assessing the Adequacy of Mathematical Models of Light Impurity Fractionation in Sedimentary Chambers of Grain Cleaning Machines. *Procedia Engineering*. 2016; 150:107-110. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.728>

16. Savinyh P., Sychugov Y., Kazakov V., Ivanovs S. Development and Theoretical Studies of Grain Cleaning Machine for Fractional Technology of Flattening Forage Grain. In: Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (23-25 May 2018). Jelgava; 2018. Pp. 124-130. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N156>

17. Giyevskiy A.M., Orobinsky V.I., Tarasenko A.P., et al. Substantiation of Basic Scheme of Grain Cleaning Machine for Preparation of Agricultural Crops Seeds. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 327(4). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042035>

18. Saitov V.E., Farafonov V.G., Gataullin R.G., Saitov A.V. Research of a Diametrical Fan with Suction Channel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 473. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042035>

19. Yermolyev Yu.I., Doroshenko A.A., Belov S.V. Modeling of Milled Straw Heap Separation in Air-Flow Classifier with Three Pneumatic Ducts. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Vestnik of Don State Technical University. 2016; 16(2):59-68. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.12737/19691>
20. Orobinskiy V.I., Gievskiy A.M., Tarasenko A.P., et al. [Study of the Efficiency of Spring Wheat Heap Purification for Seed Purposes with an Air Sieve Separator]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Vestnik of Don State Technical University. 2019; 12(2):34-42. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2019.2.34>
21. Kharitonov M.K., Gievskiy A.M., Orobinskiy V.I. Studying the Design and Operational Parameters of the Sieve Module of the Grain Cleaning Machine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 488. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/488/1/012021>
22. Astanakulov K.D., Karimov Y.Z., Fozilov G. Design of a Grain Cleaning Machine for Small Farms. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2011; 42(4):37-40. Available at: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20123047308> (accessed 10.04.2021). (In Eng.)
23. Saitov V.E., Farafonov V.G., Saitov A.V. Experimental Substantiation of the Effective Height of a Grain Falling by a Stream of Liquid in an Ergot Release Device. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 341. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/341/1/012123>
24. Saitov A.V., Gataullin R.G., Saitov V.Ye. Machine for Ergot Separation from Rye Seeds. Patent 2,689,470 Russian Federation. 2019 May 28. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2689470C1\\_20190528](https://yandex.ru/patents/doc/RU2689470C1_20190528) (accessed 10.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
25. Arkhipov V.A., Trofimov V.F. [Formation of Secondary Droplets by Impact Interaction of the Droplet with the Liquid Surface]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* = Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2005; 46(1):55-62. Available at: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/90c/90cb0d4f0081d8015dacf0baf07ff566.pdf> (accessed 10.04.2021). (In Russ.)
26. Komarov A.A., Kazennov V.V. Body Drop into a Fluid Tank and Dynamic Loads Calculation. *Vestnik MGSU* = Monthly Journal on Construction and Architecture. 2014; (5):135-143. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2014.5.135-143>
27. Scolan Y.-M., Korobkin A. Energy Distribution from Vertical Impact of a Three-Dimensional Solid Body onto the Flat Free Surface of an Ideal Fluid. *Journal of Fluids and Structures*. 2003; 17(2):275-286. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0889-9746\(02\)00118-4](https://doi.org/10.1016/S0889-9746(02)00118-4)
28. Scolan Y.-M., Korobkin A.A. Mixed Boundary Value Problem in Potential Theory: Application to the Hydrodynamic Impact (Wagner) Problem. *Comptes Rendus Mécanique*. 2012; 340(10):702-705. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crme.2012.09.006>
29. Sysuev V.A., Saitov V.E., Farafonov V.G., et al. Theoretical Background of Calculation of the Parameters of the Device for Grain Cleaning from Ergot Sclerotia. *Russian Agricultural Sciences*. 2017; 43(3):273-276. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068367417030156>
30. Saitov V.E., Farafonov V.G., Saitov A.V. Theoretical Underpinnings of the Parameters of Device for Cleaning Grain from Ergot Sclerotia. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(3):355-376. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.355-376>
31. Saitov A.V., Farafonov V.G., Saitov V.E. The Relative Frequency of Immersion of Rye Grains in Liquid. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 723. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/2/022078>
32. Saitov V.Ye., Farafonov V.G., Suvorov A.N., Saitov A.V. Hopper for Bulk Materials. Patent 2,631,556 Russian Federation. 2017 September 25. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2631556C1\\_20170925](https://yandex.ru/patents/doc/RU2631556C1_20170925) (accessed 10.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

Submitted 14.04.2021; approved after reviewing 16.05.2021; accepted for publication 25.05.2021



*About the authors:*

**Aleksey V. Saitov**, Junior Researcher in the Winter Rye Laboratory, Federal Agricultural Research Center of the North-East Named after N. V. Rudnitsky (166a Lenin St., Kirov 610007, Russian Federation); Postgraduate Student of Engineering Faculty, Vyatka State Agricultural Academy (133 Oktyabrskiy Prospekt, Kirov 610017, Russian Federation), Researcher ID: B-7315-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0266-4727>, alexeysaitov@yandex.ru

**Vasily A. Sysuev**, Scientific Director, Federal Agricultural Research Center of the North-East Named after N. V. Rudnitsky (166a Lenin St., Kirov 610007, Russian Federation), Academician of RAS, D.Sc. (Engr.), Professor, Researcher ID: B-8519-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1172-005X>, sisuev@mail.ru

**Viktor E. Saitov**, Senior Researcher of the Laboratory for Field Agriculture, Federal Agricultural Research Center of the North-East Named after N. V. Rudnitsky (166a Lenin St., Kirov 610007, Russian Federation), D.Sc. (Engr.), Professor, Researcher ID: B-6098-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5548-8483>, vicsait-valita@e-kirov.ru

*Contribution of the authors:*

A. V. Saitov – reviewing and analyzing scientific sources, conducting practical experiments, design graphic material.

V. A. Sysuev – formulating the main concept of the study and finalizing the text.

V. E. Saitov – writing the draft and drawing the conclusions.

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

# ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ / ELECTROTECHNOLOGIES AND ELECTRICAL EQUIPMENT IN AGRICULTURE

УДК 621.793

DOI: 10.15507/2658-4123.031.202103.430-448

Оригинальная статья



## Оценка модуля упругости композитных гальванических покрытий при их послойном осаждении

С. Ю. Жачкин<sup>1</sup>, А. И. Завражнов<sup>2</sup>, Н. А. Пеньков<sup>3</sup>,  
А. В. Мартынов<sup>4\*</sup>, Р. Н. Задорожний<sup>5</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж, Российская Федерация)

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Мичуринский ГАУ» (г. Мичуринск, Российская Федерация)

<sup>3</sup>ФГКВООУ ВО «ВУНЦ ВВС «ВВА»» (г. Воронеж, Российская Федерация)

<sup>4</sup>ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Российская Федерация)

<sup>5</sup>ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (г. Москва, Российская Федерация)

\*[martynov-230685@yandex.ru](mailto:martynov-230685@yandex.ru)

*Введение.* Восстановление внутренних цилиндрических поверхностей деталей пар трения является наиболее трудоемким при поддержании автотракторной техники в исправном состоянии. Метод гальваноконтактного осаждения композитных покрытий, заключающийся в упруго-пластической деформации формируемых слоев, используется широко. Для его применения необходимо определить значения модуля упругости, от которых зависит износостойкость трибосопряжений.

*Материалы и методы.* Для исследования использовались образцы цилиндрической формы из сталей 30ХГСА и 30ХГСНА. Гальваническое осаждение покрытий проводилось в электролите, содержащем 200–250 г/л оксида хрома, 2,0–2,5 г/л серной кислоты, дистиллированную воду. При расчете напряженно-деформированного состояния использовался аппарат механики сплошных сред.

© Жачкин С. Ю., Завражнов А. И., Пеньков Н. А., Мартынов А. В., Задорожний Р. Н., 2021



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



*Результаты исследования.* Определена зависимость податливости покрытия как функция параметров отдельных элементарных слоев. Доказано, что при нанесении многослойного покрытия трех видов (ортогонально-армированного, перекрестно-армированного и квазиизотропного) его структура не зависит от углов кинематического движения инструмента по внутренней цилиндрической поверхности детали. Для каждого отдельного вида покрытия указывается путь определения постоянных коэффициентов жесткости слоев. По значениям коэффициентов жесткости выведены зависимости для расчета модуля упругости наносимого материала.

*Обсуждение и заключение.* При определении модуля упругости многослойных композитных покрытий расчет произведен по отдельным слоям, переходя к сопутствующей системе координат, что полностью согласуется с точкой зрения Лагранжа на изучение движения сплошной среды. Полученные результаты имеют практическую значимость при выборе материала наносимого покрытия для восстановления внутренних цилиндрических поверхностей.

**Ключевые слова:** цилиндрическая поверхность, восстановление деталей, многослойное композитное покрытие, упруго-пластическая деформация, коэффициент жесткости, модуль упругости

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

**Для цитирования:** Оценка модуля упругости композитных гальванических покрытий при их послойном осаждении / С. Ю. Жачкин, А. И. Завражнов, Н. А. Пеньков [и др.]. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202103.430-448](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.430-448) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 3. – С. 430–448.

*Original article*

## Estimation of the Elasticity Modulus of Composite Electroplated Coatings during Their Layer-by-Layer Deposition

S. Yu. Zhachkin<sup>a</sup>, A. I. Zavrazhnov<sup>b</sup>, N. A. Penkov<sup>c</sup>,  
A. V. Martynov<sup>d\*</sup>, R. N. Zadorozhny<sup>e</sup>

<sup>a</sup>*Voronezh State Technical University (Voronezh,  
Russian Federation)*

<sup>b</sup>*Michurinsk State Agrarian University (Michurinsk,  
Russian Federation)*

<sup>c</sup>*Military Educational and Scientific Centre of the Air Force  
N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy  
(Voronezh, Russian Federation)*

<sup>d</sup>*National Research Mordovia State University (Saransk,  
Russian Federation)*

<sup>e</sup>*Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow,  
Russian Federation)*

\**martynov-230685@yandex.ru*

*Introduction.* To keep automobiles and tractors in operation conditions, it is necessary to restore the inner cylindrical surfaces of the friction pair parts. This is the most labor-intensive activity. The method of electroplated contact deposition of composite coatings, based on elastic plastic deformation of formed layers, is used for repairing surfaces. To use this method it is necessary to determine the values of the elasticity modulus, on which the wear resistance of tribocouplings depends.

*Materials and Methods.* For the study, cylindrical samples made of 30 HGSA and 30 HGSNA steels were used. Electrolyte containing 200–250 g/l chromium oxide, 2.0–2.5 g/l sulfuric acid, and distilled water was used for electroplating the coatings. When calculating the stress-strain state, the apparatus of continuum mechanics was used.

*Results.* The dependence of the coating pliability as a function of the parameters of individual elementary layers is determined. When the multilayer coating of three types (orthogonal-reinforced, cross-reinforced and quasi-isotropic) is applied, its structure does not depend on the angles of kinematic tool movement on the inner cylindrical surface of the part. For each type of coatings, the way to determine the constant stiffness coefficients of the layers is specified. The dependences for calculating the elasticity modulus of the applied material are derived from the values of the stiffness coefficients.

*Discussion and Conclusion.* In determining the modulus of elasticity of multilayered composite coatings, the calculation is made for the individual layers by passing to the convective coordinates, which is in complete agreement with the Lagrange point of view on the study of the motion of a continuous medium. The results obtained are of practical significance in the selection of the coating material to be applied for the restoration of internal cylindrical surfaces.

**Keywords:** cylindrical surface, restoration of parts, multilayer composite coating, elastic-plastic deformation, stiffness coefficient, elasticity modulus

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

**For citation:** Zhachkin S.Yu., Zavrzhnov A.I., Penkov N.A., et al. Estimation of the Elasticity Modulus of Composite Electroplated Coatings during Their Layer-by-Layer Deposition. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(3):430-448. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.430-448>

## Введение

Предприятия технического сервиса, направленные на ремонт как отечественной, так и импортной автотракторной техники, становятся все более востребованными в современных условиях [1–3]. Известно, что наиболее трудоемко ремонтировать соединения деталей в системе вала, когда износ компенсируется за счет восстановления внутренней поверхности детали [4; 5].

В настоящее время для восстановления внутренних цилиндрических поверхностей применяется метод гальваники. Однако из-за утраты эффективных способов нанесения покрытий, разработанных в 1980-х гг., широкое применение находит способ гальваноконтактного осаждения композитных покрытий (ГКО) [6; 7].

У способа ГКО есть ряд достоинств. Во-первых, применение установки, которая позволяет наносить покрытия, не окуная деталь в ванну, благодаря равномерному обновлению электролита в пространстве инструмента и детали [8; 9]. Вторым отличием способа ГКО является то, что прижимная поверхность выполнена в виде сегментов, имеющих возможность свободного перемещения относительно базовой оси<sup>1</sup>. Такая схема работы обеспечивает равномерность распределения частиц наполнителя по объему композитной матрицы и цилиндричность восстановленного отверстия по высоте детали<sup>2</sup>.

В качестве инструмента можно использовать различные материалы с заданными физико-механическими свойствами, обеспечивающие контролируемый перенос инструмента

<sup>1</sup> Живогин А. А. Восстановление гильз цилиндров дизельных двигателей сельскохозяйственной техники композитным покрытием на основе железа: дис. ... канд. техн. наук. Мичуринск, 2014. 174 с.

<sup>2</sup> Ли Р. И. Технологии восстановления и упрочнения деталей автотракторной техники: учеб. пособие. Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2014. 379 с.

на поверхность детали в зависимости от степени его износа. Чаще всего в качестве материала инструмента применяется хром для получения износостойких и коррозионно-стойких покрытий [10; 11].

Нанесение гальванического покрытия способом ГКО происходит за счет периодической упруго-пластической деформации инструмента без дополнительной механической обработки.

В момент прохождения зоны механической активации обрабатываемой поверхности детали циклическое механическое воздействие инструмента на растущие кристаллы гальванического хрома приводит к временной остановке их роста. В этот момент формируется слой композитного покрытия. После выхода инструмента из обрабатываемой зоны здесь снова идет рост кристаллов хрома до следующего механического контакта с инструментом, что формирует последующий слой гальванического композитного покрытия. При периодических повторениях таких процессов ГКО особенностью роста композитного покрытия на восстанавливаемой цилиндрической поверхности детали является послойное нанесение композита [12].

При ремонте автотракторной техники с восстановлением деталей нанесением гальванических композитных покрытий необходимо знать получаемые физико-механические свойства для прогнозирования износостойкости трибосопряжений в заданных

условиях эксплуатации. Для их оценки должны быть известны технические постоянные, характеризующие связь напряжений и деформаций формируемых осадков, большинство из которых отсутствуют в технической литературе<sup>3</sup>. Одним из таких параметров является модуль упругости.

Цель исследования – определение модуля упругости многослойных композитных покрытий, нанесенных способом гальваноконтактного осаждения.

### Обзор литературы

Анализ литературных источников показал, что справочные значения модуля упругости приводятся только для объемных материалов.

Для определения модуля упругости материалов покрытия в лабораторных условиях используется стандартная методика растяжения цилиндрических образцов на разрывной машине<sup>4</sup>. Результатом разрыва образцов является построение линейной зависимости между напряжением  $\sigma$  (до предела пропорциональности) и относительным удлинением  $\epsilon$ , отношение которых дает значение модуля упругости. Однако данный метод связан с разрушением испытуемого материала и не позволяет определять значения модуля упругости отдельно для нанесенных металлопокрытий.

Приводится методика определения модуля упругости металлопокрытий инструментальным индентированием на универсальной испытательной

<sup>3</sup> Оценка относительного удлинения покрытий, сформированных методом электроискровой обработки / С. А. Величко, П. В. Чумаков, Е. Г. Мартынова, М. Г. Тятюшкина // Материалы Международной научно-практической конференции «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы» (22 ноября 2018 года). Саранск, 2018. С. 377–381. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36800128> (дата обращения: 01.05.2021); Оценка условного предела текучести покрытий, сформированных методом электроискровой обработки / С. А. Величко, П. В. Чумаков, Е. Г. Мартынова, М. Г. Тятюшкина // Материалы Международной научно-практической конференции «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы» (22 ноября 2018 года). Саранск, 2018. С. 382–387. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36800129> (дата обращения: 01.05.2021).

<sup>4</sup> ГОСТ Р 8.748–2011. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материала при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний. М.: Стандартинформ, 2013.

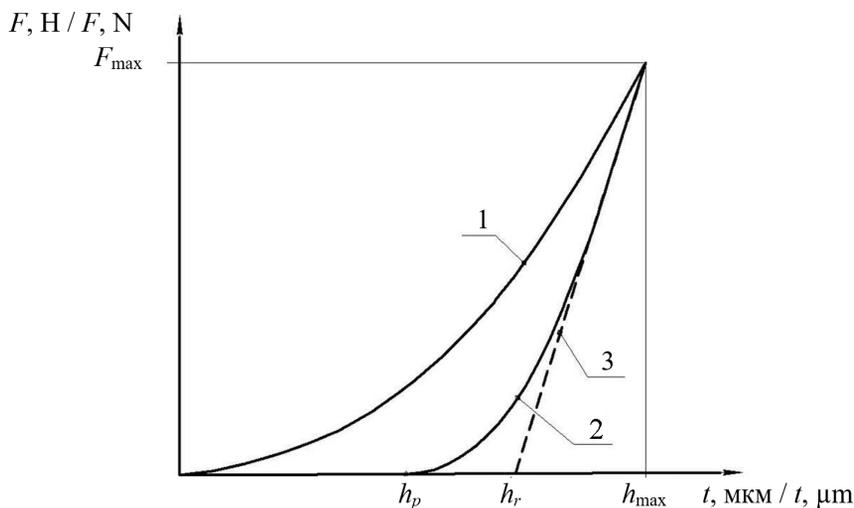
машине<sup>5</sup> [13]. В результате приложенной нагрузки на индентор, который углубляется в испытываемую поверхность, машина строит кинетическую зависимость нагрузки от глубины индентирования при нагружении и разгрузении индентора (рис. 1).

По данной методике модуль упругости определяется по полученным значениям внедрения индентора на глубину  $h$ . Однако в анализируемой работе получены результаты только для объемных материалов без покрытия и с покрытием, нанесенным методом электроискровой обработки<sup>6</sup>. При этом требованием к испытываемой поверхности является плоскостность, а толщина нанесенного покрытия, при

которой показания машины становятся стабильными, должна быть более 0,1–0,2 мм.

В других работах модуль упругости определяется так же по ГОСТу Р 8.748–2011. Однако представленные результаты базируются на однофазных металлах и на единичных слоях, полученных электроосаждением композиционного материала никель-нанокарбонитрида хрома определенной толщины. Применить данную методику отдельно для многослойных покрытий невозможно [14; 15].

Один из распространенных способов оценки модуля упругости основан на измерении твердости поверхности (рис. 2) [16; 17].



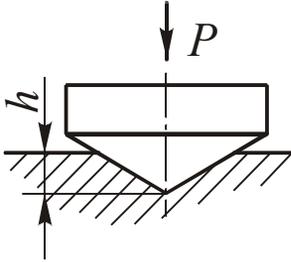
Р и с. 1. Зависимость нагрузки от глубины индентирования: 1 – кривая, соответствующая увеличению испытательной нагрузки (нагружение); 2 – кривая, соответствующая уменьшению испытательной нагрузки (разгружение); 3 – касательная к кривой 2<sup>7</sup>

Fig. 1. Dependence of the load on the depth of indentation: 1 – curve corresponding to an increase in the test load (loading); 2 – curve corresponding to a decrease in the test load (unloading); 3 – tangent to curve 2

<sup>5</sup> Совершенствование методики определения модуля упругости материалов инструментальным индентированием / С. А. Величко, П. В. Чумаков, В. И. Иванов, Е. Г. Мартынова // Материалы Международной научно-практической конференции «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы» (25–26 ноября 2020 г.). Саранск, 2020. С. 335–341. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44318698> (дата обращения: 01.05.2021).

<sup>6</sup> Там же.

<sup>7</sup> ГОСТ Р 8.748–2011. Металлы и сплавы...



Р и с. 2. Схема измерения твердости поверхности:  $P$  – приложенная нагрузка;  $h$  – глубина вдавливания

F i g. 2. Surface hardness measurement scheme:  $P$  – applied load;  $h$  – indentation depth

По полученной твердости с использованием выведенных зависимостей определяется модуль упругости. Однако данная методика также применима для объемных материалов.

Методика вычисления модуля упругости с использованием средств тензометрии используется для объемных материалов [18].

Подводя краткий итог обзора литературы, стоит отметить, что возможность определять модуль упругости позволит применять аппарат механики сплошных сред для проведения расчетов деформационного состояния

многослойных композитных покрытий. Полученные результаты исследования с высокой достоверностью коррелируют с результатами других авторов, изучающих однослойные покрытия.

#### Материалы и методы

Для исследования использовались образцы цилиндрической формы из сталей 30ХГ2СА ТУ 14-1-950-74 и 30ХГ2СНА ТУ 14-1-950-74, широко применяемых для изготовления деталей автотракторной техники (рис. 3).

Наружный диаметр образцов составлял 22 мм, длина 45–50 мм. Они подвергались термообработке до предела прочности  $\sigma_b = 1\ 200$ – $1\ 420$  МПа, внутренняя поверхность шлифовалась до шероховатости  $R_a = 2,50$ – $1,25$  мкм, а затем детали проходили термическую обработку при температуре 210–230 °С для устранения наводороживания обрабатываемой поверхности [19–22].

Нанесение хромового покрытия осуществлялось с помощью электролита, содержащего 200–250 г/л оксида хрома, 2,0–2,5 г/л серной кислоты, дистиллированную воду [19; 20]. Для измерения плотности электролита использовался ареометр, а для

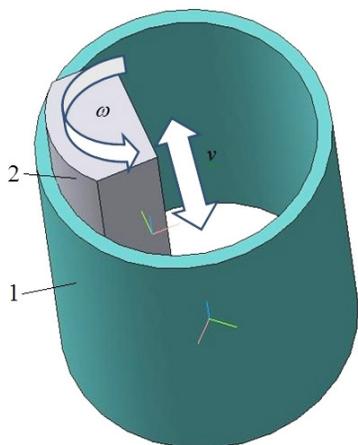


Р и с. 3. Образцы для нанесения покрытия гальваноконтактным осаждением

F i g. 3. Samples for electroplating deposition

кислотности – метромилливольтметр рН-121. Температура электролита поддерживалась и контролировалась термометрами «ТПП-11» (ГОСТ 13717-74) и «ТН-5» (ГОСТ 400-80)<sup>8</sup> [21].

После этого на подготовленные образцы наносилось хромовое покрытие. Кинематика движения инструмента при нанесении покрытия на внутреннюю цилиндрическую поверхность представляет собой сочетание двух видов движения:  $\omega$  – вращательное движение инструмента вокруг оси симметрии и  $v$  – возвратно-поступательное движение вдоль внешней стороны образующей цилиндрического тела (рис. 4).



Р и с. 4. Схема кинематики метода ГКО:  
1 – деталь; 2 – инструмент

Fig. 4. Kinematics scheme of the electroplating deposition method: 1 – part; 2 – tool

Возвратно-поступательное движение обеспечивает кулисный механизм. Для положительного влияния на характеристики полученных композитных покрытий необходимо обеспечить равномерность получаемых осадков. Поэтому в процессе проектирования траектории движения инструмента учитывается различная скорость его перемещения вдоль детали в местах,

близкорасположенных к кромке. Развертка кинематики движения инструмента вверх и вниз при восстановлении внутренней цилиндрической поверхности представлена на рисунке 5 [19; 20].

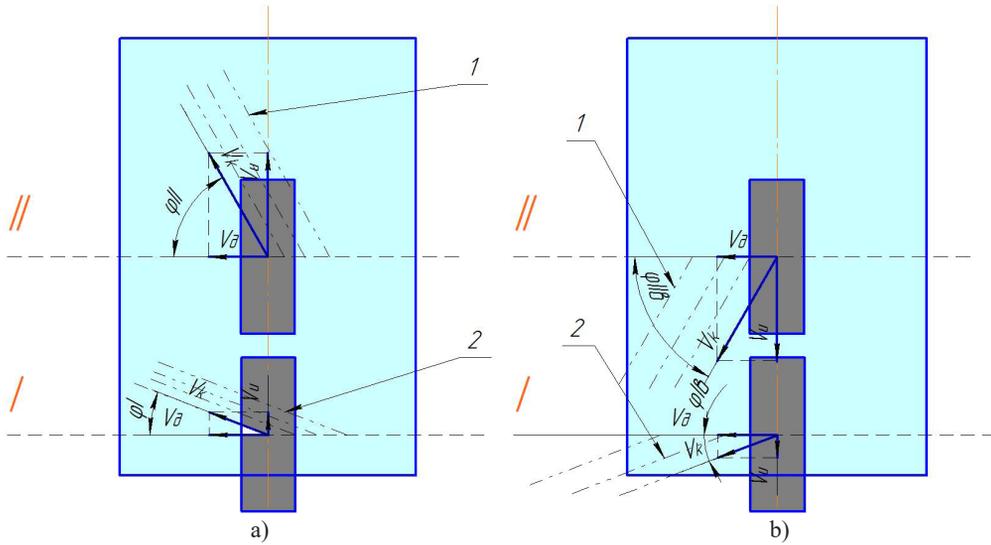
Таким образом, при нанесении композитного покрытия методом ГКО возможно два основных положения инструмента на поверхности детали: *I* – начало движения инструмента, *II* – проходные точки с максимальной линейной скоростью [9]. Положение результирующего вектора  $V_k$  определяет направление формирования наносимого композитного покрытия как при его перемещении вверх (рис. 5a), так и в противоположном направлении (рис. 5b) [19].

Структура многослойного композиционного покрытия определяется сочетанием векторов главного и вспомогательного движения, а также соотношением скоростей в различных зонах восстанавливаемой поверхности детали. Возможные варианты формирования структуры композитного покрытия, в зависимости от сочетания векторов движения и соотношения скоростей инструмента, представлены на рисунке 6 [19; 20].

Оценку модуля упругости композитного материала, нанесенного способом ГКО, рассмотрим на примере многослойного покрытия, состоящего из однонаправленных и не согласованных между собой по ориентации элементарных слоев. В ходе расчетов будем использовать общую, «глобальную», систему координат ( $x, y$ ) и местные локальные однонаправленные слои в сопутствующей системе координат ( $1^{(k)}, 2^{(k)}$ ) (рис. 7) [19].

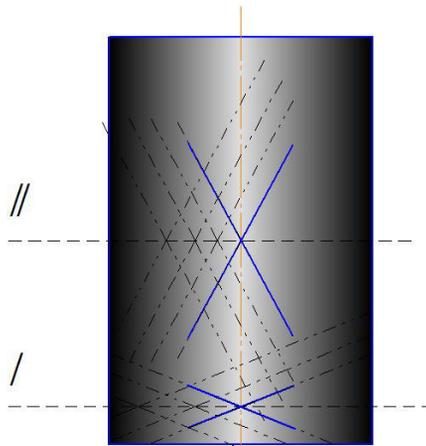
Для предложенной модели определить упругие постоянные многослойного композитного материала возможно, если будут известны характеристики жесткости (податливости) отдельных слоев.

<sup>8</sup> ГОСТ 13717-74. Приборы манометрического принципа действия показывающие электроконтактные. Общие технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 1999; ГОСТ 400-80. Термометры стеклянные для испытаний нефтепродуктов. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2008.



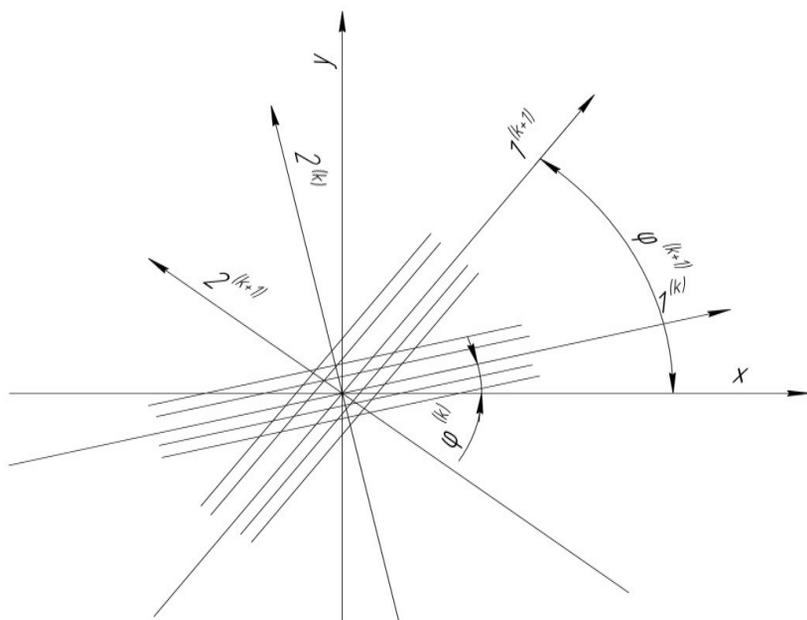
Р и с. 5. Развертка кинематики движения инструмента способом ГКО:  
 а) движение вверх; б) движение вниз; *I, II* – варианты сечения с разными углами нанесения волокна композита; 1 – направление волокна композита в слое при положении инструмента в центральной точке контакта; 2 – направление волокна композита в слое при положении инструмента на периферии контакта

Fig. 5. Scan of the kinematics of the tool movement by the electroplating deposition method:  
 a) upward movement; b) downward movement; *I, II* – cross-section options with different angles of application of the composite fiber; 1 – direction of the composite fiber in the layer when the tool is positioned at the central point of contact; 2 – direction of the composite fiber in the layer when the tool is positioned at the contact periphery



Р и с. 6. Кинематика движения инструмента при нанесении многослойного композитного покрытия способом ГКО: *I, II* – варианты сечения с разными углами нанесения волокна композита

Fig. 6. Kinematics of tool movement when applying a multi-layer composite coating by the electroplating deposition method: *I, II* – cross-section options with different angles of application of the composite fiber

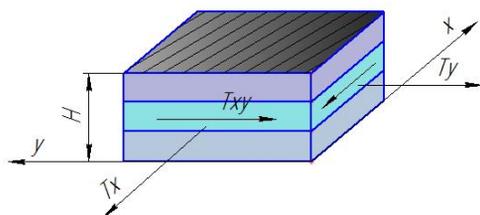


Р и с. 7. Схема структуры многослойного композитного покрытия:  
 $k$  – номер однонаправленного слоя [9]

F i g. 7. Structure diagram of a multilayer composite coating:  
 $k$  – number of the unidirectional layer

### Результаты исследования

Для моделирования сил действия инструмента на обрабатываемую поверхность впишем элементарный слой получаемого покрытия в плоскую систему координат  $xOy$  (рис. 8) [21–23].



Р и с. 8. Единичный элемент многослойного покрытия

F i g. 8. Single element of a multi-layer coating

Силы прижатия инструмента к единичной площади сечения поверхно-

сти детали при нанесении композитного покрытия  $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_{xy}$  определяются по следующим уравнениям равновесия:

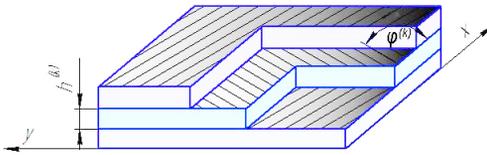
$$\begin{aligned} T_x &= \sum_{k=1}^n \sigma_x^k h^k, \\ T_y &= \sum_{k=1}^n \sigma_y^k h^k, \\ T_{xy} &= \sum_{k=1}^n \tau_{xy}^k h^k, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\sigma$ ,  $\tau$  – напряжения в слоях, МПа;  $h$  – толщина единичного слоя, мм;  $n$  – число слоев в пакете, шт.

Определим средние напряжения многослойного покрытия, разделив уравнение равновесия (1) на суммарную толщину  $H = \sum_{k=1}^n h^{(k)}$ , и получим:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sum_{k=1}^n \sigma_x^k \bar{h}^k, \\ \sigma_y &= \sum_{k=1}^n \sigma_y^k \bar{h}^k, \\ \tau_{xy} &= \sum_{k=1}^n \tau_{xy}^k \bar{h}^k,\end{aligned}\quad (2)$$

где  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  – средние напряжения многослойного покрытия,  $\sigma_x = T_x / H$ ,  $\sigma_y = T_y / H$ ,  $\tau_{xy} = T_{xy} / H$ ;  $\bar{h}^k = h^{(k)} / H$  – толщина единичного  $k$ -го слоя (рис. 9).



Р и с. 9. Схема разреза многослойного покрытия

F i g. 9. Multi-layer coating section diagram

Тогда закон Гука для единичного слоя  $k$  многослойного покрытия будет иметь вид [24; 25]:

$$\{\sigma_{xy}\}^k = [\bar{G}^k] \{\varepsilon_{xy}\}^k, \quad (3)$$

где  $\sigma_{xy}$  – напряжения в единичных слоях, МПа;  $\bar{G}$  – коэффициент жесткости, Н/м;  $\varepsilon_{xy}$  – относительные деформации слоев.

Выражение (2), с учетом деформаций слоев, равных  $\varepsilon_x = \varepsilon_x^{(k)}$ ,  $\varepsilon_y = \varepsilon_y^{(k)}$ ,  $\gamma_{xy} = \gamma_{xy}^{(k)}$ , и закона Гука (3), будет иметь вид:

$$\{\sigma_{xy}\} = [G] \{\varepsilon_{xy}\}. \quad (4)$$

Из уравнения (4) видно, что средние напряжения в слоях многослойного композитного покрытия для плоского напряженного состояния пропорциональны деформациям в слоях и коэффициенту жесткости. Для оценки влияния коэффициента жесткости слоев выражение (2) разложим на составляющие по осям в виде:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{12} & g_{22} & g_{23} \\ g_{13} & g_{23} & g_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}, \quad (5)$$

где  $g_{ij} = \sum_{k=1}^n g_{ij}^{(k)} h^{(k)}$  – коэффициент жесткости слоев;  $k$  – натуральное число.

Анализ выражения (5) показывает, что коэффициент жесткости в многослойном композитном покрытии не зависит от характера чередования единичных слоев. Это означает, что многослойные покрытия, у которых единичные слои будут иметь равный коэффициент жесткости, можно принимать за единый слой определенной толщины. К таким многослойным покрытиям относятся материалы с уложенными однонаправленными слоями под углом  $\phi$ .

Нанесение многослойного покрытия способом ГКО происходит при поступательном и вращательном движениях инструмента. Рассмотрев поворот инструмента для однородного материала, например вокруг оси  $z$  на угол  $\theta$  в уравнении (5), определим коэффициенты жесткости композита [26–28]:

$$\begin{aligned}\bar{g}_{11} &= V_1 + V_2 \cos 2\phi + V_3 \cos 4\phi, \\ \bar{g}_{12} &= V_1 - 2V_4 - V_3 \cos 4\phi, \\ \bar{g}_{13} &= \frac{1}{2} V_2 \sin 2\phi + V_3 \sin 4\phi, \\ \bar{g}_{22} &= V_1 + V_2 \cos 2\phi + V_3 \cos 4\phi, \\ \bar{g}_{23} &= \frac{1}{2} V_2 \sin 2\phi - V_3 \sin 4\phi, \\ \bar{g}_{33} &= V_4 - V_3 \cos 4\phi.\end{aligned}\quad (6)$$

Угол поворота системы координат  $\theta$  вокруг оси  $z$  – постоянная величина для единичных слоев. Применяя к выражениям (6) формулу суммарного тригонометрического тождества, проведем расчет коэффициента жесткости на примере  $g_{11}(\theta)$ :

$$\begin{aligned}
 g_{11}(\theta) = & \sum_{k=1}^n (V_1 + V_2 \cos 2\phi^{(k)} \cos 2\theta + \\
 & + V_2 \sin 2\phi^{(k)} \sin 2\theta + V_3 \cos 4\phi^{(k)} \cos 4\theta + \\
 & + V_3 \sin 4\phi^{(k)} \sin 4\theta) \bar{h}^{(k)} = V_1 + \\
 & + V_2 \cos 2\theta \sum_{k=1}^n \bar{h}^{(k)} \cos 2\phi^{(k)} + \\
 & + V_2 \sin 2\theta \sum_{k=1}^n \bar{h}^{(k)} \sin 2\phi^{(k)} + \\
 & + V_3 \cos 4\theta \sum_{k=1}^n \bar{h}^{(k)} \cos 4\phi^{(k)} + \\
 & + V_3 \sin 4\theta \sum_{k=1}^n \bar{h}^{(k)} \sin 4\phi^{(k)}. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Аналогичные расчетные выражения получаются для коэффициентов жесткости  $g_{ij}(\theta)$ .

Таким образом, в системе координат  $xOy$  средние значения коэффициентов жесткости запишутся в виде:

$$\langle g_{ij} \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} g_{ij}(\theta) d\theta. \quad (8)$$

Тогда интегральная (суммарная) запись коэффициентов жесткости, например для  $\langle g_{11} \rangle$ , будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 \langle g_{11} \rangle = & \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} g_{11}(\theta) d\theta = V_1 + \\
 & + \frac{V_2}{2\pi} \left( \int_0^{2\pi} \cos 2\theta d\theta \sum_{k=1}^n \bar{h}^{(k)} \cos 2\phi^{(k)} + \right. \\
 & \left. + \int_0^{2\pi} \sin 2\theta d\theta \sum_{k=1}^n \bar{h}^{(k)} \sin 2\phi^{(k)} \right) + \\
 & + \frac{V_3}{2\pi} \left( \int_0^{2\pi} \cos 4\theta d\theta \sum_{k=1}^n \bar{h}^{(k)} \cos 4\phi^{(k)} + \right. \\
 & \left. + \int_0^{2\pi} \sin 4\theta d\theta \sum_{k=1}^n \bar{h}^{(k)} \sin 4\phi^{(k)} \right).
 \end{aligned}$$

В данном выражении коэффициент жесткости  $\langle g_{11} \rangle$  интегралы

тригонометрических значений угла  $\theta$  поворота системы координат  $\int_0^{2\pi} \cos k\theta d\theta$ ,  $\int_0^{2\pi} \sin k\theta d\theta$  равны нулю.

С учетом выражения (6) средние значения коэффициентов жесткости многослойных материалов, состоящих из единичных слоев однонаправленной укладки инструментом, будут равны:

$$\begin{aligned}
 \langle g_{11} \rangle = V_1; \langle g_{12} \rangle = V_2 - 2V_4; \langle g_{22} \rangle = V_1; \\
 \langle g_{13} \rangle = 0; \langle g_{23} \rangle = 0; \langle g_{33} \rangle = V_4. \quad (9)
 \end{aligned}$$

Из полученного выражения (9) следует, что для многослойных покрытий средние значения коэффициентов жесткости не зависят от углов укладки инструментом сетки армирования слоев и их толщины, а определяются только физико-механическими свойствами материала.

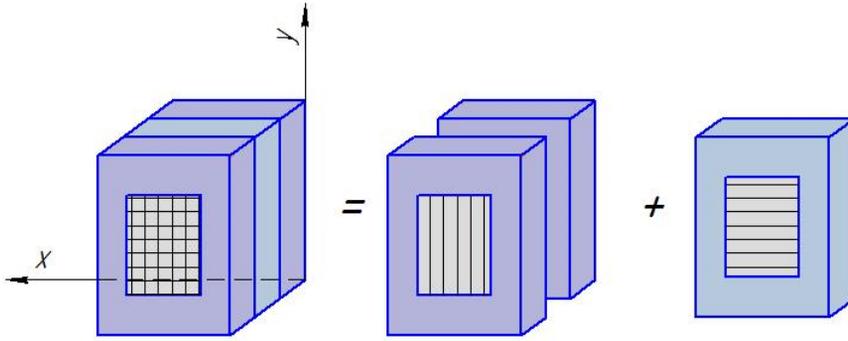
Полученные свойства многослойных композитных покрытий, полученных способом ГКО, имеют три основных вида структуры в зависимости от кинематики движения инструмента. Рассмотрим каждый вид структуры многослойного покрытия по отдельности.

*Ортогонально-армированная структура покрытия*

Структура таких покрытий состоит из слоев  $n$ , нанесенных под углом  $\varphi^{(1)} = 0^\circ$  и  $\varphi^{(2)} = 90^\circ$  (рис. 10).

Тогда общая толщина слоев состоит из слоев первого типа  $\bar{h}^{(1)}$  и слоев второго типа  $\bar{h}^{(2)}$ . При этом эти слои имеют равные коэффициенты жесткости, так как выполнены из однонаправленного материала.

Тогда формула (5) для расчета коэффициентов жесткости однонаправленных слоев ортогонально-армированной структуры покрытия будет иметь вид:



Р и с. 10. Схема ортогонально-армированной структуры покрытия

F i g. 10. Diagram of the orthogonally reinforced coating structure

$$\begin{aligned}
 g_{11} &= g_{11}^0 \bar{h}^{(1)} + g_{22}^0 \bar{h}^{(2)}, \\
 g_{22} &= g_{22}^0 \bar{h}^{(1)} + g_{11}^0 \bar{h}^{(2)}, \\
 g_{12} = g_{12}^0, g_{33} = g_{33}^0, g_{13} = g_{23} = 0. \quad (10)
 \end{aligned}$$

Структура матрицы коэффициентов жесткости такого покрытия ( $g_{13} = g_{23} = 0$ ) позволяет считать разными свойства по направлениям взаимно перпендикулярных осей, которые совпадают с осями  $x$  и  $y$ .

*Перекрестно-армированная структура покрытия*

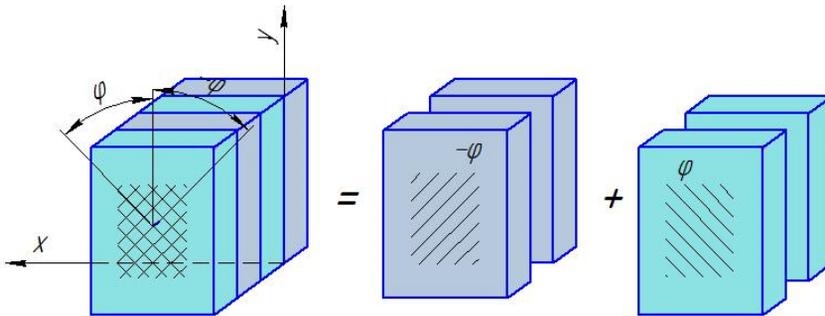
Структура таких покрытий состоит из  $2n$  слоев, которые уложены к оси  $x$  под углами  $\pm\varphi$  (рис. 11).

Тогда формула (5) для расчета коэффициентов жесткости однонаправленных слоев перекрестно-арми-

рованной структуры покрытия будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 g_{11} &= \frac{1}{2} (\bar{g}_{11}^1 + \bar{g}_{11}^2) = \bar{g}_{11}, \\
 g_{22} &= \frac{1}{2} (\bar{g}_{22}^1 + \bar{g}_{22}^2) = \bar{g}_{22}, \\
 g_{12} &= \frac{1}{2} (\bar{g}_{12}^1 + \bar{g}_{12}^2) = \bar{g}_{12}, \\
 g_{66} &= \frac{1}{2} (\bar{g}_{33}^1 + \bar{g}_{33}^2) = \bar{g}_{33}, \\
 g_{13} = g_{23} &= 0. \quad (11)
 \end{aligned}$$

Инструменты движутся во время укладки слоев покрытия с углами, равными  $\varphi = \pm 45^\circ$ . В связи с этим получаем следующие коэффициенты жесткости, учитывая выражения (6) и (10):



Р и с. 11. Схема перекрестно-армированной структуры покрытия

F i g. 11. Diagram of the cross-reinforced coating structure

$$\begin{aligned}
 g_{11} = g_{22} &= \frac{(g_{11}^0 + 2g_{12}^0 + g_{22}^0 + 4g_{33}^0)}{4}, \\
 g_{12} &= \frac{(g_{11}^0 + 2g_{12}^0 + g_{22}^0 - 4g_{33}^0)}{4}, \\
 g_{33} &= \frac{(g_{11}^0 - 2g_{12}^0 + g_{22}^0)}{4}, \\
 g_{13} = g_{23} &= 0.
 \end{aligned} \quad (12)$$

Представленные ниже данные коррелируют с ранее опубликованными результатами аналитической оценки свойств дисперсно-упрочненных гальванических композитных многослойных покрытий [19]. Полученные результаты расчета коэффициентов жесткости показывают, что перекрестно-армированная структура при средней толщине покрытия первого и второго типа, равной  $\bar{h}^{(1)} = \bar{h}^{(2)} = 0,5$ , является ортогональной.

Однако равные коэффициенты жесткости материала в двух ортогональных направлениях ( $g_{11} = g_{22}$ ) не являются доказательством одинаковых свойств в плоской системе координат  $xOy$ .

*Квазиизотропная структура покрытия*

Такая структура многослойного композитного покрытия включает слои одинаковой толщины с углом укладки  $\varphi^{(k)} = k\pi/n$ ,  $k \in \mathbb{N}$ ,  $n \geq 3$ . Примеры таких материалов – композиты со схемой укладки слоев с углами  $\varphi = \pm 30^\circ$  и  $\varphi = 90^\circ$  или  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\varphi = \pm 45^\circ$  и  $\varphi = 90^\circ$  [19].

Тогда для квазиизотропной структуры покрытия значение коэффициента жесткости, например  $g_{11}$ , будет равно:

$$g_{11} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left( V_1 + V_2 \cos \frac{2\pi k}{n} + V_3 \cos \frac{4\pi k}{n} \right) \quad (13)$$

при условии, что среднее значение толщины слоев равно  $\bar{h}^{(k)} = \frac{1}{n}$ .

В данном выражении коэффициента жесткости  $g_{11}$  суммарные

тригонометрические выражения  $\sum_{k=1}^n \cos\left(\frac{2\pi k}{n}\right)$ ,  $\sum_{k=1}^n \cos\left(\frac{4\pi k}{n}\right)$  равны нулю при заданных углах. Так как эти суммарные тригонометрические выражения входят в выражения для остальных коэффициентов жесткости  $g_{12}$ ,  $g_{22}$ ,  $g_{32}$ , то  $g_{11} = g_{22} = V_1$ ,  $g_{12} = V_1 - 2V_4$ ,  $g_{66} = V_4$  [19].

По аналогии с выражением (13) для коэффициентов жесткости  $g_{13}$ ,  $g_{23}$  суммарные тригонометрические выражения  $\sum_{k=1}^n \sin\left(\frac{2\pi k}{n}\right)$ ,  $\sum_{k=1}^n \sin\left(\frac{4\pi k}{n}\right)$  также равны нулю. Поэтому  $g_{16} = g_{26} = 0$ , а материал имеет разные физико-механические свойства по разным направлениям.

Для определения модуля упругости многослойного композитного покрытия, используемого в технических расчетах для выбора наносимого материала, рассмотрим деформации многослойного композита, например, в направлении оси  $x$ . Тогда уравнения (5) примут вид:

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= g_{11}\varepsilon_x + g_{12}\varepsilon_y + g_{13}\gamma_{xy}, \\
 0 &= g_{12}\varepsilon_x + g_{22}\varepsilon_y + g_{23}\gamma_{xy}, \\
 0 &= g_{13}\varepsilon_x + g_{23}\varepsilon_y + g_{33}\gamma_{xy}.
 \end{aligned} \quad (14)$$

Выводя  $\varepsilon_y$  и  $\gamma_{xy}$  из 2-го и 3-го уравнений (14), подставляем их в первое уравнение. В этом случае для определения модуля упругости можно записать выражение:

$$E_x = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} = \frac{g_{11}g_{22}g_{33} + 2g_{12}g_{23}g_{13} - g_{11}g_{23}^2 - g_{22}g_{13}^2 - g_{33}g_{12}^2}{g_{22}g_{33} - g_{23}^2}. \quad (15)$$

Обозначим  $\Delta_g = \det \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{12} & g_{22} & g_{23} \\ g_{13} & g_{23} & g_{33} \end{bmatrix}$ .

Тогда выражение (15) примет вид:

$$E_x = \frac{\Delta_g}{g_{22}g_{33} - g_{23}^2}. \quad (16)$$

Аналогично для остальных констант Ламе:

$$E_y = \frac{\Delta_g}{g_{11}g_{33} - g_{13}^2}, G_{xy} = \frac{\Delta_g}{g_{11}g_{22} - g_{12}^2},$$

$$v_{xy} = \frac{g_{12}g_{33} - g_{13}g_{23}}{g_{22}g_{33} - g_{23}^2}. \quad (17)$$

В случае ортотропного композита ( $g_{16} = g_{26} = 0$ ) формулы констант Ламе примут вид:

$$E_x = g_{11} - \frac{g_{12}^2}{g_{22}}, E_y = g_{22} - \frac{g_{12}^2}{g_{11}},$$

$$G_{xy} = g_{33}, v_{xy} = \frac{g_{12}}{g_{22}}. \quad (18)$$

Таким образом, при повороте системы координат  $x, y, z$  вокруг оси  $z$  на заданный угол  $\theta$  коэффициенты жесткости  $g_{ij}(\theta)$  будут определены по типовым формулам (8). По полученным значениям коэффициентов жесткости,

с учетом выражений (17) и (18), определяются постоянные модуля упругости при технических расчетах.

### Обсуждение и заключение

Согласно моделированию деформаций композитных слоев, нанесенных способом ГКО, доказано, что при определении модуля упругости их можно рассматривать не по отдельности, а как один слой заданной толщины. При нанесении многослойного покрытия его структура не зависит от углов кинематического движения инструмента по внутренней поверхности цилиндрической детали и может быть трех видов: ортогонально-армированная, перекрестно-армированная и квазиизотропная.

При обработке поверхности инструментом получены зависимости для определения коэффициентов жесткости многослойного покрытия. По значениям коэффициентов жесткости выведены зависимости для расчета модуля упругости наносимого материала.

Полученные результаты имеют практическую значимость при выборе материала наносимого покрытия для восстановления внутренних цилиндрических поверхностей деталей.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Буряев, М. К. Обеспечение работоспособности автотракторной техники корректированием расхода запасных частей при техническом сервисе / М. К. Буряев, А. В. Шистеев // Вестник ВСГУТУ. – 2019. – № 3 (74). – С. 69–76. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40539855> (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.
2. Способ и устройство для восстановления плунжерной пары топливного насоса высокого давления / А. С. Канищев, А. Е. Ломовских, А. К. Агафонов [и др.]. – DOI 10.35887/2305-2538-2020-6-51-59 // Наука в центральной России. – 2020. – № 6 (48). – С. 51–59. – Рез. англ.
3. Величко, С. А. Оценка предельного состояния тестоделительных машин вакуумно-поршневого типа по критерию расхода масла / С. А. Величко, Е. Г. Мартынова, В. И. Иванов. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202003.448-463 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 3. – С. 448–463. – Рез. англ.
4. Дорогой, В. Н. Использование нового ресурсосберегающего метода для обслуживания деталей машин / В. Н. Дорогой, В. М. Михлин // Грузовое и пассажирское автохозяйство. – 2014. – № 1. – С. 69–72. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21289248> (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.

5. **Ли, Р. Н.** Эластомерный наноккомпозит для восстановления изношенных корпусных деталей автотракторной техники / Р. Н. Ли, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба. – DOI 10.35887/2305-2538-2021-1-69-79 // Наука в центральной России. – 2021. – № 1 (49). – С. 69–79. – Рез. англ.

6. **Семенihin, Б. А.** Восстановление и упрочнение деталей автотракторной техники композиционными гальваническими покрытиями с использованием порошков твердых сплавов / Б. А. Семенihin, Л. П. Кузнецова, Р. А. Латыпов // Труды ГОСНИТИ. – 2012. – Т. 109, № 2. – С. 57–60. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18190495> (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.

7. Композиционные СВС-материалы на основе карбида и никелида титана, легированные тугоплавким наноккомпонентом / Ю. С. Погожев, Е. А. Левашов, А. Е. Кудряшов [и др.] // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2012. – № 2. – С. 24–32. – URL: <https://powder.misis.ru/jour/issue/view/19> (дата обращения: 01.05.2021).

8. Влияние природы электродных материалов на эрозию и свойства легированного слоя. Критерии оценки эффективности электроискрового легирования / А. Д. Верхотуров, В. И. Иванов, А. С. Дорохов [и др.]. – DOI 10.15507/0236-2910.028.201803.302-320 // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 3. – С. 302–320. – Рез. англ.

9. Моделирование процесса нанесения на металлическую поверхность многослойных композитов на основе механики сплошных сред / С. Ю. Жачкин, М. В. Астахов, Г. В. Зибров [и др.] // Труды ГОСНИТИ. – 2014. – Т. 114, № 1. – С. 122–127. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21308815> (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.

10. Применение наноккарбонитрида хрома в композиционных гальванических покрытиях на основе никеля / Л. С. Ширияева, И. В. Ноздрин, Г. В. Галевский, В. В. Руднева // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2014. – № 3 (9). – С. 48–52. – URL: <https://clck.ru/WkSFX> (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.

11. **Ноздрин, И. В.** Гальванические композиционные покрытия цинк – диборид хрома: электроосаждение и свойства / И. В. Ноздрин, В. В. Руднева, Г. В. Галевский // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. – 2014. – № 32. – С. 107–112. – URL: <https://www.sibsiu.ru/downloads/public/vestnikgmsraen/32.pdf> (дата обращения: 01.05.2021).

12. **Жачкин, С. Ю.** Моделирование напряженнодеформированного состояния поверхностного слоя при нанесении композитных покрытий методом ГКО / С. Ю. Жачкин, Н. А. Пеньков, А. А. Живогин // Машинно-технологическая станция. – 2013. – № 2. – С. 29–34. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19129477> (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.

13. Determination of the Heat Resistance of Polymer Construction Materials by the Dynamic Mechanical Method / V. O. Startsev, M. V. Molokov, A. N. Blaznov [et al.]. – DOI 10.1134/s1995421217040141 // Polymer Science, Series D. – 2017. – Vol. 10, Issue 4. – Pp. 313–317.

14. Исследование физико-механических свойств электроосаждаемого композиционного материала никель-наноккарбонитрид хрома / Л. С. Ширияева, И. В. Ноздрин, Г. В. Галевский, В. В. Руднева // Перспективные материалы. – 2014. – № 7. – С. 62–67. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21801155> (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.

15. **Кукса, Л. В.** Метод определения упругих свойств однофазных металлов / Л. В. Кукса, Л. М. Арзамаскова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79, № 3. – С. 60–62. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18888962> (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.

16. **Бульчев, С. И.** Определение модуля Юнга по твердости / С. И. Бульчев, А. В. Калмакова, А. Н. Кравченков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009. – Т. 75, № 9. – С. 63–66. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12890609> (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.

17. **Бульчев, С. И.** Кинетическое индентирование и гистерезис в отпечатке / С. И. Бульчев, В. В. Порошин, В. П. Алехин // Деформация и разрушение. – 2006. – № 8. – С. 39–46. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11969161> (дата обращения: 01.05.2021).

18. **Богодухов, С. И.** Определение модуля упругости различных материалов с применением средств тензометрии / С. И. Богодухов, В. С. Гарипов, Е. В. Солосина // Вестник Оренбургского

государственного университета. – 2014. – № 4 (165). – С. 289–294. – URL: <https://elck.ru/WkVykh> (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.

19. Аналитическая оценка свойств дисперсно-упрочненных гальванических композитных многослойных покрытий / С. Ю. Жачкин, Н. А. Пеньков, А. И. Краснов, К. А. Манаенков // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2015. – № 1. – С. 142–149. – URL: [http://www.mgau.ru/science/journal/PDF\\_files/1-2015.pdf](http://www.mgau.ru/science/journal/PDF_files/1-2015.pdf) (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.

20. **Zhachkin, S. Yu.** Dispersion-Hardened Composite Coatings with Desired Physical and Mechanical Properties / S. Yu. Zhachkin, N. A. Penkov, M. N. Krasnova // Engineering Computations. – 2017. – Vol. 34, Issue 8. – Pp. 2577–2585. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43036928> (дата обращения: 01.05.2021).

21. Управление внутренними напряжениями в гальванических композитных покрытиях на основе железа / С. Ю. Жачкин, Н. А. Пеньков, О. А. Сидоркин, С. В. Нельсов // Труды ГОСНИТИ. – 2017. – Т. 129. – С. 183–187. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30593131> (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.

22. **Chen, Q.** Computer Simulation of Solid-Particle Erosion of Composite Materials / Q. Chen, D. Y. Li. – DOI 10.1016/S0043-1648(03)00065-6 // Wear. – 2003. – Vol. 255, Issue 1–6. – Pp. 78–84.

23. Компьютерное моделирование свойств плеча балластной призмы железнодорожного пути, омоноличенной полимерными связующими на основе полиуретана / З. Б. Хакиев, А. А. Кругликов, Я. М. Ермолов, В. А. Явна // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 3 (71). – С. 142–152. – URL: [http://vestnik.rgups.ru/wp-content/uploads/2018/10/2018\\_3\\_vestnik\\_rgups\\_a.pdf](http://vestnik.rgups.ru/wp-content/uploads/2018/10/2018_3_vestnik_rgups_a.pdf) (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.

24. **Voronin, N. A.** Analysis of the Mechanisms of Deformation of Topocomposites by Modeling of the Indentation Load-Displacement Curves / N. A. Voronin. – DOI 10.3934/matersci.2019.3.397 // AIMS Materials Science. – 2019. – Vol. 6, Issue 3. – Pp. 397–405.

25. **Васильев, В. И.** Решение задач однофазной фильтрации методом конечных элементов на вычислительном кластере / В. И. Васильев, М. В. Васильева, Д. Я. Никифоров // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. – 2016. – № 6. – С. 8–17. – URL: <https://elck.ru/TFXvww> (дата обращения: 01.04.2021). – Рез. англ.

26. Моделирование температурного поля поверхности при электроискровом легировании металлов / В. Д. Власенко, В. И. Иванов, В. Ф. Аулов [и др.]. – DOI 10.15507/2658-4123.029.201902.218-233 // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 2. – С. 218–233.

27. **Ivanov, V. I.** Hardening of Objects and the Increase of Their Lifetime by the Electrospark Method: The Object Classification and the Specific Features of the Technology / V. I. Ivanov, F. K. Burumkulov. – DOI 10.3103/s1068375510050042 // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2010. – Vol. 46, Issue 5. – Pp. 416–423.

28. New Possibilities of Plasma Spraying of Wear-Resistant Coatings / S. N. Grigorev, O. B. Kovaliev, V. I. Kuzmin [et al.]. – DOI 10.3103/S1068366613030070 // Journal of Friction and Wear. – 2013. – Vol. 34, Issue 3. – Pp. 161–165.

*Поступила 26.04.2021; одобрена после рецензирования 20.05.2021; принята к публикации 01.06.2021*

*Об авторах:*

**Жачкин Сергей Юрьевич**, профессор кафедры автоматизированного оборудования машиностроительного производства ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (394026, Российская Федерация, г. Воронеж, пр-т Московский, д. 14), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1844-5011>, zhach@list.ru

**Завражнов Анатолий Иванович**, профессор кафедры технологических процессов и технической безопасности ФГБОУ ВО «Мичуринский ГАУ» (393760, Российская Федерация, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д. 101), академик РАН, доктор технических наук, aiz@mgau.ru

**Пеньков Никита Алексеевич**, начальник лаборатории методического обеспечения образовательной деятельности ФГКВУ ВО «ВУНЦ ВВС «ВВА»» (394064, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54А), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4644-3814>, myth\_np\_nikit@mail.ru

*Electrotechnologies and electrical equipment in agriculture*

**Мартынов Алексей Владимирович**, доцент кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, Researcher ID: [AAR-8786-2020](https://orcid.org/0000-0003-4744-4373), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4744-4373>, [martynov-230685@yandex.ru](mailto:martynov-230685@yandex.ru)

**Задорожний Роман Николаевич**, ведущий научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8007-0732>, Scopus ID: [57215670358](https://orcid.org/0000-0002-8007-0732), [busun\\_007@mail.ru](mailto:busun_007@mail.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

С. Ю. Жачкин – формулирование основной концепции исследования и анализ результатов.

А. И. Завражнов – методическое руководство.

Н. А. Пеньков – экспериментальные исследования.

А. В. Мартынов – план статьи и ее написание.

Р. Н. Задорожний – формирование выводов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Buraev M.K., Shisteev A.V. Ensuring the Efficiency of Motor-and-Tractor Equipment by Adjusting the Consumption of Spare Parts for Technical Service. *Vestnik VSGUTU* = ESSUTM Bulletin. 2019; (3):69-76. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40539855> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

2. Kanishchev A.S., Lomovskikh A.Ye., Agafonov A.K., et al. Method and Device for Restoring the Plunger Pair of a High-Pressure Fuel Pump. *Nauka v tsentralnoy Rossii* = Science in the Central Russia. 2020; (6):51-59. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2020-6-51-59>

3. Velichko S.A., Martynova E.G., Ivanov V.I. The Assessment of the Limit State of the Vacuum Piston Type Dough Divider by Oil Consumption. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(3):448-463. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.448-463>

4. Dorogoy V.N., Mikhlin V.M. Use of a New Resource-Saving Method for Service of Details of Machines. *Gruzovoe i passazhirskoe avtokhozyaystvo* = Cargo and Passenger Vehicles. 2014; (1):69-72. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21289248> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

5. Li R.N., Psarev D.N., Kiba M.R. Elastomeric Nanocomposite for Restoration Worn-Out Body Parts Vehicles and Tractors. *Nauka v tsentralnoy Rossii* = Science in the Central Russia. 2021; (1):69-79. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-1-69-79>

6. Semenikhin B.A., Kuznetsova L.P., Latypov R.A. Recovery and Hardening of Details of Auto-tractor Technics by Composite Galvanic Coverings with Use of Powders of the Scraps of Rigid Alloys Received Electroerosive Dispersion. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2012; 109(2):57-60. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18190495> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

7. Pogozhev Yu.S., Levashov Ye.A., Kudryashov A.Ye., et al. [Self-Propagating High-Temperature Synthesis Composites Based on Titanium Carbide and Nickelide, Alloyed with Refractory Nanocomponents]. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya* = Powder Metallurgy and Functional Coatings. 2012; (2):24-32. Available at: <https://powder.misis.ru/jour/issue/view/19> (accessed 01.05.2021). (In Russ.)

8. Verkhotur A.D., Ivanov V.I., Dorokhov A.S., et al. Effect of the Nature of Electrode Materials on Erosion and Properties of Doped Layers. The Criteria for Evaluating the Effectiveness of Electrospray Alloying. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):302-320. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.302-320>

9. Zhachkin S.Yu., Astakhov M.V., Zibrov G.V., et al. Modeling of the Deposition Process on the Metal Surface of Multilayer Composites Based on Continuum Mechanics. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2014; 114(1):122-127. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21308815> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
10. Shiryayeva L.S., Nozdrin I.V., Galevskiy G.V., Rudneva V.V. Application of Chromium Nanocarbonitride in Galvanic Composition Coatings on the Basis of Nickel. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrialnogo universiteta = Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2014; (3):48-52. Available at: <https://clck.ru/WkSFX> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
11. Nozdrin I.V., Rudneva V.V., Galevskiy G.V. [Galvanic Zinc-Chromium Diboride Composite Coatings: Electrodeposition and Properties]. *Vestnik gorno-metallurgicheskoy sektsii Rossiyskoy akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii = Bulletin of the Mining and Metallurgical Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Department of Metallurgy*. 2014; (32):107-112. Available at: <https://www.sibsiu.ru/downloads/public/vestnikgmsraen/32.pdf> (accessed 01.05.2021). (In Russ.)
12. Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Zhivogin A.A. Design of the Tensely-Deformed State of Superficial Layer at Causing of Composite Coverages by GCP Method. *Mashinno-tekhnologicheskaya stantsiya = Machine and Technology Station*. 2013; (2):29-34. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19129477> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
13. Startsev V.O., Molokov M.V., Blaznov A.N., et al. Determination of the Heat Resistance of Polymer Construction Materials by the Dynamic Mechanical Method. *Polymer Science, Series D*. 2017; 10(4):313-317. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/s1995421217040141>
14. Shiryayeva L.S., Nozdrin I.V., Galevskii G.V., Rudneva V.V. Study of Physical and Mechanical Properties of Electrodeposited Nickel-Nanokarbonitrid Chromium Composite. *Perspektivnye materialy = Inorganic Materials: Applied Research*. 2014; (7):62-67. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21801155> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
15. Kuksa L.V., Arzamaskova L.M. Method for Determining the Elastic Properties of Single-Phase Metals. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2013; 79(3):60-62. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18888962> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
16. Bulychev S.I., Kalmakova A.V., Kravchenkov A.N. Determination of Young's Modulus from Hardness. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2009; 75(9):63-66. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12890609> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
17. Bulychev S.I., Poroshin V.V., Alekhin V.P. [Kinetic Indentation and Hysteresis in the Print]. *Deformatsiya i razrusheniye = Deformation and Fracture of Materials*. 2006; (8):39-46. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11969161> (accessed 01.05.2021). (In Russ.)
18. Bogodukhov S.I., Garipov V.S., Solosina Ye.V. The Elasticity Modulus of Various Materials by Means of Strain Gauges. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the Orenburg State University*. 2014; (4):289-294. Available at: <https://clck.ru/WkVyk> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
19. Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Krasnov A.I., Manayenkov K.A. Analytical Evaluation of the Properties of Dispersion-Strengthened Galvanic Composite Multilayer Coatings. *Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Michurin State Agrarian University Bulletin*. 2015; (1):142-149. Available at: [http://www.mgau.ru/sciense/journal/PDF\\_files/1-2015.pdf](http://www.mgau.ru/sciense/journal/PDF_files/1-2015.pdf) (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
20. Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Krasnova M.N. Dispersion-Hardened Composite Coatings with Desired Physical and Mechanical Properties. *Engineering Computations*. 2017; 34(8):2577-2585. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43036928> (accessed 01.05.2021). (In Eng.)
21. Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Sidorkin O.A., Nelysov S.V. Manage Internal Stresses in the Plating of Composite Coatings Based on Iron. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2017; 129:183-187. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30593131> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
22. Chen Q., Li D.Y. Computer Simulation of Solid-Particle Erosion of Composite Materials. *Wear*. 2003; 255(1-6):78-84. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00065-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00065-6)

23. Khakiev Z.B., Kruglikov A.A., Yermolov Ya.M., Yavna V.A. Computer Model Operation of the Foundation Properties of the Railway Track's Ballast Prism with Joint Grouting Polymeric Binding on the Basis of Polyurethane. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. 2018; (3):142-152. Available at: [http://vestnik.rgups.ru/wp-content/uploads/2018/10/2018\\_3\\_vestnik\\_rgups\\_a.pdf](http://vestnik.rgups.ru/wp-content/uploads/2018/10/2018_3_vestnik_rgups_a.pdf) (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
24. Voronin N.A. Analysis of the Mechanisms of Deformation of Topocomposites by Modeling of the Indentation Load-Displacement Curves. *AIMS Materials Science*. 2019; 6(3):397-405. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3934/matricsci.2019.3.397>
25. Vasilev V.I., Vasileva M.V., Nikiforov D.Ia. Solving One Phase Filtration Problems Using Finite Element Method on Computing Cluster. *Vestnik Severo-Vostochnogo federalnogo universiteta im. M.K. Ammosova* = Vestnik of North-Eastern Federal University. 2016; (6):8-17. Available at: <https://clck.ru/TFXvw> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
26. Vlasenko V.D., Ivanov V.I., Aulov V.F., et al. Modelling the Temperature Field of a Surface in Using Electrospark Alloying of Metals. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(2):218-233. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.218-233>
27. Ivanov V.I., Burumkulov F.K. Hardening of Objects and the Increase of Their Lifetime by the Electrospark Method: The Object Classification and the Specific Features of the Technology. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2010; 46(5):416-423. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/s1068375510050042>
28. Grigorev S.N., Kovalev O.B., Kuzmin V.I., et al. New Possibilities of Plasma Spraying of Wear-Resistant Coatings. *Journal of Friction and Wear*. 2013; 34(3):161-165. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366613030070>

*Received 26.04.2021; approved after reviewing 20.05.2021; accepted for publication 01.06.2021*

*About the authors:*

**Sergey Yu. Zhachkin**, Professor of the Chair of Automated Equipment for Machine Building Production, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy Prospekt, Voronezh 394026, Russian Federation), D.Sc. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1844-5011>, zhach@list.ru

**Anatoliy I. Zavrazhnov**, Professor of the Chair of Technological Processes and Technosphere Safety, Michurinsk State Agrarian University (101 Internatsionalnaya St., Michurinsk 393760, Russian Federation), Academician of RAS, D.Sc. (Engr.), aiz@mgau.ru

**Nikita A. Penkov**, Head of the Laboratory for Methodological Support of Educational Activities, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy (54A Starykh Bolshevikov St., Voronezh 394064, Russian Federation), Cand.Sc. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4644-3814>, myth\_np\_nikit@mail.ru

**Alexei V. Martynov**, Associate Professor of the Technical Service Machines Chair of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sc. (Engr.), Researcher ID: AAR-8786-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4744-4373>, martynov-230685@yandex.ru

**Roman N. Zadorozhny**, Leading Researcher of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), Cand.Sc. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8007-0732>, Scopus ID: 57215670358, bosun\_007@mail.ru

*Contribution of the authors:*

S. Yu. Zhachkin – formulation of the basic research concept and analysis of the results.

A. I. Zavrazhnov – methodological guidance.

N. A. Penkov – experimental studies.

A. V. Martynov – writing the draft.

R. N. Zadorozhny – drawing the conclusions.

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



## Влияние добавки хрома и режимов при электроискровом легировании алюмоматричным анодным материалом стали 45

С. В. Николенко<sup>1</sup>, Л. А. Коневцов<sup>1</sup>, П. С. Гордиенко<sup>2</sup>,  
Е. С. Панин<sup>2</sup>, С. А. Величко<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН «Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук» (г. Хабаровск, Российская Федерация)

<sup>2</sup>ФГБУН «Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук» (г. Владивосток, Российская Федерация)

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарева» (г. Саранск, Российская Федерация)

\*[velichko2005@yandex.ru](mailto:velichko2005@yandex.ru)

**Введение.** Электроискровое легирование используется для получения упрочняющих покрытий. К анодным материалам, обладающим уникальными свойствами, относят алюмоматричные композиционные материалы на основе алюминия. Цель работы – разработка новых анодных алюмоматричных композиционных материалов с высокими показателями эффективности при электроискровом легировании углеродистой стали 45.

**Материалы и методы.** В качестве подложки (катода) использовалась конструкционная углеродистая сталь 45. Алюмоматричные материалы выбраны в качестве анодных. Величину привеса катода и эрозию анода определяли гравиметрическим методом на электронных весах Shinko Denshi HTR-220 CE с точностью  $\pm 10^{-4}$  г. Для исследования микроструктуры и металлографии поверхности анодных материалов использовался микроскоп EVO-50 XVP и Altami MET 3 АПО фирмы С. ZEISS. Для изучения покрытий на микроабразивный износ применялся прибор CALOTEST CSM Instruments.

**Результаты исследования.** Разработана методологическая схема достижения эффективности параметров электроискрового легирования и свойств легированного слоя в зависимости от состава анодного металломатричного композиционного материала на основе алюминия с добавлением хрома и режимов обработки. Для нанесения материала анода при электроискровом легировании установлен режим электроискровой установки «ИМЭЛ» с энергией импульсов 14,4 Дж. Найдено, что после электроискрового легирования стали 45 твердость и износостойкость поверхности возрастают в 2-3 раза, жаростойкость – в 5-18 раз.

**Обсуждение и заключение.** Получены ряды увеличения массы катода, эрозионной стойкости электродных материалов, коэффициента массопереноса, жаростойкости, твердости и износостойкости легированного слоя. Они являются удобным инструментом для достижения тех или иных параметров эффективности при электроискровом легировании в зависимости от выбранного анодного материала и режимов обработки.

**Ключевые слова:** электроискровое легирование, анодные металломатричные материалы, твердость, износостойкость, жаростойкость

© Николенко С. В., Коневцов Л. А., Гордиенко П. С., Панин Е. С., Величко С. А., 2021



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

**Для цитирования:** Влияние добавки хрома и режимов при электроискровом легировании алюмоматричным анодным материалом стали 45 / С. В. Николенко, Л. А. Конецов, П. С. Гордиенко [и др.]. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202103.449-469](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.449-469) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 3. – С. 449–469.

Original article

## Effect of Chromium Addition and Regimes during Electrospark Alloying with Aluminum Matrix Anode Material of Steel 45

S. V. Nikolenko<sup>a</sup>, L. A. Konevtsov<sup>a</sup>, P. S. Gordienko<sup>b</sup>,  
E. S. Panin<sup>b</sup>, S. A. Velichko<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Materials Science of Far East Branch of the Russian Academy of Sciences (Khabarovsk, Russian Federation)*

<sup>b</sup>*Institute of Chemistry of Far East Branch of the Russian Academy of Sciences (Vladivostok, Russian Federation)*

<sup>c</sup>*National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)*

\*[velichko2005@yandex.ru](mailto:velichko2005@yandex.ru)

**Introduction.** Electrospark alloying is used to produce hardening coatings. Anodic materials with unique properties include metal matrix composites based on aluminum. The aim of the work is to develop new aluminum matrix anode composite materials with high efficiency indicators during electrospark alloying of carbon steel 45.

**Materials and Methods.** Structural carbon steel 45 was used as the substrate (cathode). Aluminum matrix materials are chosen as the anode materials. The value of the cathode weight increment and the anode erosion were determined by the gravimetric method on the Shinko Denshi HTR-220 CE electronic scale with an accuracy of  $\pm 10^{-4}$  g. To study the microstructure and metallography of the surface of the anode materials, the microscopes EVO-50 XVP and Altami MET 3 APO from S. ZEISS were used. The device CALOTEST CSM Instruments was used to study coatings for microabrasive wear.

**Results.** There is developed a methodological scheme for achieving the efficiency of the electric spark alloying parameters and the properties of the doped layer depending on the composition of the anodic metal matrix composite material based on aluminum with the addition of chromium and processing modes. The mode of Institute of Materials Science electrospark installation with pulse energy of 14.4 J was set for anode material application during electrospark alloying. It is established that after electric spark alloying of steel 45, the hardness and wear resistance of the surface increase by 2-3 times, and the heat resistance – by 5–18 times.

**Discussion and Conclusion.** The series of increasing the cathode mass, the erosion resistance of the electrode materials, mass transfer coefficient, heat resistance, hardness and wear resistance of the alloyed layer are obtained. The obtained series are a convenient tool for achieving various efficiency parameters in electric spark alloying depending on the selected anode material and processing modes.

**Keywords:** electric spark alloying, anodic metal matrix materials, hardness, wear resistance, heat resistance

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

**For citation:** Nikolenko S.V., Konevtsov L.A., Gordienko P.S., et al. Effect of Chromium Addition and Regimes during Electrospark Alloying with Aluminum Matrix Anode Material of Steel 45. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(3):449-469. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.449-469>

## Введение

В последнее время перед учеными-материаловедами стоят задачи по разработке технологических процессов получения упрочняющих покрытий, используемых в машиностроении, обладающих высокой твердостью, износостойкостью, жаростойкостью и другими свойствами. Для нанесения упрочняющих покрытий актуален метод электроискрового легирования (ЭИЛ). В основе метода ЭИЛ лежит электрическая искра как технологический инструмент, который разрушает электрод (анод) и формирует на поверхности детали (катоде) покрытия с заданными функциональными свойствами. Методом ЭИЛ можно наносить любой токопроводящий материал. К анодным материалам, обладающим уникальными механическими, технологическими и специальными свойствами, относят алюмоматричные композиционные материалы (АМКМ) [1–4].

Весьма остро стоит вопрос о соответствии поверхностей деталей своему функциональному назначению. Важно решить проблемы повышения долговечности, надежности трибосопряжений, снижения энергозатрат [5; 6]. В связи с этим особое значение приобретают работы по созданию принципиально новых анодных антифрикционных материалов и электроискровых покрытий с гетерофазной структурой, в том числе стехиометрического состава интерметаллидов и нестехиометрического состава соединений АМКМ бертоллидного типа.

Введение в алюминиевые сплавы армирующих частиц микронных размеров с твердостью, отличной от матрицы, позволяет расширить область существования во фрикционном контакте вторичных структур вследствие возросшей гетерогенности.

При таком сочетании структур и фаз после обработки рабочих по-

верхностей деталей методом ЭИЛ анодом из АМКМ прогнозируется расширение температурных интервалов работы и повышение триботехнических свойств измененного поверхностного слоя [1; 3].

Цель работы – разработка новых анодных алюмоматричных композиционных материалов с высокими показателями эффективности при ЭИЛ углеродистой стали 45.

## Обзор литературы

Для получения и упрочнения исполнительных поверхностей деталей предполагается использование эффективных физикохимических процессов и различных методов [4–7]. Среди таких технологий выделяется ЭИЛ [2; 4; 8].

При использовании в качестве анодных материалов интерметаллидов NiAl, Ni<sub>3</sub>Al, TiAl в процессе ЭИЛ ряда алюминий-титановых систем (BT9, BT18, BT3-1), в частности Al<sub>7%</sub>-Ti<sub>87%</sub>-Mo<sub>3%</sub>-Zr<sub>2%</sub>, А. Д. Верхотуров обнаружил в составе легированного слоя (ЛС) значительное количество интерметаллидных фаз, обладающих высокой жаростойкостью: NiAl, TiN, Ni<sub>3</sub>Ti, Al<sub>3</sub>Ti, AlNi<sub>3</sub>, а также  $\gamma$  Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub> [2; 9–11]. При ЭИЛ систем Al<sub>8,2%</sub>-Ti<sub>77%</sub>-Zr<sub>12%</sub>-Mo<sub>1%</sub>-Nb<sub>1%</sub> и Al<sub>7%</sub>-Ti<sub>86%</sub>-Mo<sub>3%</sub>-Cr<sub>2,3%</sub>-Zr<sub>0,5%</sub>-Si<sub>0,4%</sub> указанными интерметаллидами, помимо исходных материалов, в ЛС наблюдался интерметаллид AlTi<sub>2</sub> [12–15]. «Температуры, создаваемой в области разряда, было достаточно для разложения Ni<sub>3</sub>Al и растворения Al в Ti с образованием новых интерметаллидов. Выявлено, что ЭИЛ указанными анодными материалами повышает микротвердость ЛС в 2 раза, в сравнении с микротвердостью основы, а также повышает износостойкость» [14]. При этом материал анода в основном переносится без значительного изменения фазового состава.

Впоследствии данные этих исследований сыграли роль в создании и использовании в качестве анодных материалов АМКМ, содержащих тугоплавкие компоненты. Показано создание АМКМ, содержащих тугоплавкие компоненты SiC, AlN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> или BN, полученные методом искрового плазменного спекания [4]. При этом армирующий компонент диспергировался в непрерывном матричном компоненте, а композит обладал лучшими характеристиками, такими как прочность, жесткость, износостойкость, обрабатываемость, высокая теплопроводность, низкий коэффициент теплового расширения [9].

Особый интерес представляют АМКМ, усиленные твердыми частицами для повышения износостойкости, жаростойкости, твердости исполнительных поверхностей электроискровыми технологиями. В частности, актуальны АМКМ с добавками мелкодисперсных керамических частиц SiC [10–13], такие алюминиевые системы эффективны для использования в качестве исполнительных поверхностей трения изделий тормозных систем роторного или барабанного типа, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – для цилиндров автомобильных двигателей, приводных валов грузовых автомобилей, шпилек шин [14–16]. Перспективными считаются работы по созданию АМКМ с добавками AlN [17; 18]; Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [19]; BN [20; 21]; квазикристаллов [22; 23], наночастиц [24]. Добавка к матричному Al позволяет увеличить область применения за счет значительного повышения уровня физико-механических и эксплуатационных свойств, расширения температурно-силовых интервалов работы изделий [25; 26].

Актуальность этой проблемы много лет мотивирует ученых США [27–29]. Исследования проводятся в Германии [30; 31], Японии [32–34], Китае [35; 36], а также в нашей стране [37; 38].

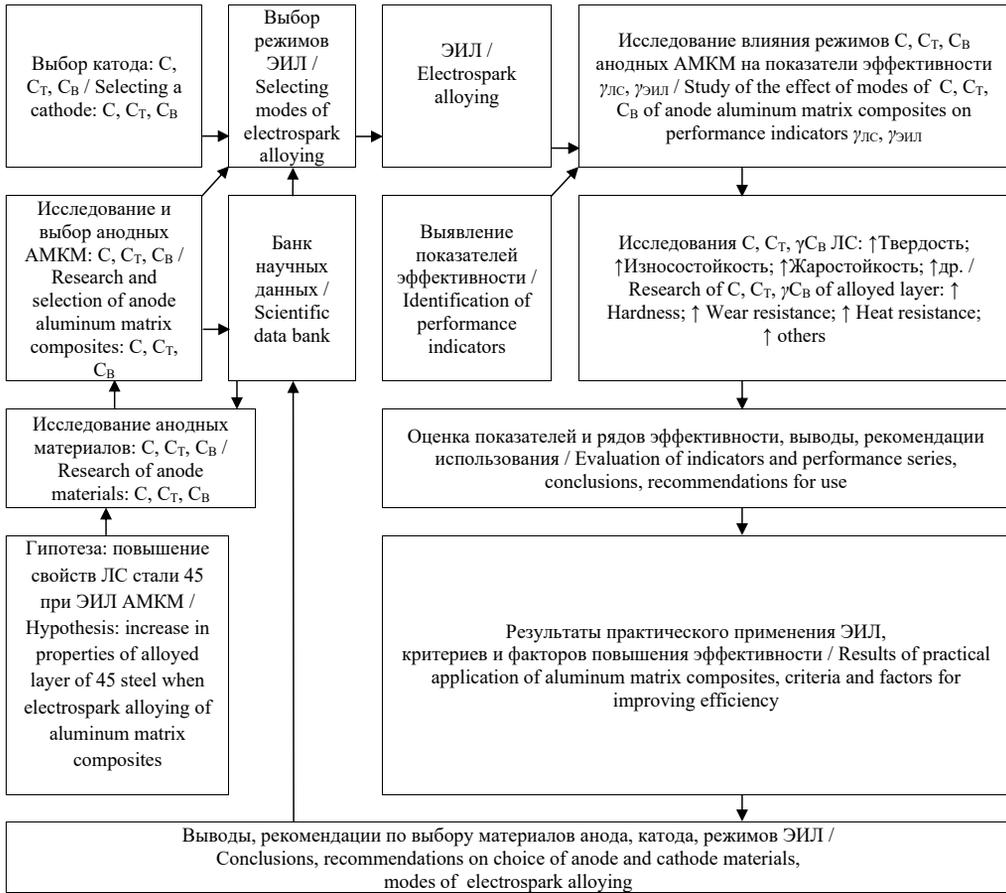
## Материалы и методы

Процесс ЭИЛ физически основан на искровом разряде в газовой среде, при котором происходит преимущественно эрозия материала анода и перенос продуктов эрозии (ПЭ) на катод. На поверхности катода образуется ЛС модифицированной структуры и состава, что обусловлено перемещением и конвективным перемешиванием в микрощельной расплава материала при импульсных тепловых и механических нагрузках, возникающих при воздействии искрового разряда [4].

В качестве подложки (катода) использовалась конструкционная сталь 45, широко применяемая в машиностроении. В качестве анодных материалов выбраны АМКМ, которые получали методом металлотермии с учетом свойств алюминия, не образующего непрерывных твердых растворов с другими элементами [3]. Учитывалось, что Al образует ограниченные твердые растворы и химические соединения с различными элементами. Для исследований отобраны две группы алюмоматричных материалов: 1) А: Al-Ti-Ni-Zr; 2) Б: Al-Ti-Cr-Ni-Zr (далее А и Б).

Исследовались алюмоматричные материалы по методологической схеме (рис. 1), исходным звеном которой является формулировка гипотезы повышения свойств ЛС исполнительных рабочих поверхностей стали 45 в результате ЭИЛ АМКМ, которая мотивировала создание научного банка данных ряда функциональных АМКМ для исследований с привлечением известных теоретических и практических сведений.

Такие анодные материалы были изготовлены для исследования состава, структуры, свойств. На основании полученных сведений по АМКМ и материалу катода, в соответствии с разработанной методологической схемой, был выполнен предварительный подбор ЭИЛ и проведены исследования



Р и с. 1. Методологическая схема исследований: С – состав; С<sub>Т</sub> – структура; γС<sub>В</sub> – показатели свойств ЛС после ЭИЛ

F i g. 1. Methodological research framework: С – composition; С<sub>Т</sub> – structure; γС<sub>В</sub> – property values alloyed layer after aluminum matrix composites

влияния режимов, состава, структуры и свойств АМКМ на показатели эффективности по формированию ЛС при ЭИЛ. Затем (в соответствии с указанной схемой) были выполнены исследования состава, структуры и свойств ЛС и других показателей эффективности ЭИЛ стали 45: твердости, износостойкости, жаростойкости.

В процессе ЭИЛ удельной поверхности (1 см<sup>2</sup>) определялось изменение массы исследуемых образцов катода стали 45 и эрозии анода от времени ЭИЛ с различными электрическими

параметрами. В качестве генератора импульсов при ЭИЛ использовалась установка, разработанная в ФГБУН «Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук», со следующими режимами обработки: скважность  $t_{\text{ск}} = 50\text{--}25\%$ , длительность разрядных импульсов  $t_p = 40\text{--}80$  мкс, рабочий ток  $I_p = 195\text{--}225$  А, напряжение 40 В, частота разрядных импульсов  $f = 500$  Гц. Для сравнения опытным путем выбраны два режима: 1)  $t_{\text{ск}} = 50\%$ ,  $t_p = 40$  мкс (далее режим  $t_{\text{ск}} / t_p = 50 / 40$

обозначен как «'»); 2)  $t_{\text{ск}} = 25$ ,  $t_{\text{р}} = 80$  (режим 25 / 80, далее «"»). Максимальная энергия разряда в импульсе  $E' = 3,12$  Дж при использовании режимов ЭИЛ 50 / 40 и  $E'' = 14,4$  Дж при 25 / 80.

Величины привеса катода и эрозии анода определялись гравиметрическим методом на электронных весах Shinko Denshi НТR-220 СЕ с точностью  $\pm 10^{-4}$  г. Для исследования микроструктуры поверхности анодных материалов, топологии и элементного состава покрытий использовали сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) EVO-50 XVP фирмы С. ZEISS, оборудованный комплексом INCA ENERGY 350. Для металлографического, гранулометрического, дюраметрического анализов применялся микроскоп Altamі MET 3 АПО, дериватограф Q-1000. Исследования покрытий на микроабразивный износ проводились на приборе CALOTEST CSM Instruments путем воздействия вращающегося корундового шарика диаметром 20 мм на плоский образец с добавлением эмульсии, содержащей абразивные частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $d \sim 6$  мкм).

### Результаты исследования

Общий вид поверхности и химический состав в местах забора проб образцов анодных материалов А и Б показан на рисунке 2.

Химический анализ в различных местах забора проб показал, что анодный материал А неоднороден, анализируемые по цвету фазы (светлая, серая, темная) состоят из следующих элементов (вес, %): Al (8,8–29,6), Ti (2,4–15,0), Ni (13,3–68,0), Zr (2,3–8,6); Б: Al (11,9–36,2), Ti (1,0–16,5), Ni (24–57,1), Zr (2,4–14,4), Cr (3,8–21,4).

Как показал рентгенофазовый анализ (РФА) анодных материалов А и Б, большой разброс отклонений величин, а также добавка Cr в материал Б являются следствием формирования различных фаз анодных материалов: А –  $\text{Al}_2\text{NiTi}$ ,

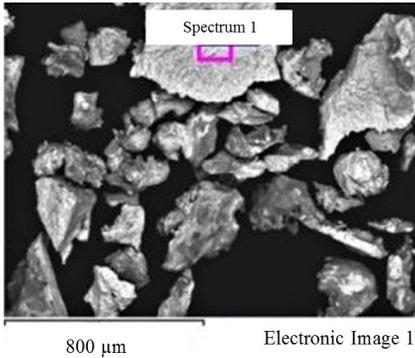
$\text{Al}_{0,42}\text{Ni}_{0,58}$ ,  $\text{Ni}_{0,35}\text{Al}_{0,3}\text{Ti}_{0,35}$ ,  $\text{Al}_3\text{Zr}_4$ ,  $\text{Al}_5\text{Ni}_3\text{Zr}_2$ ; Б –  $\text{Al}_{1,1}\text{Ni}_{0,9}$ ,  $\text{Al}_3\text{Ni}$ ,  $\text{Al}_2\text{Ti}$ ,  $\text{Al}_3\text{Ti}$ ,  $\text{Cr}_{0,7}\text{Ni}_{1,3}\text{Zr}$ ,  $\text{Cr}_2\text{Ti}$ ,  $\text{Al}_3\text{Zr}_5$ , NiTi.

Таким образом, полученные анодные материалы представляют собой систему фаз стехиометрического состава интерметаллидов и нестехиометрического состава соединений бертоллидного типа, характеризующихся переменной валентностью.

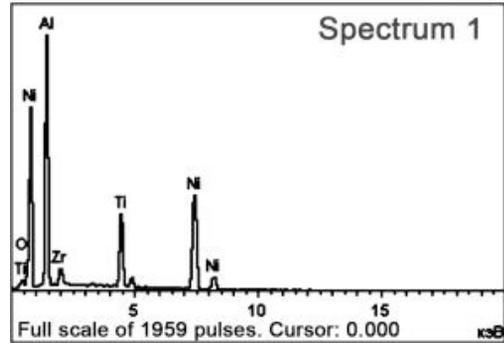
Для установления общих закономерностей эрозии АМКМ при ЭИЛ были выполнены исследования состава ПЭ по группам размеров (рис. 2), позволившие определить характер разрушения.

Элементный анализ (энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия), проведенный на СЭМ, показал, что при ЭИЛ анодным материалом А" с режимами  $t_{\text{ск}} / t_{\text{р}} = 25 / 80$  (рис. 2а) формируются крупные ПЭ хрупкофазного разрушения (частицы с размерами до 90–1 000 мкм), средние (30–90 мкм) и мелкие (менее 30 мкм), в том числе ПЭ парагазовой фазы (менее  $10^{-4}$  мм). В состав крупных ПЭ входят в основном элементы, имеющие большое химическое сродство с кислородом: Al (22,6–29,1), Ti (10,2–13,4), Ni (50,1–59,2), Zr (2,9–5,6). ПЭ средних размеров (30–90 мкм) включают в себя следующие элементы: Al (22,2–22,7), Ti (8,6–12,1), Ni (14,0–53,6), Zr (6,1–7,6), оплавленный Fe (2,0–2,2). Мелкие ПЭ (менее 30 мкм) содержат Al (17,0–22,2), Ti (8,8–10,2), Ni (8,7–24,9), Zr (5,8–6,1) и оплавленный Fe (0,5–2,2). Как видно, с уменьшением размеров ПЭ в их составе уменьшается доля Ni, а доля матричного элемента Al, Ti и Zr меняется незначительно.

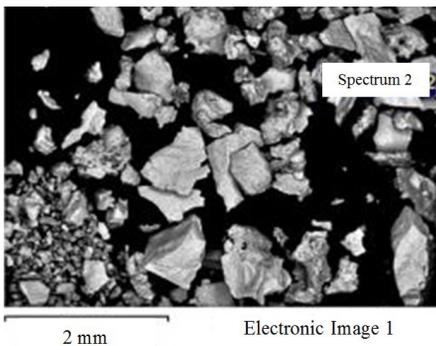
При ЭИЛ (режим  $t_{\text{ск}} / t_{\text{р}} = 50 / 40$ ) анодным материалом Б' (рис. 2с) в ПЭ появляется Cr. Крупные ПЭ достигают 90–1 100 мкм и представлены следующими металлами: Al (34,3), Ti (1,4), Cr (3,4), Ni (59,1). Среди них встречаются оплавленные ПЭ Fe (1,8).



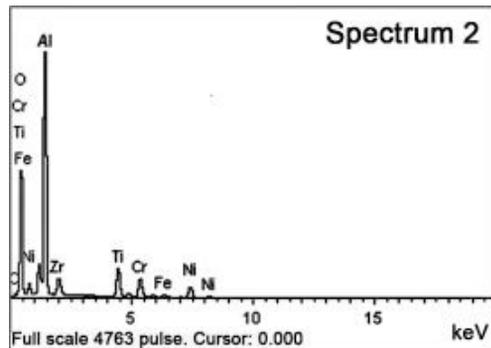
a)



b)



c)



d)

Р и с. 2. Общий вид поверхности и химический состав в местах заора проб образцов анодных материалов А и Б: а) микроструктура исследуемых анодных АМКМ Al-Ti-Ni-Zr; б) элементный состав в местах заора проб анодных АМКМ Al-Ti-Cr-Ni-Zr; в) микроструктура исследуемых анодных АМКМ Al-Ti-Ni-Zr; д) элементный состав в местах заора проб анодных АМКМ Al-Ti-Cr-Ni-Zr

Fig. 2. General surface view and chemical composition at the sampling sites of anode materials A and B: a) microstructure of the studied anode aluminum matrix anode materials Al-Ti-Ni-Zr; б) elemental composition at sampling sites of anode aluminum matrix anode materials Al-Ti-Cr-Ni-Zr; в) microstructure of the studied anode aluminum matrix anode materials Al-Ti-Ni-Zr; д) elemental composition at sampling sites of anode aluminum matrix anode materials Al-Ti-Cr-Ni-Zr

Частицы средних размеров 30–50 мкм содержат: Al (39,8), Ti (7,3), Cr (14,8), Ni (22,1), Zr (5,0) и оплавленный Fe (2,7). Мелкие ПЭ, менее 30 мкм: Al (27,2), Ti (6,8), Cr (6,0), Ni (6,8), Zr (5,9) и оплавленный Fe (1,4), в том числе ПЭ парогазовой фазы (менее  $10^{-4}$  мм). С уменьшением размеров ПЭ в их составе незначительно меняется вес матричного элемента Al, почти на

порядок уменьшается вес связки Ni и возрастает вес тугоплавких добавок Ti, Cr и Zr.

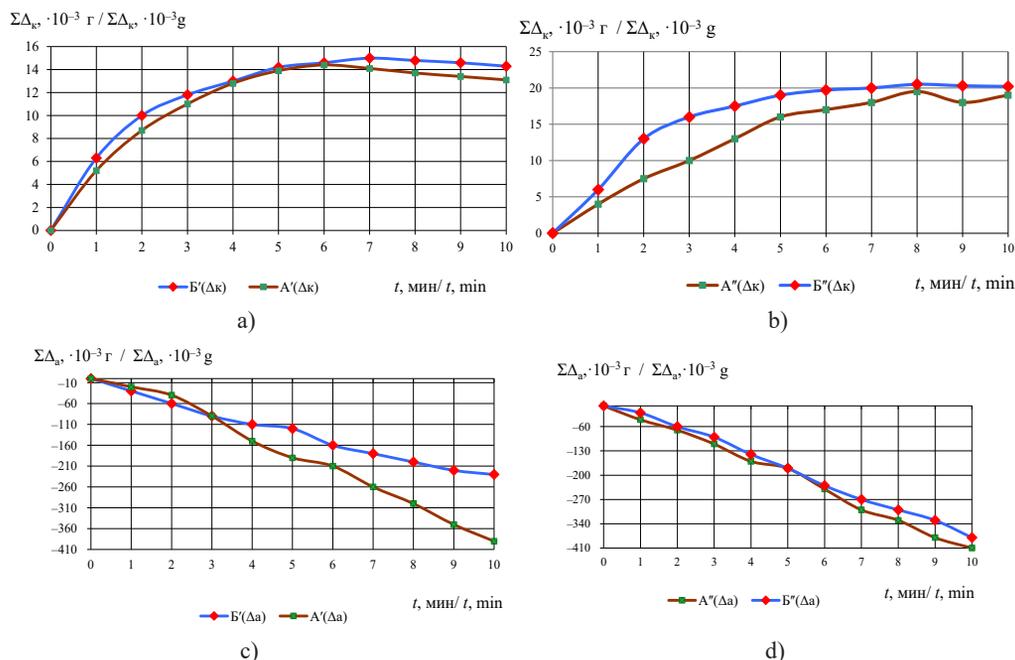
Исследования электропереноса АМКМ на подложку из стали 45 (рис. 3) подтвердили, что условия большего массопереноса при формировании ЛС обеспечиваются при низкой эрозионной стойкости анода и соотношении температур плавления анода

и катода  $T_a < T_k$  [4; 5]. Величины суммарной эрозии  $\Sigma\Delta_a$  (рис. 3с, 3d) при  $t = 10$  мин ЭИЛ, созданных АМКМ, достигали значений  $\Sigma\Delta_{a(10\text{мин})}$  от  $231,7 \cdot 10^{-3}$  до  $408,7 \cdot 10^{-3}$  г. Полученный ряд эрозионной стойкости  $\Sigma\Delta_{a(\text{эп.ст.}10\text{мин})}^{-1}$  анодных материалов при изменении режимов обработки  $B'' \rightarrow A'' \rightarrow A' \rightarrow B'$  (ряд 1\*) показал, что наибольшей эрозионной стойкостью отличаются электродные материалы  $B'$  и  $A'$  ( $\Sigma\Delta_{a(10\text{мин})} = 231,7 \cdot 10^{-3}$  и  $385,9 \cdot 10^{-3}$  г соответственно) при режимах ЭИЛ  $t_{\text{ск}}/t_{\text{п}} = 50/40$ , а наименьшей –  $A''$  и  $B''$  ( $\Sigma\Delta_{a(10\text{мин})} = 408,7 \cdot 10^{-3}$  и  $392,3 \cdot 10^{-3}$  г соответственно) при  $t_{\text{ск}}/t_{\text{п}} = 25/80$ . Поэтому лучшие ожидаемые результаты массопереноса предполагалось получить при ЭИЛ анодными материалами при режимах  $B''$ ,  $A''$ .

Экспериментально полученные кривые массопереноса  $\Sigma\Delta_k$  при ЭИЛ ста-

ли 45 анодными материалами с режимами  $A'$ ,  $B'$ ,  $A''$ ,  $B''$  относятся к классу «кривых Лазаренко» (рис. 3а, 3б) [2; 6]. Наибольшие значения величины массопереноса  $\Sigma\Delta_k$  наблюдались при  $t = 6-8$  мин при ЭИЛ удельной площади поверхности  $1 \text{ см}^2$ , после чего до  $t = 10$  мин процесс ЭИЛ стабилизировался и прироста  $\Sigma\Delta_k$  не наблюдалось.

Во всех случаях при  $t = 10$  мин и режимах  $t_{\text{ск}}/t_{\text{п}} = 25/80$  величина значений  $\Sigma\Delta_k$  была больше (в 1,4-1,5 раза), чем при режимах  $t_{\text{ск}}/t_{\text{п}} = 50/40$ , и достигала наибольших значений  $\Sigma\Delta_k = 20,6 \cdot 10^{-3}$  г при  $t = 8$  мин ЭИЛ анодным материалом  $B''$ . При  $t = 10$  мин наибольшее значение величины  $\Sigma\Delta_k = 20,2 \cdot 10^{-3}$  г наблюдалось при ЭИЛ анодным материалом  $B''$ , наименьшее  $\Sigma\Delta_k = 13,1 \cdot 10^{-3}$  г – при ЭИЛ материалом  $A'$ . Получен ряд привеса исследуемых анодных материалов, с учетом изменения режимов обработки,



Р и с. 3. NURBS-кривые кинетики процесса ЭИЛ стали 45 анодными материалами А, Б при ЭИЛ с режимами: а), с)  $t_{\text{ск}}/t_{\text{п}} = 50/40$ ; б), д)  $t_{\text{ск}}/t_{\text{п}} = 25/80$

Fig. 3. NURBS-kinetics curves of the electrospark alloying process of steel 45 anode materials А, Б at electrospark alloying with the modes: а), с)  $t_{\text{ск}}/t_{\text{п}} = 50/40$ ; б), д)  $t_{\text{ск}}/t_{\text{п}} = 25/80$

$A' \rightarrow B' \rightarrow A'' \rightarrow B''$  (ряд 2\*), из которого видно, что наибольший привес при  $t = 10$  мин ЭИЛ у анодных хромсодержащих АМКМ А'' и Б'' ( $\Sigma\Delta_k = 19,6 \cdot 10^{-3}$  и  $20,2 \cdot 10^{-3}$  г соответственно при  $t_{ck} / t_p = 25 / 80$ ) и наименьший у А' и Б' ( $\Sigma\Delta_k = 13,1 \cdot 10^{-3}$  и  $14,3 \cdot 10^{-3}$  г соответственно при  $t_{ck} / t_p = 40 / 50$ ).

Коэффициент электропереноса во всех случаях имел наибольшие величины значений в первые 1–3 мин ЭИЛ, достигая  $\Sigma K_{п.ср.} = 22\text{--}27\%$  при ЭИЛ анодными материалами с режимами А', Б', и наименьшие  $\Sigma K_{п.ср.} = 4,8\text{--}5,1\%$  при А'', Б'' и  $t = 10$  мин (рис. 4). В связи с формированием «вторичных структур» на поверхностях электродов значения величин  $\Sigma K_{п.ср.}$  постепенно уменьшались из-за длительности процесса ЭИЛ и образования «вторичного» массопереноса.

Получен ряд средних значений коэффициента переноса  $\Sigma K_{п.ср.}$  при ЭИЛ исследуемыми анодными материалами и режимами обработки (ряд 3\*):  $B'' \rightarrow A' \rightarrow A'' \rightarrow B'$ .

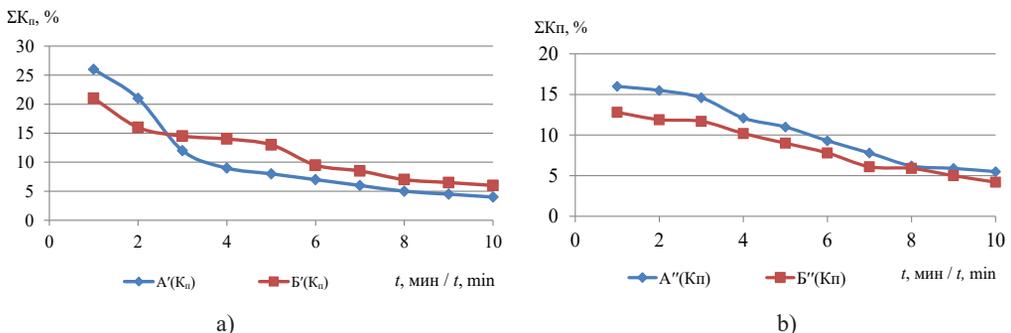
Как видно, полученные ряды 1–3 параметров эффективности ЭИЛ не совпадают между собой, в силу чего на практике используют предложенный А. Д. Верхотуровым критерий формирования ЛС:  $\gamma_{ф.лс} = \Sigma\Delta_k \cdot t_{эил} \cdot \Sigma K_{п.ср.}$ , где

$\Sigma K_{п.ср.} = \Sigma\Delta_{k,ср.} / \Sigma\Delta_{a,ср.}$ , который также можно представить в виде ряда (ряд 4\*)  $A' \rightarrow B' \rightarrow B'' \rightarrow A''$ , отражающего совокупность величин значений полученных рядов 1–3 [4]. Пользуясь данным критерием, можно увидеть, что наиболее неблагоприятные условия формирования обеспечиваются при ЭИЛ материалом А' ( $\gamma_{ф.лс} = 13,1$ ), а при ЭИЛ А'' ( $\gamma_{ф.лс} = 20,4$ ) условия формирования ЛС выше в 1,6 раза.

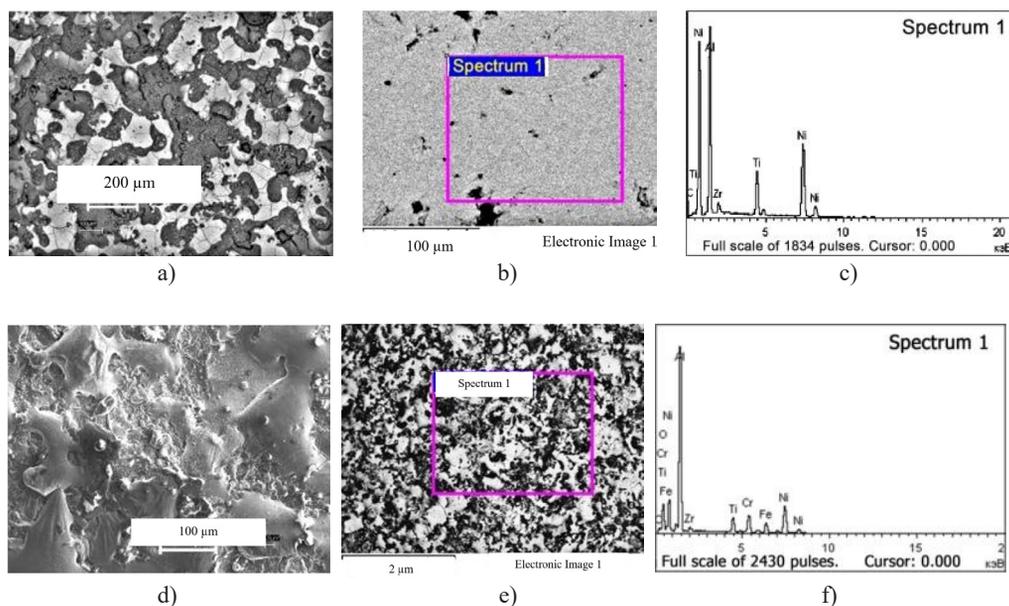
#### Исследование свойств ЛС и эффективности ЭИЛ

Элементный анализ показал, что состав ЛС имеет переменный характер в местах забора проб с преобладанием матричного алюминия, а также связующего никеля (рис. 5).

Выявлено, что при ЭИЛ анодным материалом А' (режим 50 / 40) формируется ЛС, который содержит С (3,0–4,4); О (2,5 (светлая фаза) и 23,6 (темная фаза)); Al (30,2–38,8); Ti (8,6–12,2); Ni (11,3–55,3 (светлая фаза)); Zr (1,7–6,3). При ЭИЛ А'' (25 / 80) С (3,8–4,4); О (3,0 (светлая фаза) и 20,4 (темная фаза)); Al (22,3–54,4); Ti (5,7–7,9); Ni (5,5–45,7); Zr (1,7–5,3). При ЭИЛ анодным хромсодержащим АМКМ Б' (режим 50 / 40) ЛС содержит С (2,3–6,1); О (1,5–26,2); Al (35,8–45,1); Ti (4,1–5,8); Cr (2,2–12,6); Ni (6,6–40,4); Zr (2,0–4,4);



Р и с. 4. NURBS-кривые изменения коэффициента массопереноса  $\Sigma K_{п.ср.}$  при ЭИЛ стали 45 анодными материалами А, Б на режимах: а)  $t_{ck} / t_p = 50 / 40$ ; б)  $t_{ck} / t_p = 25 / 80$   
 F i g. 4. NURBS-curves of the mass transfer coefficient  $\Sigma K_{п.ср.}$  change during electrospark alloying of 45 steel with anode materials А and Б at regimes: а)  $t_{ck} / t_p = 50 / 40$ ; б)  $t_{ck} / t_p = 25 / 80$



Р и с. 5. Энергодисперсионная рентгеновая спектроскопия ЭИЛ покрытия:  
 а) изображение поверхности после ЭИЛ анодными АМКМ Al-Ti-Ni-Zr; б) место забора  
 пробы по поверхности; в) спектр S1 в месте забора пробы (концентрационные кривые  
 распределения элементов); д) изображение поверхности после ЭИЛ анодными  
 АМКМ Al-Ti-Cr-Ni-Zr; е) место забора пробы; ф) спектр

F i g. 5. Energy dispersive X-ray spectroscopy of electrospark alloying layer:  
 a) surface image after electrospark alloying with anode aluminum matrix composites Al-Ti-Ni-Zr;  
 b) surface sampling location; c) spectrum S1 at the sampling site (concentration curves of element  
 distribution), d) surface image after electrospark alloying with anode aluminum matrix composites  
 Al-Ti-Cr-Ni-Zr; e) surface sampling location; f) spectrum

при ЭИЛ Б'' (режим 25 / 80) С (4,1–10,4); О (2,4–23,6); Al (26,1–33,5); Ti (3,2–5,7); Cr (5,3–11,9); Ni (13,7–38,0); Zr (2,0–3,0). Установлено, что темная фаза содержит высокое количество кислорода и низкое Ni, а светлая – пониженное содержание кислорода и повышенное Ni, Zr и Cr (в светлой и серой фазах). С ужесточением режимов при ЭИЛ исследуемыми анодными материалами в ЛС снижается количество матричного материала Al, а также Ni и наблюдается небольшое снижение Ti, Zr, а также повышение Cr (при использовании Б).

Выявлено изменение элементного состава по глубине покрытия до  $h = 180$  мкм при ЭИЛ анодным мате-

риалом А' (50 / 40). Нижний слой (90–180 мкм) содержит в основном Fe (89,8–94,3), а также С (5,7–15,2); О (17,2–23,0); Al (0,2–0,9). Средний (30–90 мкм) – С (10,2–31,4); О (6,0–17,2); Al (0,9–29,5); Ti (1,4–10,0); Fe (8,6–77,4); Ni (5,3–21,9); Zr (1,5–2,3). Верхний (0–30 мкм) – С (12,1–21,5); О (7,1–17,2); Al (10,4–18,0); Ti (1,40–9,42); Fe (8,1–8,6); Ni (5,3–32,6); Zr (3,3–5,6). При более жестких режимах обработки А'' (25 / 80) нижний слой (100–180 мкм) содержит Fe (до 85,2); С (14,0–33,3); О (7,1–30,1); Al (0,75–10,1). Средний – С (14,0–62,5); О (7,1–30,1); Al (0,8–10,1); Ti (1,4–5,5); Fe (4,9–20,3); Ni (до 22,0); Zr (до 1,5). Верхний – С (12,0–33,3);



O (2,6–7,1); Al (10,2–22,6); Ti (5,5–13,1); Fe (8,3–20,3); Ni (22,0–37,9); Zr (1,5–3,6). С увеличением глубины до 100–180 мкм в ЛС содержатся в основном элементы основы Fe, С, О с небольшим количеством в измененном слое матричного Al, а при ЭИЛ с более жесткими режимами E'' содержание Al, С, О возрастает. В средних и верхних слоях ЛС с уменьшением глубины уменьшается содержание Fe и возрастает количество Al, Ni, Ti и Zr, а при ЭИЛ с более жесткими режимами возрастает количество Ti, Al и уменьшается Zr.

При ЭИЛ анодным хромсодержащим АМКМ Б' (режим 50 / 40) нижний слой на глубине 90–180 мкм состоит из С (4,34–25,4); О (7,7–8,9); Al (до 1,1); Fe (до 94,5). Средний (30–90 мкм) – С (16,5–60,8); О (7,73–24,4); Al (5,0–28,5); Ti (2,64–5,1); Cr (0,4–9,8); Fe (5,1–57,3); Ni (13,7–38,0); Zr (1,1–1,3). Верхний (0–30 мкм) – С (25,5–61,5); О (8,6–27,9); Ti (до 2,6); Cr (0,38–5,70); Fe (5,1–7,0); Ni (32,4); Zr (2,0–2,97). При ужесточении режимов (25 / 80) нижний слой – С (4,3–31,5); О (4,5–10,5); Ti (0,7–4,8); Fe (до 84,8). Средний – С (31,0–46,1); О (1,42–10,5); Al (6,2–21,0); Ti (1,4–4,8); Cr (1,48–7,28); Fe (25,8); Ni (4,5–21,0); Zr (1,8–2,4). Верхний – С (31,5–36,6); О (1,4–14,8); Al (6,2–16,8); Ti (3,2–4,8); Cr (7,3–11,1); Fe (2,7–3,2); Ni (20,9–24,6); Zr (1,9–2,4). Таким образом, при ЭИЛ анодным АМКМ Б' измененный слой на глубине 90–180 мкм состоит преимущественно из Fe, а также С, О с небольшим количеством Al. С уменьшением глубины ЛС (30–90 мкм) содержание Fe сокращается, возрастает С, О и появляются связующий Ni и тугоплавкие Ti, Cr, Zr. В верхнем слое содержание Fe уменьшается на порядок и незначительно возрастает количество Cr и Zr. При ЭИЛ анодным материалом Б'' с более жесткими режимами (25 / 80) в нижнем слое (90–200 мкм), кроме материала основы, в небольшом количестве

появляется Ti; в среднем – Ti, Cr, Ni, Zr, Al, а в верхнем незначительно снижается Fe, Al и возрастает Ni, Cr.

Большой разброс значений величин элементного состава в различных местах забора проб позволяет предполагать, что при ЭИЛ стали 45 исследуемыми анодными АМКМ возможно формирование ЛС, содержащего большое разнообразие соединений стехио- и нестехиометрического состава, что и было подтверждено РФА. При этом выявлено, что наибольшее количество фаз нестехиометрического состава формируются при использовании хромсодержащего анодного АМКМ Б Al-Ti-Cr-Ni-Zr (табл. 1). Кроме того, РФА показал, что состав формируемого ЛС содержит до 40 % бертоллидных фаз переменной валентности при ЭИЛ с режимами E' и до 75 % с режимами E''. При ЭИЛ анодным материалом А образуется лишь по 1 бертоллидной фазе на всех режимах. При этом все они содержат Ni и практически все Al, который отсутствует лишь в одной из них при ЭИЛ А'. Наличие Ti также наблюдается лишь в одной бертоллидной фазе при ЭИЛ Б (Al-Ti-Cr-Ni-Zr) с режимами E' и E''.

Формирование большого разнообразия фаз при ЭИЛ можно объяснить с использованием критериев эрозионной стойкости Л. С. Палатника и термостойкости А. Д. Верхотурова, отражающих зависимости физико-механических и тепловых свойств ЛС [1; 2; 5]. Критерии отражают связь отношений периодов, соответствующих стадиям возникновения очагов плавления и интенсивного испарения в «ванне расплава» электродов при ЭИЛ, соотношения температур, теплопроводности и теплоемкости единицы объема.

Наибольшее разнообразие фаз (10) выявлено при ЭИЛ анодным материалом Б' (Al-Ti-Cr-Ni-Zr) с режимом 50 / 40 (табл. 1).

**Фазовый состав ЛС при ЭИЛ стали 45**  
**Phase composition of alloyed layer at electrospark alloying layer of steel 45**

Режимы / Modes	А: Al-Ti-Ni-Zr	Б: Al-Ti-Cr-Ni-Zr
50 / 40	Al <sub>1,1</sub> Ni <sub>0,9</sub> ; Al <sub>2</sub> NiTi; Al; Ni <sub>5</sub> Zr	Al <sub>1,1</sub> Ni <sub>0,9</sub> ; (Al <sub>0,25</sub> Ni <sub>0,25</sub> )(Al <sub>0,75</sub> Ni <sub>0,75</sub> ); Ti <sub>0,64</sub> Zr <sub>0,36</sub> Ni; NiTi; Al <sub>3</sub> Ti; ZrNiAl; Al <sub>4</sub> Zr <sub>5</sub> ; Al <sub>3</sub> Ni <sub>2</sub> ; Cr <sub>1,2</sub> Ni <sub>0,8</sub> Zr; AlCrNi
25 / 80	Al <sub>0,9</sub> Ni <sub>1,1</sub> ; Al <sub>2</sub> NiTi; Zr <sub>2</sub> Ni <sub>7</sub>	Al <sub>0,42</sub> Ni <sub>0,58</sub> ; Al <sub>0,3</sub> Cr <sub>0,7</sub> ; Zr <sub>2</sub> Ni <sub>7</sub> ; Ti <sub>27,5</sub> Ni <sub>28</sub> Al <sub>63,7</sub>

Формирование различных фаз в составе ЛС определяет его физико-химические и эксплуатационные свойства. Выявлено, что после ЭИЛ исследуемыми анодными материалами на всех режимах микротвердость поверхности стали 45 возрастает более чем в 2 раза, а при ЭИЛ анодным материалом Б" увеличивается в 3,2 раза. Повышение твердости ЛС объясняется наличием выявленных фаз в составе ЛС. Получен ряд твердости ЛС (ряд 5\*) А'→А''→Б'→Б'', в соответствии с которым при ЭИЛ АМКМ твердость стали 45  $\gamma_{ТВ(HV50)}$  возрастет в 2,1 раза при использовании режимов обработки А'; в 2,8 – при А'', а для материала Al-Ti-Cr-Ni-Zr с режимами Б' и Б'' – в 3,1 и в 3,2 раза соответственно.

«Исследования износостойкости поверхности стали 45 до и после ЭИЛ АМКМ показали, что она возрастает в 2-3 раза. Во всех случаях наблюдается быстрый рост износа в первые 2-3 мин (период приработки), далее процесс износа протекает более равномерно. При этом лучшие значения величин износостойкости получены после ЭИЛ анодным хромсодержащим АМКМ Б, показавшим лучшие значения величин во всех исследуемых режимах  $\Sigma I_{лс}$  (Б" и Б') в 2,88 и 3,28 раза соответственно.

Меньшие значения повышения величин износостойкости получены для материала А  $\Sigma I_{лс}$  (А" и А') в 2,3 и 2,2 раза соответственно»<sup>1</sup>. Полученный ряд износостойкости ЛС А'→А''→Б'→Б''(ряд 6\*) совпадает с рядом твердости. При этом износ стали 45 без покрытия составил  $\Sigma I_{(ст45)} = 72 \cdot 10^{-4}$  г, а лучшие значения величин износостойкости при ЭИЛ в полученном ряду у анодного материала Б" и Б'  $\Sigma I_{лс} = 22 \cdot 10^{-4}$  и  $25 \cdot 10^{-4}$  г соответственно при режимах 25 / 80 и 50 / 40; худшие – А" и А'  $\Sigma I_{лс} = 31 \cdot 10^{-4}$  и  $33 \cdot 10^{-4}$  г.

Исследования жаростойкости при нагреве образцов со скоростью 100 °С / 10 мин до 800 °С и последующей выдержкой в течении 1 ч на воздухе показали, что после ЭИЛ поверхности образцов с использованием анодных АМКМ наблюдается значительно меньшее окисление в сравнении с образцами стали 45 без покрытия. В частности после ЭИЛ анодным материалом А" с режимом 25 / 80 жаростойкость поверхности возросла в 5,7 раза, при режимах А' и Б'' – в 7,4 и 7,6 раза соответственно. Наилучшие значения величин повышения жаростойкости (в 18,9 раза) наблюдались при ЭИЛ анодным хромсодержащим материалом Б' и режиме 50 / 40. Получен следующий ряд

<sup>1</sup> **Ким Е. Д.** Получение методом СВС-металлургии новых металломатричных сплавов и электродных материалов для электроискрового легирования: дис. ... канд. техн. наук. Комсомольск-на-Амуре, 2020. 177 с.

жаростойкости ЛС стали 45 (ряд 7\*):  $A'' \rightarrow A' \rightarrow B'' \rightarrow B'$ . Он не совпадает ни с одним из вышеуказанных рядов.

«При формировании ЛС важной составляющей оценки ЭИЛ является эффективность метода  $\gamma_{\text{эф.эил}}$ , которая зависит от свойств анодного материала, материала подложки, межэлектродной среды, режимов обработки, характера массопереноса, формирования «вторичных структур» ЛС и его разрушения под действием импульсных термомеханических нагрузок, времени  $t_{\text{эил}}$ , удельной площади поверхности  $1 \text{ см}^2_{\text{эил}}$ , других факторов» [1]. Составляющими звеньями эффективности формирования ЛС  $\gamma_{\Sigma\text{эф.лс}}$  являются критерий формирования ЛС  $\gamma_{\text{ф.лс}}$  и суммарный показатель свойств ЛС  $\gamma_{\Sigma\text{св.лс}}$ , зависящий от свойств ЛС, определяемых показателями его функционального назначения: твердость  $\gamma_{\text{тв(Нv)}}$ ; жаростойкость  $\gamma_{\text{жар(ΣНr)}}$ ; износостойкость  $\gamma_{\text{изн(ΣИлс)}}$  и др. Важным может быть суммарный показатель энергозатрат  $\gamma_{\text{эф.эил}} / E$ , например, при сравнении метода ЭИЛ с другими методами формирования покрытий [2; 6]:

$$\begin{aligned} \gamma_{\Sigma\text{св.лс}} &= \gamma_{\text{тв(Нv)}} \cdot \gamma_{\text{жар(ΣНr)}} \cdot \gamma_{\text{изн(ΣИлс)}}, \text{ др.}, \\ \gamma_{\Sigma\text{эф.лс}} &= \gamma_{\text{ф.лс}} \cdot \gamma_{\Sigma\text{св.лс}}, \\ \gamma_{\text{эф.эил}} / E &= \gamma_{\text{ф.лс}} \cdot \gamma_{\Sigma\text{св.лс}} / E. \end{aligned}$$

В рассматриваемом случае показатель  $\gamma_{\Sigma\text{эф.лс}}$  является обобщающим для составляющих его частных показателей  $\Sigma\Delta_{\text{к}}$ ,  $\Sigma\Delta_{\text{а}}$ ,  $K_{\text{п.ср.}}$ ,  $\gamma_{\text{ф.лс}}$ . Одним из важнейших показателей формирования ЛС является  $\gamma_{\text{ф.лс}}$ , который зависит от анодного материала, режимов, времени обработки, исследуемых величин скважности  $t_{\text{ск}}$ , длительности разрядного импульса  $t_{\text{р}}$ . Используя энергетический показатель  $\gamma_{\text{эф.эил}} / E$ , можно дать оценку эффективности процесса ЭИЛ по затрачиваемой энергии при формировании ЛС, так как массоперенос «анод – катод» зависит как от длительности и частоты импульсов, так и от

энергии в импульсе:  $E' = 3,12 \text{ Дж}$ ,  $E'' = 14,4 \text{ Дж}$ . Некоторые показатели эффективности при ЭИЛ стали 45 АМКМ анодными материалами и ряды значений величин параметров приведены в таблице 2.

Полученные ряды являются удобным инструментом для формулировки рекомендаций достижения тех или иных параметров эффективности при ЭИЛ в зависимости от выбора анодного материала и режимов обработки. Например, для получения большей величины привеса катода при ЭИЛ исследуемыми анодными АМКМ следует использовать материал Б'', обеспечивающий в 1,5 раза больший привес, чем материал А', и назначать режим с энергией  $E'' = 14,4 \text{ Дж}$ , дающий в 1,8 раза меньшую эрозионную стойкость в сравнении с Б'. Если будет поставлена задача экономии анодного АМКМ, то, наоборот, следует использовать материал Б', обеспечивающий в 1,3 раза меньший электромассоперенос, в 18,9 раза более высокую жаростойкость, в сравнении с А'', и в 1,8 раза более высокую эрозионную стойкость, чем Б'. Для получения больших значений величин твердости и износостойкости следует применять материал и режимы Б''. Ряд критерия формирования ЛС показывает, что наиболее высокие значения величин обеспечивает анодный АМКМ с режимами А'' – более чем в 1,5 раза в сравнении с А'. Однако суммарную эффективность свойств при формировании ЛС можно достичь при выборе анодного хромсодержащего материала Б'' (Al-Ti-Cr-Ni-Zr), показывающего значения величин в 4,2-4,3 раза лучшие, чем при ЭИЛ в тех же режимах материала Al-Ti-Ni-Zr. Если же будет поставлена задача экономии энергии, то суммарный эффект при ЭИЛ показывает ряд эффективности энергозатрат, в соответствии с которыми анодный АМКМ Б' (Al-Ti-Cr-Ni-Zr)

**Некоторые значения величин, полученных при исследованиях**  
**Some values obtained during the research**

Режим / Modes	A' (50 / 40)	B' (50 / 40)	A'' (25 / 80)	B'' (25 / 80)	Ряды значений величин параметров / Series of parameter values
$\Sigma\Delta_{\kappa(10\text{мин})}$	13,10000	14,30000	19,60000	20,20000	A' → B' → A'' → B''
$\Sigma K_{\text{п.ср.}}$	0,10000	0,11400	0,10400	0,08500	B'' → A' → A'' → B'
$\gamma_{\text{ф.лс}}$	13,10000	16,30000	20,40000	17,20000	A' → B' → B'' → A''
$\gamma_{\text{тв(Нv)}}$	2,08000	3,06000	2,77000	3,20000	A' → A'' → B' → B''
$\gamma_{\text{жар}(\Sigma\text{Hr})}$	7,64000	18,90000	7,38000	5,73000	A'' → A' → B'' → B'
$\gamma_{\text{изн}(\Sigma\text{Илс})}$	2,18000	2,88000	2,32000	3,28000	A' → A'' → B' → B''
$\Sigma\Delta_{\text{а(эп.ст.10мин)}}^{-1}$	0,00259	0,00432	0,00255	0,00244	B'' → A' → A'' → B'
$\gamma_{\Sigma\text{эф.эил}}$	1,14000	4,74000	1,91000	8,31000	A' → A'' → B' → B''
$\gamma_{\text{эф.эил}} / E$	0,36000	1,52000	0,13000	0,58000	A'' → A' → B'' → B'

*Примечание:*  $\Sigma\Delta_{\kappa(10\text{мин})}$  – привес катода,  $\cdot 10^{-3}$  г;  $\Sigma\Delta_{\text{а(эп.ст.10мин)}}^{-1}$  – эрозионная стойкость анода,  $1/\text{г} \cdot 10^{-3}$ .  
*Note:*  $\Sigma\Delta_{\kappa(10\text{мин})}$  – cathode weight,  $\cdot 10^{-3}$  g;  $\Sigma\Delta_{\text{а(эп.ст.10мин)}}^{-1}$  – anode erosion resistance,  $1/\text{g} \cdot 10^{-3}$ .

использовать выгоднее в 2,6–2,8 раза при тех же условиях с режимами  $E' = 3,12$  Дж. При этом ряд эффективности энергозатрат совпадает с рядом жаростойкости ЛС для всех исследуемых анодных АМКМ и режимов.

#### Обсуждение и заключение

При ЭИЛ стали 45 АМКМ ЛС содержит большое разнообразие соединений стехио- и нестехиометрического составов: до 40 % бертоллидных фаз переменной валентности при ЭИЛ с режимами  $E'$  и до 75 % с режимами  $E''$ . Все бертоллидные фазы содержат Ni, и практически все – Al. Наибольшее количество фаз нестехиометрического состава формируется при использовании анодного хромсодержащего материала Al-Ti-Cr-Ni-Zr.

После ЭИЛ стали 45 новыми анодными АМКМ твердость

и износостойкость поверхности возрастают в 2-3 раза, жаростойкость – в 5–18 раз. Лучшие значения свойств ЛС получены для анодного материала Al-Ti-Cr-Ni-Zr с добавкой Cr при режимах  $E'' = 14,4$  Дж.

Получены ряды увеличения массы катода  $\Sigma\Delta_{\kappa}$ , эрозионной стойкости электродных материалов  $\Sigma\Delta_{\text{а(эп.ст.)}}^{-1}$ , коэффициента массопереноса  $K_{\text{п.ср.}}$ , эффективности формирования ЛС  $\gamma_{\text{ф.лс}}$ , жаростойкости  $\gamma_{\text{жар}(\Sigma\text{Hr})}$ , твердости  $\gamma_{\text{тв(Нv)}}$ , износостойкости ЛС  $\gamma_{\text{изн}(\Sigma\text{Илс})}$ , суммарной эффективности свойств ЛС  $\gamma_{\Sigma\text{эф.эил}}$ , энергетической эффективности ЭИЛ  $\gamma_{\text{эф}} / E$  и приведены примеры их использования для формулировки рекомендаций по достижению требуемых параметров искрового воздействия при ЭИЛ сталей, созданных анодными АМКМ.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. **Панфилов, А. А.** Особенности металлургических процессов при выплавке алюмоматричных композиционных сплавов / А. А. Панфилов, Е. С. Прусов, В. А. Кечин // *Литейщик России*. – 2018. – № 11. – С. 10–13. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36455377> (дата обращения: 15.05.2021). – Рез. англ.
2. Влияние природы электродных материалов на эрозию и свойства легированного слоя. Критерии оценки эффективности электроискрового легирования / А. Д. Верхотуров, В. И. Иванов, А. С. Дорохов [и др.]. – DOI 10.15507/0236-2910.028.201803.302-320 // *Вестник Мордовского университета*. – 2018. – Т. 28, № 3. – С. 302–320. – Рез. англ.
3. Использование функционально-градиентных материалов при электроискровом легировании углеродистых сталей / С. В. Николенко, П. С. Гордиенко, Л. А. Коневцов [и др.] // *Технология машиностроения*. – 2019. – № 10. – С. 5–13. – URL: [http://www.ic-tm.ru/info/10\\_28](http://www.ic-tm.ru/info/10_28) (дата обращения: 15.05.2021).
4. Моделирование температурного поля поверхности при электроискровом легировании металлов / В. Д. Власенко, В. И. Иванов, В. Ф. Аулов [и др.]. – DOI 10.15507/2658-4123.029.201902.218-233 // *Инженерные технологии и системы*. – 2019. – Т. 29, № 2. – С. 218–233. – Рез. англ.
5. Композиционные СВС-материалы на основе карбида и никелида титана, легированные тугоплавким нанокomпонентом / Ю. С. Погожев, Е. А. Левашов, А. Е. Кудряшов [и др.] // *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. – 2012. – № 2. – С. 24–32. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17896181> (дата обращения: 15.05.2021).
6. Nano-Scale Multilayered-Composite Coatings for the Cutting Tools / А. А. Vereshchaka, А. S. Vereshchaka, О. Mgaloblishvili [et al.]. – DOI 10.1007/s00170-014-5673-2 // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 72, Issue 1. – Pp. 303–317.
7. **Верещака, А. А.** Функциональные покрытия для режущих инструментов / А. А. Верещака // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2015. – № 4 (48). – С. 25–36. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24985862> (дата обращения: 15.05.2021). – Рез. англ.
8. Consolidation of Aluminum-Based Metal Matrix Composites via Spark Plasma Sintering / G. A. Sweet, M. Brochu, R. L. Hexemer Jr. [et al.]. – DOI 10.1016/j.msea.2015.09.027 // *Materials Science and Engineering: A*. – 2015. – Vol. 648. – Pp. 123–133.
9. Fabrication and Properties of SiCp/Al Composites by Pulsed Electric Current Sintering / M. Yang, D. Zhang, X. Gu, L. Zhang. – DOI 10.1007/s10853-005-1814-1 // *Journal of Materials Science*. – 2005. – Vol. 40. – Pp. 5029–5031.
10. Effect of Fabrication Process on the Microstructure and Dynamic Compressive Properties of SiCp/Al Composites Fabricated by Spark Plasma Sintering / J.-T. Zhang, L.-Sh. Liu, P.-Ch. Zhai [et al.]. – DOI 10.1016/j.matlet.2007.04.118 // *Materials Letters*. – 2008. – Vol. 62, Issue 3. – Pp. 443–446.
11. Thermal Conductivity of Spark Plasma Sintering Consolidated SiCp/Al Composites Containing Pores: Numerical Study and Experimental Validation / K. Chu, C. Jia, W. Tian [et al.]. – DOI 10.1016/j.compositesa.2009.10.001 // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2010. – Vol. 41, Issue 1. – Pp. 161–167.
12. Processing of Al/SiC Composites in Continuous Solid-Liquid Co-Existent State by SPS and Their Thermal Properties / K. Mizuuchi, K. Inoue, Y. Agari [et al.]. – DOI 10.1016/j.compositesb.2012.02.004 // *Composites Part B: Engineering*. – 2012. – Vol. 43, Issue 4. – Pp. 2012–2019.
13. Preparation and Mechanical Properties of SiC-Reinforced Al6061 Composite by Mechanical Alloying / N. Parvin, R. Assadifard, P. Safarzadeh [et al.]. – DOI 10.1016/j.msea.2008.05.004 // *Materials Science and Engineering A*. – 2008. – Vol. 492, Issue 1–2. – Pp. 134–140.
14. Properties of Submicron AlN Particulate Reinforced Aluminum Matrix Composite / J. Wang, D. Yi, X. Su [et al.]. – DOI 10.1016/j.matdes.2008.04.039 // *Materials and Design*. – 2009. – Vol. 30, Issue 1. – Pp. 78–81.
15. Preparation of Metal Matrix Aluminum Alloys Composites Reinforced by Silicon Nitride and Aluminum Nitride through Powder Metallurgy Techniques / E. R. Araujo, M. S. Souza, F. A. Filho *Electrotechnologies and electrical equipment in agriculture*

[et al.]. – DOI [10.4028/www.scientific.net/MSF.727-728.259](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.727-728.259). – Текст : электронный // Materials Science Forum. – 2012. – Vol. 727–728.

16. Effects of SiC Particle Size on CTEs of SiCp/Al Composites by Pulsed Electric Current Sintering / M. J. Yang, D. M. Zhang, X. F. Gu, L. M. Zhang. – DOI [10.1016/j.matchemphys.2005.10.019](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.10.019) // Materials Chemistry and Physics. – 2006. – Vol. 99, Issue 1. – Pp. 170–173.

17. **Saberi, Y.** On the Role of Nano-Size SiC on Lattice Strain and Grain Size of Al/SiC Nanocomposite / Y. Saberi, S. M. Zebarjad, G. H. Akbari. – DOI [10.1016/j.jallcom.2009.05.009](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.05.009) // Journal of Alloys and Compounds. – 2009. – Vol. 484, Issue 1–2. – Pp. 637–640.

18. **Tang, F.** Solid State Sintering and Consolidation of Al Powders and Al Matrix Composites / F. Tang, I. Anderson, S. Biner. – DOI [10.1016/S1471-5317\(03\)00004-X](https://doi.org/10.1016/S1471-5317(03)00004-X) // Journal of Light Metals. – 2002. – Vol. 2, Issue 4. – Pp. 201–214.

19. The Dynamic Properties of SiCp/Al Composites Fabricated by Spark Plasma Sintering with Powders Prepared by Mechanical Alloying Process / J. Zhang, H. Shi, M. Cai [et al.]. – DOI [10.1016/j.msea.2009.08.067](https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.08.067) // Materials Science and Engineering: A. – 2009. – Vol. 527, Issue 1–2. – Pp. 218–224.

20. Microstructural and Mechanical Study of an Al Matrix Composite Reinforced by Al-Cu-Fe Icosahedral Particles / G. Laplanche, A. Joulain, J. Bonneville [et al.]. – DOI [10.1557/jmr.2010.0118](https://doi.org/10.1557/jmr.2010.0118) // Journal of Materials Research. – 2010. – Vol. 25, Issue 5. – Pp. 957–965.

21. Application of SHS Processes for in Situ Preparation of Alumomatrix Composite Materials Discretely Reinforced by Nanodimensional Titanium Carbide Particles (Review) / A. P. Amosov, A. R. Luts, E. I. Latuhin, A. A. Ermoshkin. – DOI [10.3103/S1067821216020024](https://doi.org/10.3103/S1067821216020024) // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2016. – Vol. 57. – Pp. 106–112.

22. **Панфилов, Л. А.** Проблемы и перспективы развития производства и применения алюмоматричных композиционных сплавов / Л. А. Панфилов, Е. С. Прусов, В. А. Кечин // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. – 2013. – № 2 (99). – С. 210–217. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20173605> (дата обращения: 15.05.2021). – Рез. англ.

23. Influence of SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particulate Reinforcements and Heat Treatments on Mechanical Properties and Damage Evolution of Al-2618 Metal Matrix Composites / M. Tan, Q. Xin, Z. Li [et al.]. – DOI [10.1023/A:1017591117670](https://doi.org/10.1023/A:1017591117670) // Journal of Materials Science. – 2001. – Vol. 36, Issue 8. – Pp. 2045–2053.

24. **Gupta, N.** The Solidification Processing of Metal-Matrix Composites: The Rohatgi Symposium / N. Gupta, K. G. Satyanarayana. – DOI [10.1007/s11837-006-0236-0](https://doi.org/10.1007/s11837-006-0236-0) // JOM. – 2006. – Vol. 58, Issue 11. – Pp. 92–94.

25. **Song, M.** Effects of Volume Fraction of SiC Particles on Mechanical Properties of SiC/Al Composites / M. Song. – DOI [10.1016/S1003-6326\(09\)60040-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60040-6) // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2009. – Vol. 19, Issue 6. – Pp. 1400–1404.

26. **Narayanasamy, R.** Effect of Particle Size of SiC in Aluminium Matrix on Workability and Strain Hardening Behaviour of P/M Composite / R. Narayanasamy, T. Ramesh, M. Prabhakar. – DOI [10.1016/j.msea.2008.11.037](https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.11.037) // Materials Science and Engineering: A. – 2009. – Vol. 504, Issue 1–2. – Pp. 13–23.

27. **Wannasin, J.** Fabrication of Metal Matrix Composites by a High-Pressure Centrifugal Infiltration Process / J. Wannasin, M. C. Flemings // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. – Vol. 169, Issue 2. – Pp. 143–149. – URL: <https://www.scrip.org/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=483666> (дата обращения: 15.05.2021).

28. **Bauria, R.** Processing and Properties of Al–Li–SiCp Composites / R. Bauria, M. K. Surappa. – DOI [10.1016/j.stam.2007.07.004](https://doi.org/10.1016/j.stam.2007.07.004) // Science and Technology of Advanced Materials. – 2007. – Vol. 8, Issue 6. – Pp. 494–502.

29. Трибологические характеристики и коррозионная стойкость покрытий, полученных методами электроискрового легирования, импульсного катодно-дугового испарения и гибридной технологии с использованием электродов TiCNiCr и TiCNiCr-Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / А. Д. Сытченко, А. Н. Шевейко, Е. А. Левашов, Ф. В. Кирюханцев-Корнеев. – DOI [10.17073/0021-3438-2020-2-73-79](https://doi.org/10.17073/0021-3438-2020-2-73-79) // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2020. – № 2. – С. 73–79. – Рез. англ.

30. Эрозионная и абразивная стойкость, механические свойства и структура покрытий TiN, Ti–Cr–Al–N и Cr–Al–Ti–N, полученных методом CFUBMS / Ф. В. Кирюханцев-Корнеев, Дж. Фири, В. И. Гладков [и др.]. – DOI [10.1134/S0044185619050127](https://doi.org/10.1134/S0044185619050127) // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2019. – Т. 55, № 5. – С. 546–556.
31. **Kiryukhantsev-Korneev, Ph. V.** Comparative Study of Coatings Formed by Electrospark Alloying Using TiC–NiCr and TiC–NiCr–Eu2O3 Electrodes / Ph. V. Kiryukhantsev-Korneev, A. D. Sytchenko, E. A. Levashov. – DOI [10.3103/S1067821219060099](https://doi.org/10.3103/S1067821219060099) // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2019. – Vol. 60, Issue 6. – Pp. 662–672.
32. Гибридная технология осаждения твердых износостойких покрытий, сочетающая процессы электроискрового легирования, катодно-дугового испарения и магнетронного напыления / А. Н. Шевейко, К. А. Купцов, Ф. В. Кирюханцев-Корнеев [и др.]. – DOI [10.17073/1997-308X-2018-4-92-103](https://doi.org/10.17073/1997-308X-2018-4-92-103) // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2018. – № 4. – С. 92–103. – Рез. англ.
33. Review of Metal Matrix Composites with High Thermal Conductivity for Thermal Management Applications / X. Qu, L. Zhang, M. Wu, S. Ren. – DOI [10.1016/S1002-0071\(12\)60029-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0071(12)60029-X) // Progress in Natural Science: Materials International. – 2011. – Vol. 21, Issue 3. – Pp. 189–197.
34. The Fabrication Process and Mechanical Properties of SiCp/Al–Si Metal Matrix Composites for Automobile Air-Conditioner Compressor Pistons / H. S. Lee, J. S. Yeo, S. H. Hong, D. J. Yoon. – DOI [10.1016/S0924-0136\(01\)00680-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00680-X) // Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – Vol. 113, Issue 1–3. – Pp. 202–208.
35. **Hunt Jr., W. H.** Aluminum Metal Matrix Composites Today / W. H. Hunt Jr. – DOI [10.4028/www.scientific.net/MSF.331-337.71](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.331-337.71) // Materials Science Forum. – 2000. – Vol. 331–337. – Pp. 71–84.
36. **Suganuma, K.** Whisker/Matrix Interface Microstructure in 6061 Aluminum Composite Reinforced with  $\alpha$ -Silicon Nitride Whisker / K. Suganuma. – DOI [10.1163/156855494X00030](https://doi.org/10.1163/156855494X00030) // Composite Interfaces. – 1994. – Vol. 2. – Pp. 15–27.
37. Processing and Surface Properties of Al–AlN Composites Produced from Nanostructured Milled Powders / H. Abdoli, E. Saebnouri, S. K. Sadrnezhad [et al.]. – DOI [10.1016/j.jallcom.2009.10.121](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.10.121) // Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – Vol. 490, Issue 1–2. – Pp. 624–630.
38. Thermal Conductivity Behavior of SPS Consolidated AlN/Al Composites for Thermal Management Applications / B. Dun, X. Jia, C. Jia [et al.]. – DOI [10.1007/s12598-011-0222-8](https://doi.org/10.1007/s12598-011-0222-8) // Rare Metals. – 2011. – Vol. 30, Issue 2. – Pp. 189–194.

*Поступила 20.05.2021; одобрена после рецензирования 25.06.2021; принята к публикации 05.07.2021*

*Об авторах:*

**Николенко Сергей Викторович**, и. о. директора ФГБУН «Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук» (680042, Российская Федерация, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, д. 153), доктор технических наук, Researcher ID: [A-4229-2012](https://orcid.org/0000-0003-4474-5795), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4474-5795>, [nikola1960@mail.ru](mailto:nikola1960@mail.ru)

**Коневцов Леонид Алексеевич**, старший научный сотрудник ФГБУН «Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук» (680042, Российская Федерация, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, д. 153), кандидат технических наук, Researcher ID: [H-4087-2018](https://orcid.org/0000-0002-7212-3953), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7212-3953>, [konevts@narod.ru](mailto:konevts@narod.ru)

**Гордиенко Павел Сергеевич**, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук» (690022, Российская Федерация, г. Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, д. 159), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: [AAS-7040-2021](https://orcid.org/0000-0003-1537-2977), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1537-2977>, [pavel.gordienko@mail.ru](mailto:pavel.gordienko@mail.ru)

**Панин Евгений Савельевич**, научный сотрудник ФГБУН «Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук» (690022, Российская Федерация, г. Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, д. 159), кандидат химических наук, Researcher ID: [AAS-7013-2021](https://orcid.org/0000-0002-8980-275X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8980-275X>, [panin26@yandex.ru](mailto:panin26@yandex.ru)

**Величко Сергей Анатольевич**, профессор кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), доктор технических наук, Researcher ID: G-9021-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6254-5733>, [velichko2005@yandex.ru](mailto:velichko2005@yandex.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

С. В. Николенко – формулирование основной концепции исследования и анализ результатов.

Л. А. Коневцов – методическое руководство.

П. С. Гордиенко – план статьи и ее написание.

Е. С. Панин – экспериментальные исследования.

С. А. Величко – формирование выводов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Panfilov A.A., Prusov E.S., Kechin V.A. Features of Metallurgical Processes at the Melting of Aluminum Matrix Compositional Alloys. *Liteyshchik Rossii = Foundryman of Russia*. 2018; (11):10-13. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36455377> (accessed 15.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
2. Verkhoturov A.D., Ivanov V.I., Dorokhov A.S., et al. Effect of the Nature of Electrode Materials on Erosion and Properties of Doped Layers. The Criteria for Evaluating the Effectiveness of Electrospark Alloying. *Vestnik Mordovskogo universiteta = Mordovia University Bulletin*. 2018; 28(3):302-320. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.302-320>
3. Nikolenko S.V., Gordienko P.S., Konevtsov L.A., et al. [Use of Functionally Graded Materials in Electrospark Alloying of Carbon Steels]. *Tekhnologiya mashinostroeniya = Technology of Mechanical Engineering*. 2019; (10):5-13. Available at: [http://www.ic-tm.ru/info/10\\_28](http://www.ic-tm.ru/info/10_28) (accessed 15.05.2021). (In Russ.)
4. Vlasenko V.D., Ivanov V.I., Aulov V.F., et al. Modelling the Temperature Field of a Surface in Using Electrospark Alloying of Metals. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems*. 2019; 29(2):218-233. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.218-233>
5. Pogozhev Yu.S., Levashov Ye.A., Kudryashov A.Ye., et al. [Composite SHS Materials Based on Titanium Carbide and Nickelide, Alloyed with Refractory Nanocomponents]. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya = Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2012; (2):24-32. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17896181> (accessed 15.05.2021). (In Russ.)
6. Vereshchaka A.A., Vereshchaka A.S., Mgaloblishvili O., et al. Nano-Scale Multilayered-Composite Coatings for the Cutting Tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014; 72(1):303-317. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5673-2>
7. Vereshchaka A.A. Functional Coatings for Cutters. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2015; (4):25-36. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24985862> (accessed 15.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
8. Sweet G.A., Brochu M., Hexemer Jr. R. L., et al. Consolidation of Aluminum-Based Metal Matrix Composites via Spark Plasma Sintering. *Materials Science and Engineering: A*. 2015; 648:123-133. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.09.027>
9. Yang M., Zhang D., Gu X., Zhang L. Fabrication and Properties of SiCp/Al Composites by Pulsed Electric Current Sintering. *Journal of Materials Science*. 2005; 40:5029-5031. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-005-1814-1>

10. Zhang J.-T., Liu L.-Sh., Zhai P.-Ch., et al. Effect of Fabrication Process on the Microstructure and Dynamic Compressive Properties of SiCp/Al Composites Fabricated by Spark Plasma Sintering. *Materials Letters*. 2008; 62(3):443-446. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.04.118>
11. Chu K., Jia C., Tian W., et al. Thermal Conductivity of Spark Plasma Sintering Consolidated SiCp/Al Composites Containing Pores: Numerical Study and Experimental Validation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010; 41(1):161-167. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.10.001>
12. Mizuuchi K., Inoue K., Agari Y., et al. Processing of Al/SiC Composites in Continuous Solid-Liquid Co-Existent State by SPS and Their Thermal Properties. *Composites Part B: Engineering*. 2012; 43(4):2012-2019. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.02.004>
13. Parvin N., Assadifard R., Safarzadeh P., et al. Preparation and Mechanical Properties of SiC-Reinforced Al6061 Composite by Mechanical Alloying. *Materials Science and Engineering A*. 2008; 492(1-2):134-140. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.05.004>
14. Wang J., Yi D., Su X., et al. Properties of Submicron AlN Particulate Reinforced Aluminum Matrix Composite. *Materials and Design*. 2009; 30(1):78-81. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.04.039>
15. Araujo E.R., Souza M.S., Filho F.A., et al. Preparation of Metal Matrix Aluminum Alloys Composites Reinforced by Silicon Nitride and Aluminum Nitride through Powder Metallurgy Techniques. *Materials Science Forum*. 2012; 727-728. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.727-728.259>
16. Yang M.J., Zhang D.M., Gu X.F., Zhang L.M. Effects of SiC Particle Size on CTEs of SiCp/Al Composites by Pulsed Electric Current Sintering. *Materials Chemistry and Physics*. 2006; 99(1):170-173. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.10.019>
17. Saberi Y., Zebarjad S.M., Akbari G.H. On the Role of Nano-Size SiC on Lattice Strain and Grain Size of Al/SiC Nanocomposite. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009; 484(1-2):637-640. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.05.009>
18. Tang F., Anderson I., Biner S. Solid State Sintering and Consolidation of Al Powders and Al Matrix Composites. *Journal of Light Metals*. 2002; 2(4):201-214. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S1471-5317\(03\)00004-X](https://doi.org/10.1016/S1471-5317(03)00004-X)
19. Zhang J., Shi H., Cai M., et al. The Dynamic Properties of SiCp/Al Composites Fabricated by Spark Plasma Sintering with Powders Prepared by Mechanical Alloying Process. *Materials Science and Engineering: A*. 2009; 527(1-2):218-224. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.08.067>
20. Laplanche G., Joulain A., Bonneville J., et al. Microstructural and Mechanical Study of an Al Matrix Composite Reinforced by Al-Cu-Fe Icosahedral Particles. *Journal of Materials Research*. 2010; 25(5):957-965. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2010.0118>
21. Amosov A.P., Luts A.R., Latuhin E.I., Ermoshkin A.A. Application of SHS Processes for in Situ Preparation of Alumomatrix Composite Materials Discretely Reinforced by Nanodimensional Titanium Carbide Particles (Review). *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2016; 57:106-112. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1067821216020024>
22. Panfilov A.A., Prusov E.S., Kechin V.A. Problems and Prospects of Development of Production and Application Alyumomatrixnykh of Composite Alloys. *Trudy NGTU im. R.Ye. Alekseeva = Works of Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University*. 2013; (2):210-217. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20173605> (accessed 15.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
23. Tan M., Xin Q., Li Z., et al. Influence of SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particulate Reinforcements and Heat Treatments on Mechanical Properties and Damage Evolution of Al-2618 Metal Matrix Composites. *Journal of Materials Science*. 2001; 36(8):2045-2053. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1017591117670>
24. Gupta N., Satyanarayana K.G. The Solidification Processing of Metal-Matrix Composites: The Rohatgi Symposium. *JOM*. 2006; 58(11):92-94. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-006-0236-0>
25. Song M. Effects of Volume Fraction of SiC Particles on Mechanical Properties of SiC/Al Composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2009; 19(6):1400-1404. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60040-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60040-6)

26. Narayanasamy R., Ramesh T., Prabhakar M. Effect of Particle Size of SiC in Aluminium Matrix on Workability and Strain Hardening Behaviour of P/M Composite. *Materials Science and Engineering: A*. 2009; 504(1-2):13-23. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.11.037>
27. Wannasin J., Flemings M.C. Fabrication of Metal Matrix Composites by a High-Pressure Centrifugal Infiltration Process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005; 169(2):143-149. Available at: <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=483666> (accessed 15.05.2021). (In Eng.)
28. Bauria R., Surappa M.K. Processing and Properties of Al–Li–SiCp Composites. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2007; 8(6):494-502. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.stam.2007.07.004>
29. Sytchenko A.D., Sheveyko A.N., Levashov E.A., Kiryukhantsev-Korneev P.V. Tribological Characteristics and Corrosion Resistance of Coatings Obtained by Electrospark Alloying, Pulsed Cathodic Arc Evaporation and Hybrid Technology Using TiNiCr and TiNiCr–Dy2O3 Electrodes. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya = News of Higher Schools. Non-Ferrous Metallurgy*. 2020; (2):73-79. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2020-2-73-79>
30. Kiryukhantsev-Korneev F.V., Phiri J., Gladkov V.I., [et al.]. [Erosion and Abrasion Resistance, Mechanical Properties and Structure of Coatings TiN, Ti–Cr–Al–N и Cr–Al–Ti–N, obtained by CFUBMS method]. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov = Surface Physicochemistry and Material Protection*. 2019; 55(5):546-556. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S0044185619050127>
31. Kiryukhantsev-Korneev Ph.V., Sytchenko A.D., Levashov E.A. Comparative Study of Coatings Formed by Electrospark Alloying Using TiC–NiCr and TiC–NiCr–Eu2O3 Electrodes. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2019; 60(6):662-672. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1067821219060099>
32. Sheveyko A.N., Kuptsov K.A., Kiryukhantsev-Korneev P.V., et al. Hybrid Technology Combining Electrospark Alloying, Cathodic Arc Evaporation and Magnetron Sputtering for Hard Wear-Resistant Coating Deposition. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya = News of Higher Schools. Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2018;(4):92-103. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2018-4-92-103>
33. Qu X., Zhang L., Wu M., Ren S. Review of Metal Matrix Composites with High Thermal Conductivity for Thermal Management Applications. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2011; 21(3):189-197. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0071\(12\)60029-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0071(12)60029-X)
34. Lee H.S., Yeo J.S., Hong S.H., Yoon D.J. The Fabrication Process and Mechanical Properties of SiCp/Al–Si Metal Matrix Composites for Automobile Air-Conditioner Compressor Pistons. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001; 113(1-3):202-208. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00680-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00680-X)
35. Hunt Jr. W.H. Aluminum Metal Matrix Composites Today. *Materials Science Forum*. 2000; 331-337:71-84. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.331-337.71>
36. Suganuma K. Whisker/Matrix Interface Microstructure in 6061 Aluminum Composite Reinforced with  $\alpha$ -Silicon Nitride Whisker. *Composite Interfaces*. 1994; 2:15-27. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1163/156855494X00030>
37. Abdoli H., Saebnouri E., Sadrnezhad S.K., et al. Processing and Surface Properties of Al–AlN Composites Produced from Nanostructured Milled Powders. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010; 490(1-2):624-630. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.10.121>
38. Dun B., Jia X., Jia C., et al. Thermal Conductivity Behavior of SPS Consolidated AlN/Al Composites for Thermal Management Applications. *Rare Metals*. 2011; 30(2):189-194. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s12598-011-0222-8>

Received 20.05.2021; approved after reviewing 25.06.2021; accepted for publication 05.07.2021

*About the authors:*

**Sergey V. Nikolenko**, Acting Director of Institute of Materials Science of Far East Branch of the Russian Academy of Sciences (153 Tikhookeanskaya St., Khabarovsk 680042, Russian Federation), D.Sc. (Engr.), Researcher ID: [A-4229-2012](#), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4474-5795>, [nikola1960@mail.ru](mailto:nikola1960@mail.ru)

**Leonid A. Konevtsov**, Senior Researcher, Institute of Materials Science of Far East Branch of the Russian Academy of Sciences (153 Tikhookeanskaya St., Khabarovsk 680042, Russian Federation), Cand.Sc. (Engr.), Researcher ID: [H-4087-2018](#), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7212-3953>, [konevts@narod.ru](mailto:konevts@narod.ru)

**Pavel S. Gordienko**, Leading Researcher, Institute of Chemistry of Far East Branch of the Russian Academy of Sciences (159 Vladivostok Centenary Prospect, Vladivostok 690022, Russian Federation), D.Sc. (Engr.), Professor, Researcher ID: [AAS-7040-2021](#), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1537-2977>, [pavel.gordienko@mail.ru](mailto:pavel.gordienko@mail.ru)

**Eugenii S. Panin**, Researcher, Institute of Chemistry of Far East Branch of the Russian Academy of Sciences (159 Vladivostok Centenary Prospect, Vladivostok 690022, Russian Federation), Cand.Sc. (Chem.), Researcher ID: [AAS-7013-2021](#), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8980-275X>, [panin26@yandex.ru](mailto:panin26@yandex.ru)

**Sergey A. Velichko**, Professor of the Technical Service Machines Chair of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), D.Sc. (Engr.), Researcher ID: [G-9021-2018](#), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6254-5733>, [velichko2005@yandex.ru](mailto:velichko2005@yandex.ru)

*Contribution of the authors:*

S. V. Nikolenko – formulation of the basic research concept and analysis of the results.

L. A. Konevtsov – methodological guide.

P. S. Gordienko – writing the draft.

E. S. Panin – experimental studies.

S. A. Velichko – formulation of conclusions.

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



## Оценка равномерности поверхностного распределения потока излучения как фактора энергоэффективности светокультуры

С. А. Ракутько\*, Е. Н. Ракутько

*Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)*

\**sergej1964@yandex.ru*

*Введение.* Тепличные осветительные установки являются неотъемлемым элементом системы выращивания растений в культивационных сооружениях с искусственным микроклиматом. Обеспечение равномерности распределения освещенности по площади выращивания является важным для повышения эффективности использования энергии и улучшения качества растений наряду с другими требованиями. Цель работы – рассмотреть математический аппарат для описания распределения потока излучения по поверхности, а также обосновать выбор способов характеристики степени равномерности освещения.

*Материалы и методы.* С позиции теоретической фотометрии рассмотрены основные понятия предметной области: освещенность, тело освещенности, кривая горизонтальной освещенности, кривая силы света. Для оценки энергоэффективности светокультуры использован коэффициент полезного использования потока. Изложены различные способы определения среднего значения освещенности. Представлены формулы для коэффициентов равномерности. Экспериментальную проверку производили на горизонтальной плоскости, моделирующей поверхность для выращивания растений. Использовали светильник с круглосимметричным светораспределением.

*Результаты исследования.* Доказано, что вычисленные по предложенной методике значения освещенности в различных точках освещаемой поверхности соответствуют экспериментально полученным значениям. Большую информацию о равномерности несет коэффициент, учитывающий картину распределения освещенности по всем точкам поверхности. Построен частотный график распределения величины освещенности, и обоснована его практическая применимость. Выявлена взаимосвязь между коэффициентом полезного использования потока и равномерностью создаваемой освещенности. При снижении высоты подвеса светильника возможно существенно увеличить коэффициент полезного использования потока, однако при этом резко ухудшается равномерность освещения.

*Обсуждение и заключение.* Показана возможность оценки энергоэффективности по коэффициенту полезного использования, определяющему долю полезного потока, падающего на поверхность, от общего потока, генерируемого источниками света. Высказано предположение, что этот показатель может характеризовать экологичность светокультуры, поскольку установлена его связь с равномерностью создаваемой освещенности, влияние которой на светокультуру следует из литературных источников.

© Ракутько С. А., Ракутько Е. Н., 2021



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

**Ключевые слова:** светокультура, осветительная установка, равномерность освещения, коэффициент полезного использования потока, энергоэффективность, экологичность

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

**Для цитирования:** Ракутько, С. А. Оценка равномерности поверхностного распределения потока излучения как фактора энергоэффективности светокультуры / С. А. Ракутько, Е. Н. Ракутько. – DOI 10.15507/2658-4123.031.202103.470-486 // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 3. – С. 470–486.

Original article

## Assessment of Lighting Uniformity as a Factor of Energy Efficiency in Greenhouse Horticulture

S. A. Rakutko\*, E. N. Rakutko

*Institute for Engineering and Environmental Problems*

*in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific*

*Agroengineering Center VIM (Saint Petersburg, Russian Federation)*

\**sergej1964@yandex.ru*

**Introduction.** Greenhouse lighting systems are an integral part of the system for growing plants in cultivation facilities with an artificial microclimate. The uniformity of light distribution over the growing area is important to increase energy efficiency and improve plant quality, among other requirements. The aim of the work is to consider the mathematical apparatus for describing the distribution of light over the surface and to justify the choice of ways to characterize the degree of lighting uniformity.

**Materials and Methods.** The basic concepts of the subject area such as lighting, lighting body, horizontal lighting curve, luminous intensity curve are considered in terms of theoretical photometry. To assess the energy and ecological friendliness of the greenhouse horticulture, the lighting efficiency factor was used. Various methods for determining the average lighting value are presented. The formulas for the uniformity coefficients are presented. Experimental verification was carried out on a horizontal plane simulating a surface for growing plants. A luminary with a round-symmetric light distribution was used.

**Results.** It has been found that the lighting values calculated by the proposed method at various points of the illuminated surface correspond to the experimentally obtained values. It has been shown that the coefficient taking into account the pattern of lighting distribution over all points of the surface carries a lot of information about the uniformity. A frequency graph for the lighting distribution value has been constructed and its practical applicability has been substantiated. The relationship between the lighting efficiency and uniformity of the generated lighting has been revealed. With reduced suspension height of the luminary, it is possible to increase significantly the lighting efficiency factor, however, the lighting uniformity deteriorates sharply.

**Discussion and Conclusion.** There is proposed a method for assessing the energy efficiency by the lighting efficiency factor, which determines the proportion of the useful lighting falling on the surface in the total lighting generated by light sources. It is suggested that this indicator can characterize the ecological quality of photoculture, since it has been established its relationship with the uniformity of the created lighting, the impact of which on photoculture is described in the literature.

**Keywords:** greenhouse horticulture, lighting installation, lighting uniformity, flux efficiency, energy efficiency, ecology friendliness

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

*For citation:* Rakutko S.A., Rakutko E.N. Assessment of Lighting Uniformity as a Factor of Energy Efficiency in Greenhouse Horticulture. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(3):470-486. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.470-486>

## Введение

Для удовлетворения потребностей людей в продуктах питания необходимо развивать сельское хозяйство. В то же время его интенсификация сопряжена с усугублением ряда экологических проблем: изменением климата, утратой биоразнообразия, деградацией земель и пресной воды. Развитие методов выращивания растений в искусственных условиях (теплицах, вертикальных фермах, аква-, гидро- и аэропонных установках) позволяет обеспечить стабилизацию производства, уйти от влияния погодных и других условий для получения запланированных объемов урожая [1].

Установки тепличного освещения являются неотъемлемым элементом системы выращивания растений в культивационных сооружениях с искусственным микроклиматом, особенно в тех регионах, где наблюдается недостаток естественного дневного освещения. Их задача – повышение интенсивности фотосинтеза у растений, которое характеризуется величиной ассимиляции  $\text{CO}_2$ , поэтому их также называют «установками ассимиляционного освещения». В таких установках в настоящее время наиболее широко применяются натриевые лампы. Активно используются светодиодные источники [2]. За последние годы практически подтверждено, что светодиодное освещение имеет множество преимуществ, по сравнению с другими источниками света, благодаря их хорошим спектральным характеристикам, сроку службы, эффективности и экологичности [3]. Перспективным является применение гибридных систем освещения. В этом случае различные

типы источников излучения обеспечивают максимальный полезный эффект от их совместного применения [4]. Такая практика является ярким примером реализации наилучших доступных технологий светокультуры [5].

Когда свет распределен по поверхности (и внутреннему объему) ценоза неравномерно, скорость пролиферации (деления) клеток в различных частях растения так же будет неодинаковой. В результате растения одной группы будут иметь различные физиологические и морфологические показатели, хотя и выращиваются в примерно одинаковых условиях. Впоследствии это повлияет на качество как самих растений, так и получаемой от них продукции. Степень соответствия параметров световой среды требованиям растений можно считать экологичностью светокультуры.

Когда условия освещения в зоне выращивания неоднородны, физиологические процессы в них протекают с различной скоростью. При более интенсивном освещении они растут и развиваются быстрее и вскоре управлять такими растениями, находящимися в различном биологическом состоянии, по единому алгоритму становится довольно сложно. Это затрудняет применение оптимальных алгоритмов управления, что снижает энергоэффективность светокультуры. По этой причине для повышения эффективности использования энергии и улучшения качества растений необходимо улучшать равномерность освещения в помещениях и установках для выращивания растений [6]. Однако некоторые теоретические, связанные с влиянием компоновочной схемы осветительной

установки на энергоэффективность освещения, и практические, касающиеся возможности характеристики степени неравномерности освещенности с помощью простых формул, вопросы остаются недостаточно изученными.

Целью данной работы является рассмотрение математического аппарата для описания распределения потока излучения по поверхности, а также обоснование выбора способов характеристики степени неравномерности.

### Обзор литературы

Вопросы равномерности освещения растений в теплице могут иметь большую важность, чем в осветительной практике бытовых и производственных помещений. Человеческий глаз воспринимает интенсивность света в логарифмической шкале, что делает его нечувствительным к весьма значительным перепадам освещения. Растения же более линейно реагируют на уровень освещения. Поэтому различия в интенсивности, незаметные для человеческого глаза, могут иметь значительное влияние на общий рост и урожай растений при промышленном выращивании. В исследовательской практике неравномерность освещения может привести к повышенной вариативности фиксируемого отклика растений на условия выращивания. Отклик варьируется для отдельных экземпляров, растущих на различных участках поверхности. Это может снизить статистическую достоверность и практическую значимость полученных результатов<sup>1</sup>.

Равномерность распределения освещенности по площади выращивания растений является актуальной проблемой [7]. На этот критерий влияет размещение светильников в теплице. Как правило, основной задачей проектирования системы дополнительного освещения является обеспечение среднего уровня освещенности. Однако важна и равномерность распределения потока по всей площади выращивания<sup>2</sup>. Эти данные являются исходными (наряду с типом выращиваемых культур, планировкой теплицы, ее высотой, параметрами светильника) для определения количества и расположения светильников в системе дополнительного освещения теплицы.

Для характеристики однородности создаваемого на поверхности распределения потока используют ряд параметров, например: градиент равномерности, отношение минимального значения освещенности к максимальному, стандартное отклонение от среднего<sup>3</sup>. В отечественной практике часто используют заимствованный из методики светотехнических расчетов коэффициент минимальной освещенности, вычисляемый как отношение средней освещенности к минимальной. Также используют коэффициент, вычисляемый как отношение минимальной освещенности к максимальной [8]. На практике применяют и обратные величины для этих коэффициентов. На основании анализа различных мер однородности распределения светового потока в теплице предложено использовать частотный график результатов измерений освещенности

<sup>1</sup> Albright L. D., Both A. J. Comparisons of Luminaires: Efficacies and System Design // Proceeding of International Lighting in Controlled Environments Workshop (27–30 March 1994). Madison, Wis.: NASA, 1994. Pp. 281–298. URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/62385> (дата обращения: 10.04.2021).

<sup>2</sup> Guidelines for Lighting of Plants in Controlled Environments / G. Dietzer [et al.]. // Proc. Intl. Lighting in Controlled Environments Workshop. Madison, WI: NASA, 1994. Pp. 391–393. URL: [https://www.researchgate.net/publication/234261412\\_Guidelines\\_for\\_lighting\\_of\\_plants\\_in\\_controlled\\_environments](https://www.researchgate.net/publication/234261412_Guidelines_for_lighting_of_plants_in_controlled_environments) (дата обращения: 10.04.2021).

<sup>3</sup> IESNA Lighting Handbook / ed. by M. S. Rea. New York: Illumination Engineering Society of North America, 1993. 1000 p.

во всех точках плоскости выращивания. Такой подход позволяет определить долю точек поверхности, освещенность в которых удовлетворяет некоторым требованиям, например отклоняется от среднего уровня не более чем на 10 %. Другой подход заключается в оценке освещенности в различных точках поверхности и среднего значения освещенности по поверхности [9].

В литературе широко рассмотрены вопросы проектирования систем дополнительного освещения теплиц и их моделирования [10]. Выработаны рекомендации по устройству систем освещения, выпускаемых отдельными производителями. Выявлено, что наибольшее влияние на равномерность света на рабочей плоскости оказывает отражательная способность внутренних поверхностей, следом за этим фактором идет пространственное светораспределение, а количество светодиодов (непосредственно воздействующее на интенсивность освещения) оказывает наименьший эффект [11]. Ученые создали модель равномерности освещения с красной и синей светодиодной матрицей и использовали ее для исследования влияния расстояния между светильником и освещаемой поверхностью на равномерность освещения растений с помощью численного моделирования [12]. Изучена однородность освещения как по интенсивности, так и по спектральному составу [13]. Теоретически обоснованы и практически исследованы вопросы оптимизации светораспределения светильников, обеспечивающих равномерное освещение горизонтальной рабочей поверхности [14]. Разработан генетический алгоритм проектирования тепличных облучательных установок, обеспечивающий равномерность распределения потока по поверхности [15].

Имеются результаты сравнения равномерности света в теплице, создаваемой различными типами светильников, и энергоэффективностью<sup>4</sup>.

Обеспечение энергоэффективности тепличных осветительных установок – важный аспект выращивания растений в искусственных условиях [16]. Энергоэкологический подход является современной междисциплинарной тенденцией и предусматривает взаимосвязь двух процессов: использование энергии обществом и последствия этого для окружающей среды [17]. Данный подход наиболее разработан при оценке эффективности топлива [18]. Сообщается об опыте использования коэффициента энергоэкологичности, учитывающем одновременно экономическую и экологическую целесообразность при выборе источников энергоснабжения [19]. Разработана методика моделирования и анализа энергоэкологичности светокультуры, заключающаяся в определении эффективности преобразования энергии на различных этапах в блоках модели искусственной биоэнергетической системы светокультуры. В одном из блоков модели учитывается распределение потока по освещаемой поверхности [20].

По мнению ряда авторов, распределение света и его поглощение кроной растения более важны, чем электрический коэффициент полезного действия (КПД) прибора. При этом ценность получаемых однородных растений может быть более важна, чем фактор меньшей эффективности использования фотонного потока. Авторы приводят аналогию с поливом: точно так же, как и точное орошение может повысить эффективность использования воды, точное освещение может повысить эффективность электроэнергии [21].

<sup>4</sup> Research on Energy Consumption of HID Lighting / A. J. Both [et al.] // Proc. National Agricultural Demand-Side Management Conf. Ithaca, N.Y.: NRAES, Cornell University, 1992. Pp. 125–134.

Анализ литературных источников показал, что имеется взаимосвязь между равномерностью создаваемой освещенности и степенью экологичности светокультуры, понимаемой как качество среды выращивания. Равномерность освещенности является одним из факторов световой среды.

### Материалы и методы

В исследовании применяется математический аппарат теоретической фотометрии. Понятие облученности  $E$  в фотометрии вводится как величина, характеризующая интенсивность процессов, протекающих под воздействием излучения, и определяется как отношение потока излучения  $d\Phi$  к площади элемента поверхности  $dS$ , на которую он падает:

$$E = \frac{d\Phi}{dS}, \text{ или } E = \frac{1}{S} \int_S d\Phi. \quad (1)$$

В энергетической системе величин облученность измеряется в  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ . В растениеводческой практике в настоящее время чаще используют величину фотонной облученности –  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Эта величина называется освещенностью и измеряется в люксах. При

изучении вопросов равномерности для источника с одним и тем же спектром имеет место пропорциональность между этими величинами, поэтому можно применять любую единицу измерения.

В общем случае поток по освещаемой поверхности распределяется неравномерно (рис. 1). Каждой точке поверхности с координатами  $x, y$  можно сопоставить значение освещенности  $E(x, y)$ .

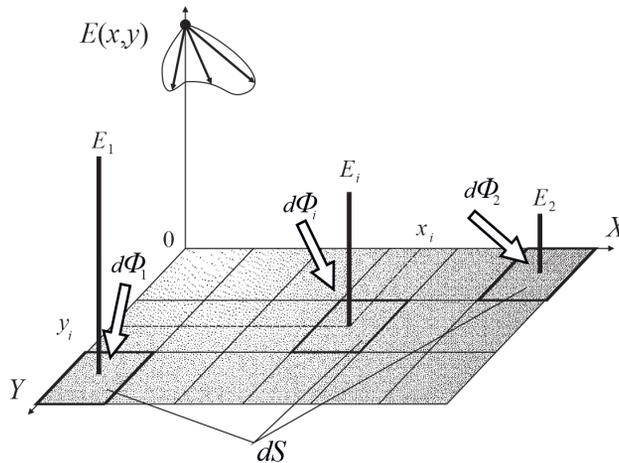
Получаемая в трехмерном пространстве фигура (тело освещенности) имеет объем, вычисляемый по формуле:

$$\Phi = \int_S E(x, y) dS. \quad (2)$$

$\Phi$  численно равен падающему на поверхность потоку излучения.

Оценка эффективности поверхностного использования потока, зависящего от компоновочной схемы осветительной установки, может быть произведена по величине коэффициента полезного использования потока:

$$\text{КПИ} = \frac{\Phi}{\Phi_{\text{ис}}} 100\%, \quad (3)$$



Р и с. 1. Общий случай распределения потока  $\Phi$  по поверхности  $S$

F i g. 1. The general case of distributing the flow  $\Phi$  on the surface  $S$

где  $\Phi_{ис}$  – поток, излучаемый источником света в пространство.

Если  $E(x,y) = const$ , то можно говорить о средней освещенности:

$$E_{cp} = \frac{\Phi}{S}, \quad (4)$$

где  $\Phi$  – полный поток, падающий на поверхность площадью  $S$ .

Представляет интерес кривая, получаемая сечением тела освещенности плоскостью, перпендикулярной освещаемой поверхности и проходящей через проекцию точки подвеса светильника. Для плоской поверхности, как правило, горизонтально расположенной, эта кривая называется кривой горизонтальной освещенности (КГО). Типичный вид КГО показан на рисунке 2.

Характерными точками здесь следует выделить максимальное значение освещенности  $E_{max}$ ; минимальное значение освещенности  $E_{min}$  в точке поверхности с координатой  $x_{кр}$ ; среднее значение освещенности  $E_{cp}$ , которое может быть найдено из нижеследующих вычислений.

Пусть КГО построена в плоскости, перпендикулярной поверхности диска и проходящей через его центр. Дадим координате  $x$  приращение  $dx$ .

Площадь кольца с радиусом  $x$

$$dS = 2\pi x dx. \quad (5)$$

Поток, падающий на это кольцо

$$d\Phi = E_x dS, \quad (6)$$

где  $E_x$  – освещенность в точке с координатой  $x$  (определяется по КГО).

Тогда

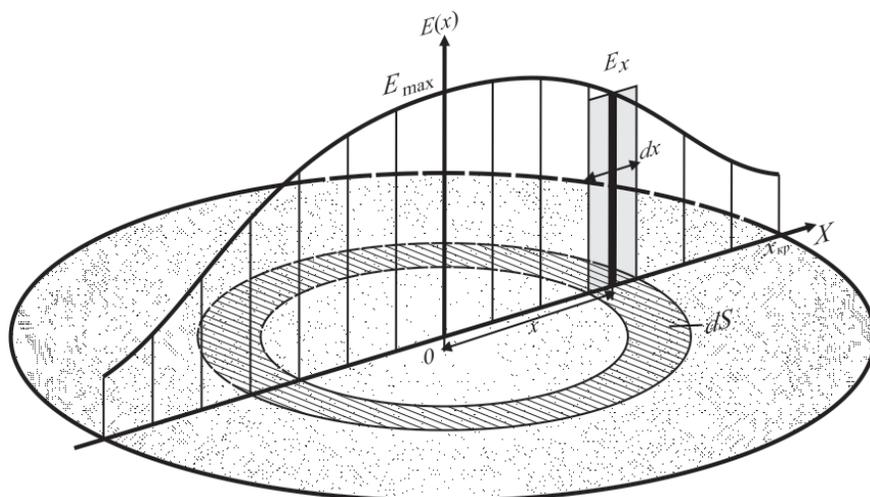
$$d\Phi = E_x 2\pi x dx. \quad (7)$$

Поток, падающий на диск радиусом  $x_{кр}$

$$\Phi = 2\pi \int_0^{x_{кр}} E(x)x dx. \quad (8)$$

Площадь диска

$$S = \pi x_{кр}^2. \quad (9)$$



Р и с. 2. Нахождение среднего значения освещенности от круглосимметричного светильника  
 F i g. 2. Finding the average value of illumination from a circular symmetric luminaire

Средняя освещенность для рассмотренного частного случая

$$E_{cp} = 2 \frac{\int_0^{x_{кр}} E(x) x dx}{x_{кр}^2}. \quad (10)$$

В общем случае возможны различные подходы к определению среднего значения:

1. Среднее между минимальным и максимальным значением

$$E_{cp1} = \frac{E_{max} + E_{min}}{2}; \quad (11)$$

2. Среднее для всего множества расчетных точек поверхности

$$E_{cp2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i. \quad (12)$$

Равномерность хода кривой горизонтальной освещенности характеризуется коэффициентом равномерности. Здесь также возможны различные подходы:

1. Через максимальное и минимальное значения освещенности

$$z_1 = \frac{E_{max}}{E_{min}}; \quad (13)$$

2. Через среднее и минимальное значения освещенности

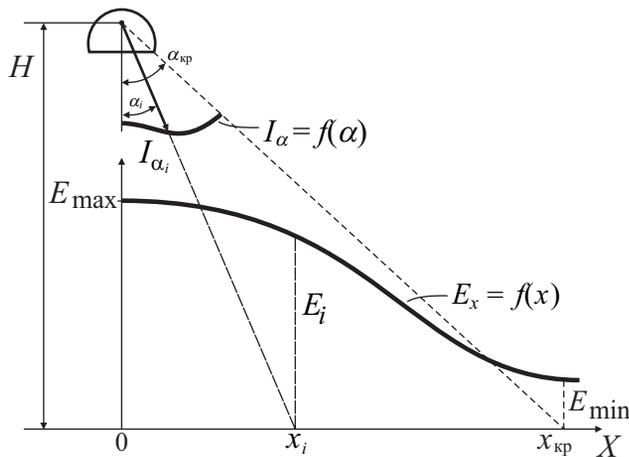
$$z_{21} = \frac{E_{cp1}}{E_{min}} \text{ и } z_{22} = \frac{E_{cp2}}{E_{min}}. \quad (14)$$

При равномерном характере кривой  $E(x)$   $E_{min} = E_{max} = E_{cp}$  значения этих коэффициентов равны единице. При больших отклонениях кривой  $E(x)$  от равномерного характера их значения увеличиваются.

Для построения КГО каждой точке с координатой  $x_i$  необходимо сопоставить значение освещенности  $E_i$  в этой точке (рис. 3).

В соответствии с основным законом светотехники возможно построить распределение освещенности в точках поверхности по известному пространственному распределению потока, заданному кривыми силы света (КСС) в меридиональных плоскостях.

Создаваемая освещенность  $E(x,y)$  пропорциональна силе света в данном направлении  $I_\alpha$  и косинусу угла  $\alpha$



Р и с. 3. Построение КГО по КСС

F i g. 3. Construction horizontal light curve on the light intensity curve

между вертикалью и нормалью к поверхности и обратно пропорциональна квадрату высоты светильника  $H$  над плоскостью:

$$E = \frac{I_\alpha \cos^3 \alpha}{H^2}. \quad (15)$$

Пусть освещаемая поверхность представляет собой прямоугольник размерами  $A \times B$ , проекция подвеса светильника отстоит от краев поверхности соответственно на  $a$  и  $b$ .

Для произвольной расчетной точки на поверхности с координатами  $x$  и  $y$  расстояние от нее до проекции светильника на плоскость

$$R = \sqrt{(y - b)^2 + (x - a)^2}. \quad (16)$$

Расстояние от светового центра светильника до расчетной точки

$$L = \sqrt{R^2 + H^2}. \quad (17)$$

Косинус угла между вертикалью и направлением на расчетную точку

$$\cos \alpha = \frac{H}{L} = \frac{H}{\sqrt{H^2 + (y - b)^2 + (x - a)^2}}. \quad (18)$$

При косинусном светораспределении зависимость силы излучения  $I_\alpha$  в произвольном направлении  $\alpha$  связана с осевой силой света  $I_0$  выражением

$$I_\alpha = I_0 \cos \alpha. \quad (19)$$

При этом

$$I_0 = \frac{\Phi_{\text{ис}}}{\pi}. \quad (20)$$

Окончательно получаем

$$E(x, y) = \frac{I_0 H^2}{(H^2 + (y - b)^2 + (x - a)^2)^2}. \quad (21)$$

Для экспериментальной проверки измерялись значения освещенности, создаваемые светодиодным светильником на горизонтальной плоскости, моделирующей поверхность для выращивания растений.

Высота подвеса светильника  $H = 2,40$  м. Размер рабочей поверхности  $A = 1,90$  м,  $B = 0,90$  м. Проекция подвеса светильника отстоит от краев поверхности на  $a = 0,30$  м и  $b = 0,70$  м соответственно.

На рисунке 4 совмещенно показаны формируемое распределение освещенности и горшочки с растениями перца, размещенные на освещаемой поверхности. В качестве светильника взят светодиодный излучатель мощностью 100 Вт. Излучаемый им световой поток составлял  $\Phi_{\text{ис}} = 9\,027$  лм.

Измерения вели с трехкратной повторностью. Полученные результаты обрабатывали в электронных таблицах Excel.

#### Результаты исследования

Вычисленные значения в различных точках освещаемой плоскости показаны в таблице на рисунке 5. Они соответствуют экспериментально полученным значениям в тех же точках, поскольку светораспределение светильника соответствует косинусному закону. Поэтому дальнейший анализ ведется для полученных в результате моделирования значений освещенности.

Как и ожидалось, для данного типа светораспределения светильника максимальная освещенность приходится на точку его проекции на плоскость, минимальная – на дальний угол прямоугольной поверхности.

На рисунке 6 показано тело освещенности, на рисунке 7 – картина горизонтальных изолюкс, получаемая сечением тела освещенности плоскостями, параллельными рабочей поверхности.

При исходных данных осевая сила света составила  $I_0 = 2\,873$  кд,

максимальная освещенность  $E_{\max} = 499$  лк, минимальная освещенность  $E_{\min} = 290$  лк, средние освещенности  $E_{\text{ср}1} = 394$  лк и  $E_{\text{ср}2} = 429$  лк. Значения коэффициентов, характеризующих неравномерность освещения:  $z_1 = 1,72$ ;  $z_{21} = 1,36$ ;  $z_{22} = 1,48$  отн.ед.

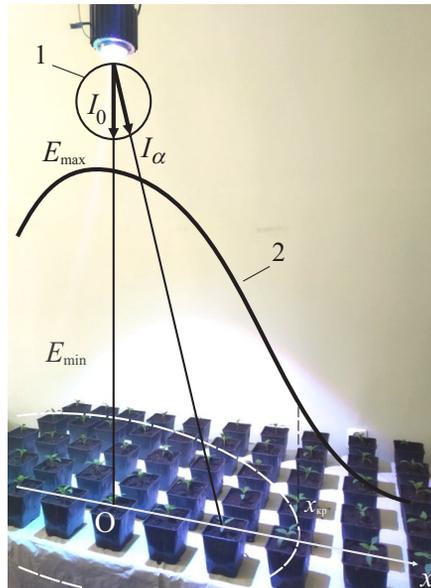
Меньшее значение  $z_{21}$  не означает лучшую равномерность распределения освещенности. Для каждого способа вычисления коэффициентов  $z$  должны быть свои допустимые нормы. Представляется более обоснованным применение коэффициента  $z_{22}$ , поскольку он при расчете среднего учитывает картину распределения освещенности по всем точкам поверхности.

На рисунке 8 показан частотный график распределения величины освещенности всех точек рабочей поверхности. Он отображает количество точек на поверхности, освещенность в которых попадает в интервал между двумя соседними изолуксами. Так, по графику

можно найти, что освещенность от 400 до 499 лк наблюдается на  $28,7 + 44,4 = 73,1$  % площади поверхности.

В соответствии с формулой (2) падающий на рабочую поверхность поток составляет  $\Phi = 733$  лм. То есть коэффициент полезного использования (КПИ) потока 8,1 %. Это очень низкая величина, поэтому представляет интерес выявление зависимости КПИ потока от различных параметров компоновочной схемы. Примем, что светильник находится над серединой освещаемой поверхности. Анализ показывает, что при фиксированном светораспределении КПИ потока зависит от высоты подвеса излучателя (рис. 9).

При снижении высоты подвеса до 0,5 м возможно повысить КПИ до 65 %. Однако при этом резко возрастает неравномерность распределения освещенности. При высотах более 3 м неравномерность, характеризуемая коэффициентом  $z_{22}$ , стремится к единице,



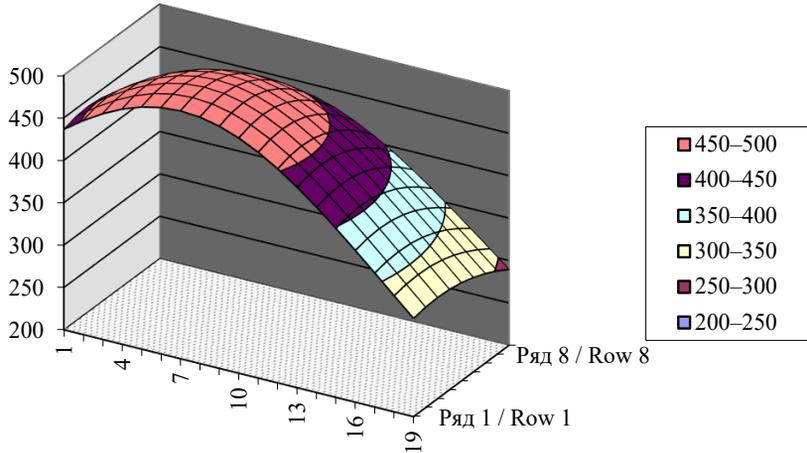
Р и с. 4. Распределение освещенности по верхушкам растений на натурной модели:  
1 – КСС; 2 – КГО

F i g. 4. Lighting distribution on the tops of plants in the full-scale model:  
1 – light intensity curve; 2 – horizontal light curve

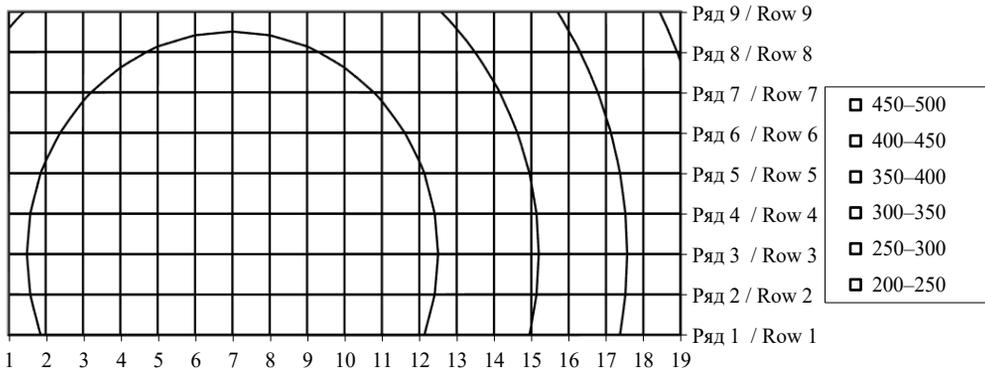
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
1	0,1	436,2	452,2	465,9	477,1	485,3	490,3	490,3	485,3	477,1	465,9	452,2	436,2	418,3	399,1	378,8	357,9	336,8	315,8
2	0,2	440,5	456,7	470,7	482,0	490,3	495,4	497,1	495,4	482,0	470,7	456,7	440,5	422,4	402,8	382,3	361,1	339,7	318,4
3	0,3	441,9	458,2	472,3	483,6	492,0	497,1	498,9	492,0	483,6	472,3	458,2	441,9	423,7	404,1	383,4	362,2	340,7	319,3
4	0,4	440,5	456,7	470,7	482,0	490,3	495,4	497,1	495,4	482,0	470,7	456,7	440,5	422,4	402,8	382,3	361,1	339,7	318,4
5	0,5	436,2	452,2	465,9	477,1	485,3	490,3	492,0	485,3	477,1	465,9	452,2	436,2	418,3	399,1	378,8	357,9	336,8	315,8
6	0,6	429,2	444,8	458,2	469,1	477,1	482,0	483,6	477,1	469,1	458,2	444,8	429,2	411,8	393,0	373,1	352,7	332,1	311,4
7	0,7	419,7	434,8	447,7	458,2	465,9	470,7	472,3	465,9	458,2	447,7	434,8	419,7	402,8	384,6	365,4	345,6	325,6	305,5
8	0,8	407,9	422,4	434,8	444,8	452,2	456,7	458,2	452,2	444,8	434,8	422,4	407,9	391,7	374,3	355,8	336,8	317,5	298,2
9	0,9	394,2	407,9	419,7	429,2	436,2	440,5	441,9	436,2	429,2	419,7	407,9	394,2	378,8	362,2	344,6	326,5	308,0	289,6

Р и с. 5. Значения освещенности в расчетных точках поверхности

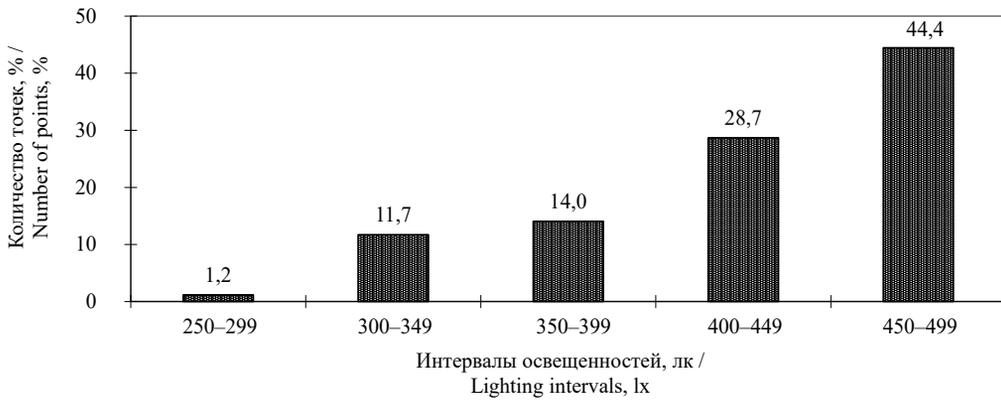
Fig. 5. Lighting values at design points of the surface



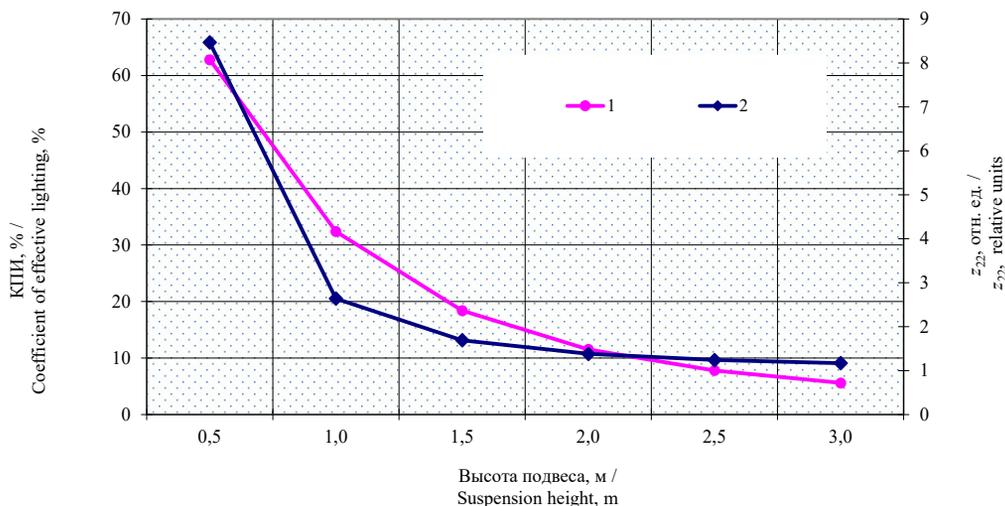
Р и с. 6. Тело освещенности  
F i g. 6. Body of illumination



Р и с. 7. Картина горизонтальных изолюкс  
F i g. 7. Picture of horizontal isoluxes



Р и с. 8. Частотный график  
F i g. 8. Frequency chart



Р и с. 9. Зависимость КПИ потока и равномерности создаваемой освещенности от высоты подвеса светильника: 1 – КПД, %; 2 –  $z_{22}$ , отн. ед.

Fig. 9. Dependence of the coefficient of effective lighting and uniformity of lighting on the suspension height of the luminary: 1 – efficiency, %; 2 –  $z_{22}$ , relative units

однако при этом резко (до 10 %) снижается величина КПИ.

### Обсуждение и заключение

Управление освещением имеет решающее значение для выращивания сельскохозяйственных культур в контролируемой среде. Наибольшее внимание среди факторов освещения обычно уделяют фотопериоду (продолжительности светового дня), количеству (интенсивности) и качеству (спектральному составу) света.

Равномерность распределения потока по освещаемой поверхности часто игнорируется, несмотря на важность этого фактора. При выращивании тепличных или комнатных культур однородность света не менее важна, чем другие факторы.

Равномерность освещения оказывает большое влияние на распределение уровня урожайности по площади размещения растений, получающих световой поток различной интенсивности. Свет регулирует рост, развитие (в том числе

цветение), а также интенсивность физиологических процессов (фотосинтез, транспирацию) растений.

Обеспечение равномерности важно при выборе ориентации и остеклении новых теплиц, размещении системы затенения, а также для осветительных установок, включая фотопериодические, дополнительные и осветительные приборы (из единственного источника).

Представленный в работе математический аппарат позволяет оценить степень создаваемой равномерности в теплице, а также сопоставить ее с энергоэффективностью осветительной установки.

По нашему мнению, совместное рассмотрение вопросов энергоэффективности и экологичности позволит выйти на трактовку термина энергоэкологичности светокультуры. Это является объектом дискуссии и одним из направлений наших дальнейших исследований.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Urban Horticulture for Food Secure Cities through and beyond COVID-19 / M. M. Khan, M. T. Akram, R. Janke [et al.]. – DOI [10.3390/su12229592](https://doi.org/10.3390/su12229592). – Текст : электронный // Sustainability. – 2020. – Vol. 12, Issue 22.
2. **Dutta Gupta, S. D.** Fundamentals and Applications of Light-Emitting Diodes (LEDs) in in Vitro Plant Growth and Morphogenesis / S. D. Dutta Gupta, B. Jatothu. – DOI [10.1007/s11816-013-0277-0](https://doi.org/10.1007/s11816-013-0277-0) // Plant Biotechnology Reports. – 2013. – Vol. 7. – Pp. 211–220.
3. Horticultural Lighting System Optimalization: A Review / L. Sipos, I. F. Boros, L. Csambalik [et al.]. – DOI [10.1016/j.scienta.2020.109631](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109631). – Текст : электронный // Scientia Horticulturae. – 2020. – Vol. 273.
4. Hybride Irradiation as Best Available Practice in Artificial Plant Lighting / S. A. Rakutko, A. Avotins, J. Gruduls, E. N. Rakutko. – DOI [10.22616/ERDev.2020.19.TF254](https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF254) // Proceedings of 19<sup>th</sup> International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (20–25 May 2020). – Jelgava, 2020. – Pp. 1076–1081.
5. **Ракутько, С. А.** Энергоэкологические основы наилучших доступных технологий светокультуры / С. А. Ракутько. – DOI [10.24411/0131-5226-2019-10121](https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10121) // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2019. – № 1. – С. 44–60. – Рез. англ.
6. **Xu, Y.** Seven Dimensions of Light in Regulating Plant Growth / Y. Xu. – DOI [10.17660/ActaHortic.2016.1134.56](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.56) // Proceedings of ISHS Acta Horticulturae 1134: VIII International Symposium on Light in Horticulture. – 2016. – Vol. 1134. – Pp. 445–452.
7. Comparison and Perspective of Conventional and LED Lighting for Photobiology and Industry Applications / B.-S. Wu, Ya. Hitti, S. MacPherson [et al.]. – DOI [10.1016/j.envexpbot.2019.103953](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103953). – Текст : электронный // Environmental and Experimental Botany. – 2020. – Vol. 171.
8. **Moreno, I.** Illumination Uniformity Assessment Based on Human Vision / I. Moreno. – DOI [10.1364/OL.35.004030](https://doi.org/10.1364/OL.35.004030) // Optics Letters. – 2010. – Vol. 35, Issue 23. – Pp. 4030–4032.
9. **Ciolkosz, D. E.** Selection and Placement of Greenhouse Luminaires for Uniformity / D. E. Ciolkosz, A. J. Both, L. D. Albright. – DOI [10.13031/2013.6842](https://doi.org/10.13031/2013.6842) // Applied Engineering in Agriculture. – 2001. – Vol. 17, Issue 6. – Pp. 875–882.
10. **Saito, K.** Evaluation of the Light Environment of a Plant Factory with Artificial Light by Using an Optical Simulation / K. Saito, Y. Ishigami, E. Goto. – DOI [10.3390/agronomy10111663](https://doi.org/10.3390/agronomy10111663). – Текст : электронный // Agronomy. – 2020. – Vol. 10, Issue 11.
11. **Xu, Y.** Analysis of the Uniformity of Light in a Plant Growth Chamber / Y. Xu, H. Wang, W. Nsengiyumva. – DOI [10.1109/UV.2018.8642131](https://doi.org/10.1109/UV.2018.8642131). – Текст : электронный // Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference on Universal Village. – 2018.
12. Study on Illumination Distribution and Uniformity for LED Plant Light Source Array / Z. Zhu, S. S. Ying, H. J. Hu [et al.]. – DOI [10.3788/gzxb20144308.0822004](https://doi.org/10.3788/gzxb20144308.0822004) // Acta Agriculturae Zhejiangensis. – 2015. – Vol. 27. – Pp. 1489–1493.
13. High Uniformity LED Panel-Light for Plant Lighting / Zh. Shuai, W. Shang-Sheng, M. Bing-Xu [et al.]. – DOI [10.3788/fgxb20183903.0403](https://doi.org/10.3788/fgxb20183903.0403) // Chinese Journal of Luminescence. – 2018. – Vol. 39, Issue 3. – Pp. 403–413.
14. **Кочетков, Н. П.** Определение кривой силы света, обеспечивающей равномерное освещение горизонтальной рабочей поверхности / Н. П. Кочетков, Т. А. Широбокова, Т. Р. Галлямова // Достижения науки и техники АПК. – 2013. – № 8. – С. 64–66. – URL: <https://clck.ru/Vrmgm> (дата обращения: 10.04.2021). – Рез. англ.
15. **Ferentinos, K. P.** Optimal Design of Plant Lighting System by Genetic Algorithms / K. P. Ferentinos, L. D. Albright. – DOI [10.1016/j.engappai.2004.11.005](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2004.11.005) // Intelligence. – 2005. – Vol. 18, Issue 4. – Pp. 473–484.
16. **Zhang, Y.** Comparison of Energy Use Efficiency of Greenhouse and Indoor Plant Factory System / Y. Zhang, M. Kacira. – DOI [10.17660/eJHS.2020/85.5.2](https://doi.org/10.17660/eJHS.2020/85.5.2) // European Journal of Horticultural Science. – 2020. – Vol. 85, Issue 5. – Pp. 310–320.

17. Urban Horticulture in Retail Parks: Environmental Assessment of the Potential Implementation of Rooftop Greenhouses in European and South American Cities / E. Sanyé-Mengual, J. Martínez-Blanco, M. Finkbeiner [et al.]. – DOI [10.1016/j.jclepro.2017.11.103](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.103) // Journal of Cleaner Production. – 2018. – Vol. 172. – Pp. 3081–3091.

18. **Сорока, Б. С.** Использование топлива и загрязнение окружающей среды. (Часть 1. Энергоэкология использования топлива и нормирование вредных выбросов) / Б. С. Сорока // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2007. – № 2. – С. 39–52. – URL: <https://energy.bntu.by/jour/article/view/646> (дата обращения: 10.04.2021). – Рез. англ.

19. Энергоэкологическая оценка использования различных генерирующих источников в сельском хозяйстве / А. Ю. Брюханов, И. А. Субботин, Е. В. Тимофеев, А. В. Эрк. – DOI [10.15507/2658-4123.029.201903.366-382](https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.366-382) // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 3. – С. 366–382. – Рез. англ.

20. **Ракутько, С. А.** Моделирование и численный анализ энергоэкологичности светокультуры / С. А. Ракутько, Е. Н. Ракутько. – DOI [10.22314/20737599-2019-13-3-11-17](https://doi.org/10.22314/20737599-2019-13-3-11-17) // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2019. – Т. 13, № 3. – С. 11–17. – Рез. англ.

21. **Nelson, J. A.** Economic Analysis of Greenhouse Lighting: Light Emitting Diodes vs. High Intensity Discharge Fixtures / J. A. Nelson, B. Bugbee. – DOI [10.1371/journal.pone.0099010](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099010). – Текст : электронный // PLoS ONE. – 2014. – Vol. 9, Issue 6.

*Поступила 12.04.2021; одобрена после рецензирования 14.05.2021; принята к публикации 21.05.2021*

*Об авторах:*

**Ракутько Сергей Анатольевич**, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией энергоэкологии светокультуры Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Филитовское ш., д. 3), доктор технических наук, доцент, Researcher ID: [B-2745-2014](https://orcid.org/0000-0002-2454-4534), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2454-4534>, Scopus ID: [26040971100](https://orcid.org/0000-0002-2454-4534), [sergej1964@yandex.ru](mailto:sergej1964@yandex.ru)

**Ракутько Елена Николаевна**, научный сотрудник Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Филитовское ш., д. 3), Researcher ID: [AAW-6856-2021](https://orcid.org/0000-0002-3536-9639), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3536-9639>, [elena.rakutko@mail.ru](mailto:elena.rakutko@mail.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

С. А. Ракутько – научное руководство, формулирование основной концепции исследования и структуры статьи, написание первоначального варианта статьи.

Е. Н. Ракутько – анализ научных источников, математическое моделирование, написание статьи.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Khan M.M., Akram M.T., Janke R., et al. Urban Horticulture for Food Secure Cities through and beyond COVID-19. *Sustainability*. 2020; 12(22). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/su12229592>

2. Dutta Gupta S.D., Jatothu B. Fundamentals and Applications of Light-Emitting Diodes (LEDs) in in Vitro Plant Growth and Morphogenesis. *Plant Biotechnology Reports*. 2013; 7:211-220. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11816-013-0277-0>

3. Sipos L., Boros I.F., Csambalik L., et al. Horticultural Lighting System Optimalization: A Review. *Scientia Horticulturae*. 2020; 273. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109631>

4. Rakutko S.A., Avotins A., Gruduls J., Rakutko E.N. Hybride Irradiation as Best Available Practice in Artificial Plant Lighting. In: Proceedings of 19<sup>th</sup> International Scientific Conference “Engineering 484

for Rural Development” (20-25 May 2020). Jelgava; 2020. Pp. 1076-1081. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF254>

5. Rakutko S.A. Energy and Ecological Basis of Best Available Techniques of Plant Lighting. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies and Technical Means for Mechanized Production of Crop and Livestock Products. 2019; (1):44-60. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10121>

6. Xu Y. Seven Dimensions of Light in Regulating Plant Growth. In: ISHS Acta Horticulturae 1134: VIII International Symposium on Light in Horticulture. 2016; 1134:445-452. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.56>

7. Wu B.-S., Hitti Ya., MacPherson S., et al. Comparison and Perspective of Conventional and LED Lighting for Photobiology and Industry Applications. *Environmental and Experimental Botany*. 2020; 171. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103953>

8. Moreno I. Illumination Uniformity Assessment Based on Human Vision. *Optics Letters*. 2010; 35(23):4030-4032. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1364/OL.35.004030>

9. Ciolkosz D.E., Both A.J., Albright L.D. Selection and Placement of Greenhouse Luminaires for Uniformity. *Applied Engineering in Agriculture*. 2001; 17(6):875-882. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.6842>

10. Saito K., Ishigami Y., Goto E. Evaluation of the Light Environment of a Plant Factory with Artificial Light by Using an Optical Simulation. *Agronomy*. 2020; 10(11). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10111663>

11. Xu Y., Wang H., Nsengiyumva W. Analysis of the Uniformity of Light in a Plant Growth Chamber. In: Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference on Universal Village. 2018. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/UV.2018.8642131>

12. Zhu Z., Ying S.S., Hu H.J., et al. Study on Illumination Distribution and Uniformity for LED Plant Light Source Array. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*. 2015; 27:1489-1493. (In Chin.) DOI: <https://doi.org/10.3788/gzxb20144308.0822004>

13. Shuai Zh., Shang-Sheng W., Bing-Xu M., et al. High Uniformity LED Panel-Light for Plant Lighting. *Chinese Journal of Luminescence*. 2018; 39(3):403-413. (In Chin.) DOI: <https://doi.org/10.3788/fjxb20183903.0403>

14. Kochetkov N.P., Shirobokova T.A., Gallyamova T.R. Definition Light Didistribution, Provides Un Form Lighting Horizontal Surface. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AIC. 2013; (8):64-66. Available at: <https://clck.ru/Vrmgm> (accessed 10.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

15. Ferentinos K.P., Albright L.D. Optimal Design of Plant Lighting System by Genetic Algorithms. *Intelligence*. 2005; 18(4):473-484. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2004.11.005>

16. Zhang Y., Kacira M. Comparison of Energy Use Efficiency of Greenhouse and Indoor Plant Factory System. *European Journal of Horticultural Science*. 2020; 85(5):310-320. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17660/eJHS.2020/85.5.2>

17. Sanyé-Mengual E., Martínez-Blanco J., Finkbeiner M., et al. Urban Horticulture in Retail Parks: Environmental Assessment of the Potential Implementation of Rooftop Greenhouses in European and South American Cities. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 172:3081-3091. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.103>

18. Soroka B.S. Fuel Utilization and Environment Pollution. (Part 1. Energy Ecology of Fuel Utilization and Standardizing of Hazardous Effluents). *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obedineniy SNG* = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations. 2007; (2):39-52. Available at: <https://energy.bntu.by/jour/article/view/646> (accessed 10.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

19. Briukhanov A.Yu., Subbotin I.A., Timofeev E.V., Erk A.F. Energy and Environment Assessment of Agricultural Application of Power Generating Sources. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):366-382. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.366-382>

20. Rakutko S.A., Rakutko E.N. Simulation and Numerical Analysis of Energy-and-Ecological Compatibility of Indoor Plant Lighting. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2019; 13(3):11-17. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22314/20737599-2019-13-3-11-17>

21. Nelson J.A., Bugbee B. Economic Analysis of Greenhouse Lighting: Light Emitting Diodes vs. High Intensity Discharge Fixtures. *PLoS ONE*. 2014; 9(6). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099010>

*Received 12.04.2021; approved after reviewing 14.05.2021; accepted for publication 21.05.2021*

*About the authors:*

**Sergey A. Rakutko**, Chief Researcher, Head of the Laboratory of Energy Ecology of Light Culture, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), D.Sc. (Engr.), Associate Professor, Researcher ID: B-2745-2014, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2454-4534>, Scopus ID: 26040971100, [sergej1964@yandex.ru](mailto:sergej1964@yandex.ru)

**Elena N. Rakutko**, Researcher, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), Researcher ID: AAW-6856-2021, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3536-9639>, [elena.rakutko@mail.ru](mailto:elena.rakutko@mail.ru)

*Contribution of the authors:*

S. A. Rakutko – scientific guidance, formulation of the basic research concept and structure of the article, writing the initial version of the article.

E. N. Rakutko – analysis of scientific sources, mathematical modeling, article writing.

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

### Информация для авторов и читателей

Научный журнал «Инженерные технологии и системы» публикует оригинальные научные исследования, способствующие развитию науки в области инженерных систем и технологий.

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

01.03.02 Приборы и методы экспериментальной физики

01.03.06 Оптика

01.03.13 Электрофизика, электрофизические установки

04.03.01 Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

04.03.02 Электротехнологии, электрооборудование и электроснабжение агропромышленного комплекса

Не допускается направление в редакцию уже опубликованных статей или статей, отправленных на публикацию в другие журналы. **В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий опубликованная статья будет ретрагирована (отозвана из печати).** Мониторинг несанкционированного цитирования осуществляется с помощью систем «Антиплагиат» и CrossCheck.

Журнал приветствует статьи, имеющие потенциально высокий импакт-фактор и/или содержащие материал о значительных достижениях в указанных направлениях. Особое внимание следует уделить качеству перевода. Желательно, чтобы он был выполнен носителем английского языка.

При подготовке статьи к публикации в журнале «Инженерные технологии и системы» необходимо учесть следующие пункты.

1. Указать **УДК**.

2. **Заголовок статьи** должен кратко и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного исследования. *Приводится на русском и английском языках.*

3. **Аннотация** (200–250 слов) выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В ней должны быть четко обозначены следующие составные части:

1) Введение (Introduction);

2) Материалы и методы (Materials and Methods);

3) Результаты исследования (Results);

4) Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion).

*Приводится на русском и английском языках.*

4. **Ключевые слова** (5–10) являются поисковым образом научной статьи. В связи с этим они должны отражать основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования. *Приводятся на русском и английском языках.*

5. **Благодарности.** В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам. *Приводятся на русском и английском языках.*

6. **Основной текст** статьи излагается на русском или английском языках.

1) Введение – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

2) Обзор литературы. Необходимо описать основные (последние по времени) исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы; выделить нерешенные вопросы в пределах общей проблемы, которым посвящена статья.

3) Материалы и методы. В данном разделе описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, использованная аппаратура; даются подробные сведения об объекте исследования; указывается последовательность выполнения исследования и обосновывается выбор используемых методов (наблюдение, опрос, тестирование, эксперимент, лабораторный опыт и т. д.).

4) Результаты исследования. Это основной раздел, цель которого – при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно эти данные.

5) Обсуждение и заключение. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области.

7. **Список использованных источников** (оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.100–2018). Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 30–40 источников. Из них за последние 3 года – не менее 20, иностранных – не менее 15. Следует указать DOI или адрес доступа в сети Интернет. *Оформляется на русском и английском языках.*

8. **Об авторах.** Ф.И.О., организация(и), адрес организации(й) (требуется указать все места работы автора, в которых выполнялись исследования (постоянное место, место выполнения проекта и др.)), должность и ученое звание, ORCID, Researcher ID, электронная почта, телефон, почтовый адрес для отправки авторского экземпляра. *Приводится на русском и английском языках.*

9. **Заявленный вклад соавторов.** В конце 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).

Допускается свободное воспроизведение материалов журнала в личных целях и свободное использование в информационных, научных, учебных и культурных целях в соответствии со ст. 1273 и 1274 гл. 70 ч. IV Гражданского кодекса РФ. Иные виды использования возможны только после заключения соответствующих письменных соглашений с правообладателем.

Журнал распространяется по подписке, заявкам высших учебных заведений, учреждений образования и отдельных лиц. Подписной индекс – 70539.

Вдовин Сергей Михайлович – главный редактор. Тел.: +7 (8342) 24-48-88.

Сенин Петр Васильевич – заместитель главного редактора. Тел.: +7 (8342) 23-32-60.

Гордина Светлана Викторовна – ответственный секретарь. Тел.: +7 (8342) 48-14-24.



### Information for authors and readers of the journal

*Engineering Technologies and Systems* journal accepts unpublished earlier original research results promoting the development of science in the field of engineering systems and technologies.

The journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, where basic scientific results of dissertations for the degree of Doctor and Candidate of Sciences should be published for scientific specialties and branches of science:

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Technologies, Machinery and Equipment for Agro-Industries

Electrotechnics, Electrical Equipment and Power Supply in Agro-Industries

It is not allowed to submit papers that have already been published or sent for publication to other journals. **In the case of multiple submission of a manuscript, the published article will be retracted.** Monitoring of unauthorized citation is implemented by means of AntiPlagiat and CrossCheck systems.

The journal gives preference to the articles with potentially high impact factor and/or containing materials about significant achievements in the specified areas of science. Special attention should be paid to the quality of the translation. Preferably it should be made by a native English speaker.

To submit an article in the journal *Engineering Technologies and Systems* you should know:

1. It is necessary to indicate the **Universal Decimal Classification (UDC)** code.

2. **The title of the article** should accurately reflect the content of the article, the subject matter and the results of the research conducted.

*The title should be written in Russian and English.*

3. **The abstract** (200–250 words) serves as an enhanced title of the article and briefly presents its content. The abstract consists of the following components:

1) Introduction;

2) Materials and Methods;

3) Results;

4) Discussion and Conclusion.

*The abstract should be written in Russian and English.*

4. **Keywords** (5–10) make the search profile of the scientific article. In this regard, they should reflect the main provisions, achievements, results and terminology of the scientific research.

*Keywords should be written in Russian and English.*

5. **Acknowledgements.** In this section the author may mention the people who helped them to prepare the article or the organizations that provided financial support. It is considered good style to express gratitude to anonymous reviewers.

*Acknowledgements should be written in Russian and English.*

6. **The main body** of the article should be written in Russian or in English.

1) **Introduction.** It contains formulation of the scientific problem, its relevance, connection with the most important tasks to be solved, the importance for the development of a particular area of science or practical activities.

2) **Literature Review.** It is necessary to describe the main (recent) pieces of research and publications relied upon by the author, modern views on the problem, difficulties in solving the problem as well as to highlight the unresolved issues within the general problem of the article.

3) **Materials and Methods.** This section describes the process of designing the experiment, the methods and equipment used; it gives detailed information about the subject and sequence of the research, justifies the choice of the methods used (observation, survey, testing, experiment, etc.).

4) **Results.** This is the main section, the purpose of which is to prove the working hypothesis (hypotheses) by analyzing, generalizing and explaining the data. The results should be brief, but they should provide sufficient information to evaluate the conclusions drawn. It should also be justified why the particular data were chosen for the analysis.

5) **Discussion and Conclusion.** In conclusion, the results of understanding the topic should be summarized; conclusions, generalizations and recommendations arising from the work should be made, their practical significance should be emphasized and the main directions for further research in the studied area should be determined.

7. **References** should be given in accordance with the requirements of the *GOST R 7.0.100–2018* standard. The original sources from scientific journals included in the global citation indices should be cited first of all. It is desirable to refer to 30–40 sources. Of these, at least 20 sources should be those published over the past 3 years and at least 15 foreign ones. DOI or the URL of the source should be indicated.

*References should be written in Russian and English.*

8. Information **about the author(s)** includes: the author's first name and last name, the name of the institution and its address (it is required to specify all the institutions where the author works and where the research was conducted (permanent place of work, the place where the project was done, etc.)). The author's position and academic title, ORCID, Researcher ID, e-mail, phone number, postal address for sending a personal copy of the journal issue.

*Information about the authors should be written in Russian and English.*

9. **Contribution of the authors.** At the end of the manuscript, the authors should include notes that explain the actual contribution of each co-author to the work performed.

*Contribution of the authors should be written in Russian and English.*

#### 10. **Manuscript Format Guidelines.**

1) The manuscript should be typed in the Microsoft Word text processing program for Windows (.doc, .docx, .rtf): sheet size – A4, Times New Roman font, font size – 14, line spacing – 1.5. Manual hyphenation is not allowed. It is forbidden to use double spaces in the text, as well as to indent (red line) using spaces.

2) Formulas are typed by combining the main font and the Symbol font (exception for fractions, sums, square root) in Microsoft Equation 3.0 (Formula Editor in Microsoft Word) or Math Type 6. Latin symbols in formulas and notation (both in the text and in the figures) typed in italics. Formulas are numbered in parentheses. Only those formulas and equations referenced in the following presentation should be numbered.

3) All titles, signatures and structural elements of graphs, tables, charts, etc., are to be provided in Russian and English.

4) Figures can be presented in raster or vector format with a resolution of at least 300 dpi. They should allow text editing and resizability. All graphic data are placed in the text of the article, as well as sent additionally as separate files. Diverse illustrations should be brought to a single style of graphic performance, while respecting the uniformity of their design. Graphs, charts and diagrams must be drawn up in Microsoft Excel.

When submitting an article to the journal, the author agrees with the provisions of the attached license agreement.

As part of the submission, the journal will peer review your article before deciding whether to publish it. *Engineering Technologies and Systems* journal uses double-blind review, which means that both the reviewer and author identities are concealed from the reviewers, and vice versa. On the basis of the analysis of the article, the reviewer makes a decision whether to recommend the article for publication or reject it. If the author disagrees with the reviewer's comments, their reasoned statement shall be considered by the Editorial Board.

Editorial staff's policy is based on modern legal requirements concerning libel, copyright, legitimacy, plagiarism, ethical principles, kept in community of leading scientific issues publishers. Journal's editorial policy is based upon traditional ethical principles of Russian academic periodicals; it supports Academic Periodicals Ethical Codex, stated by Committee on Publication Ethics (Russia, Moscow) and it is formed in account of standards of ethics of editors' and publishers' work confirmed by Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors and Code of Conduct for Journal Publishers, developed by Committee on Publication Ethics (COPE).

Free reproduction of the journal's materials for personal purposes and free use for information, scientific, educational and cultural purposes is allowed in accordance with articles 1273 and 1274 of Chapter 70, part 4 of the Civil Code of the Russian Federation. Other types of use are possible only after the conclusion of relevant written agreements with the right holder.

The journal is distributed on the basis of a subscription, requests of higher education institutions, educational institutions and individuals. The subscription index is 70539.

Sergey M. Vdovin – Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 244888.

Petr V. Senin – Deputy Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 233260.

Svetlana V. Gordina – Executive Editor. Tel.: +7 (8342) 481424.

Редактор – *А. Д. Карпов*  
Перевод *С. В. Голованова, Н. Н. Плеханковой*  
Компьютерная верстка *Е. П. Гординой*  
Информационная поддержка *Р. В. Карасева*

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Подписано в печать 10.09.2021 г. Дата выхода в свет 30.09.2021 г.

Формат  $70 \times 100^{1/16}$ . Усл. печ. л. 13,33.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 250 экз. Заказ № 1350. Свободная цена.

Адрес типографии: 430005, Российская Федерация, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Советская, д. 24  
(Издательство федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва»)



Editor *A. D. Karpov*  
Translation *S. V. Golovanov, N. N. Plekhankova*  
Desktop publishing *E. P. Gordina*  
Informational support *R. V. Karasev*

Distributed in Russian Federation and foreign countries.

Signed to print 10.09.2021. Date of publishing 30.09.2021.

Sheet size  $70 \times 100 \frac{1}{16}$ . Conventional printed sheets 13,33.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 250 copies. Order no. 1350. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation  
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)

