

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202004 ISSN 2658-4123 (Print), 2658-6525 (Online)

Том 30, № 4. 2020

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
Основан в январе 1990 г.  
Выходит один раз в квартал



Vol. 30, no. 4. 2020

SCIENTIFIC JOURNAL  
Founded in January 1990  
Issued quarterly

16+

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

Подписной индекс в каталогах агентств «Роспечать» и «МК-Периодика» – **70539**

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

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

© ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», 2020

## Научный журнал «Инженерные технологии и системы»

публикует оригинальные научные статьи (Full Articles) на русском и английском языках, ранее не публиковавшиеся в других изданиях. Миссия издания 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:

01.04.01 Приборы и методы экспериментальной физики

01.04.05 Оптика

01.04.13 Электрофизика, электрофизические установки

05.20.01 Технологии и средства механизации сельского хозяйства

05.20.02 Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве

05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве

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), Комитета по этике научных публикаций, 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 and Means of Agricultural Mechanization

Electrotechnologies and Electrical Equipment in Agriculture

Technologies and Means of Maintenance in Agriculture

The journal is indexed and archived by databases:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Index of Scientific Citations

EBSCO

The journal is a member of Open Access Scholarly Publishers Association (OASPA),  
Directory of Open Access Journals (DOAJ), Committee on Publication Ethics,  
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@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 лесной индустрии Бартынского государственного университета, профессор кафедры экологии и природопользования ФГБОУ ВО «Московский педагогический государственный университет», доктор биологических наук, профессор (Бартын, Турция)

**Булгаков Алексей Григорьевич** – профессор Института строительного дела Дрезденского технического университета, доктор технических наук, профессор (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 (Саранск, Российская Федерация)

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

**Игунов Леонид Александрович** – директор Научно-исследовательского института механики, заведующий кафедрой теоретической, компьютерной и экспериментальной механики ФГАОУ ВО «Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского», доктор физико-математических наук, профессор (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 (Москва, Российская Федерация).

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

**Котин Александр Владимирович** – заведующий кафедрой механизации переработки сельскохозяйственной продукции ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-0078-1866 (Саранск, Российская Федерация)

**Кусмарцев Федор Васильевич** – декан физического факультета Университета Лафборо, кандидат физико-математических наук (Лафборо, Великобритания)

**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** – профессор кафедры ПР-4 «Электротехника и электроника» ФГБОУ ВО «Московский технологический университет», доктор технических наук, профессор (Москва, Российская Федерация)

**Нищев 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** – главный научный сотрудник лаборатории оптической спектроскопии лазерных материалов ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор физико-математических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-8503-8486 (Саранск, Российская Федерация)

**Салем Абдель-Бахед 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 (Каир, Египет)

**Скрябин Владимир Александрович** – профессор кафедры технологии машиностроения 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, профессор, Scopus ID: 6507978465 (Иркутск, Российская Федерация)

**Ямашкин Анатолий Александрович** – заведующий кафедрой землеустройства и ландшафтного планирования 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. (Economics), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-7363-1389, rector@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. (Engineering), 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. (Pedagogy), ORCID: 0000-0003-2265-418X, vestnik\_mrsu@mail.ru (Saransk, Russian Federation)
- Surhay Allahverdi** – Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Head of Forest Industry Chair, Bartin University, Professor of Ecology and Nature Management Chair, Moscow Pedagogical State University, D.Sc. (Biology), Professor (Bartın, Turkey)
- Aleksey G. Bulgakov** – Professor of Faculty of Architecture, Dresden University of Technology, D.Sc. (Engineering), Professor (Dresden, Germany)
- Ivan I. Chuchayev** – Dean of 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. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-1439-1674 (Rostov-on-Don, Russian Federation)
- Leonid A. Igumnov** – Director of Research Institute of Mechanics, Head of Numerical Simulation of Theoretical, Computer and Experimental Mechanics Chair, Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor (Nizhny 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 Innovation Management Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), Editor-in-Chief, Photonics Russia, D.Sc. (Phys.-Math.) (Moscow, Russian Federation)
- Vladimir N. Kechemaykin** – Director of Ruzaevka Institute of Mechanical Engineering, National Research Mordovia State University, Cand.Sc. (Economics) (Saransk, Russian Federation)
- Aleksandr V. Kotin** – Head of Chair of Mechanization of Agricultural Production Processing, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-0078-1866 (Saransk, Russian Federation)
- Fedor V. Kusmartsev** – Dean of Institute of Physics, Loughborough University, Ph.D. (Phys.-Math.) (Loughborough, Great Britain)
- Oleg N. Kukharev** – Rector of Penza State Agrarian University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0002-3519-4066 (Penza, Russian Federation)
- Svetlana A. Mikayeva** – Professor of Electrotechnics and Electronics Chair, Moscow Engineering University, D.Sc. (Engineering), Professor (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. (Agriculture), Professor (Saransk, Russian Federation)
- Polina A. Ryabochkina** – Principal Researcher of Laboratory of Optical Spectroscopy of Laser Materials, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Phys.-Math.), Associate 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 Computer and Information Sciences, Ain Shams University, D.Sc. (Computer Science), Emeritus Professor (Cairo, Egypt)
- Tamara I. Shishelova** – Professor of Physics Chair, Irkutsk National Research Technical University, D.Sc. (Engineering), Scopus ID: 6507978465 (Irkutsk, Russian Federation)
- Vladimir A. Skryabin** – Professor of Machine Engineering Technology Chair, Penza State University, D.Sc. (Engineering), ORCID: 0000-0001-7156-9198 (Penza, Russian Federation)
- Anatoliy A. Yamashkin** – Head of Land Utilization and Landscape Design Chair, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Geography), 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. (Engineering), Professor (Saransk, Russian Federation)
- Olga Ye. Zheleznikova** – Director of Institute of Electronics and Light Engineering, National Research Mordovia State University, Cand.Sc. (Engineering), Associate Professor (Saransk, Russian Federation)



## **СОДЕРЖАНИЕ**

### **ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА**

<b>Попов А. Ю.</b> Моделирование квадратно-гнездового посева.....	524
<b>Барышева Н. Н., Пронин С. П., Барышев Д. Д., Беляев В. И.</b> Сравнение мембранного потенциала зерен пшеницы, разделенных на фракции по аэродинамическим свойствам, разных сортов с разной урожайностью.....	550

### **ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ**

<b>Водяков В. Н., Куликовская К. А.</b> Оптимизация режимов механоактивации сухосмешанных порошков СВМПЭ и наномодификаторов в планетарно-шаровой мельнице Pulverisette 7 .....	576
<b>Анисимов А. В., Рудик Ф. Я.</b> Результаты теоретического определения конструктивных и кинематических параметров рабочих органов шелушильной машины.....	594
<b>Вахидов У. Ш., Куркин А. А., Левшунов Л. С., Молев Ю. И., Прошин Д. Н., Согин А. В.</b> Обеспечение устойчивости транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения при торможении на шинах сверхнизкого давления.....	609
<b>Скрябин В. А.</b> Изготовление деталей гидросистем сельскохозяйственных машин в условиях ультразвукового резания.....	624

### **МАШИНОСТРОЕНИЕ**

<b>Майстренко Н. А., Уваров В. П., Левшин А. Г., Хорт Д. О., Воротникова О. С.</b> Унификация расчетов производительности транспортных и транспортно-технологических средств.....	637
<b>Тарасов Е. М., Андрончев И. К., Булатов А. А., Тарасова А. Е.</b> Разработка обучаемого классификатора состояний с множеством моделей распознавания образов.....	659
<b>Кравченко И. Н., Мигачев Ю. С., Кузнецов Ю. А., Давыдкин А. М., Ерофеев М. Н.</b> Исследование влияния сложности технического исполнения и номенклатурно-количественного состава сельскохозяйственной техники на показатель ее утилизируемости.....	683

### **ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

<b>Сидоров С. А., Миронов Д. А., Ценч Ю. С., Миронова А. В.</b> Оценка износостойкости и ресурса двухслойных упрочненных почворезущих рабочих органов в различных почвенных условиях.....	699
<b>Хорошко Л. Л., Кузнецов П. М.</b> Цифровизация процессов восстановления сельскохозяйственной техники.....	711
<i>Информация для авторов и читателей (на рус. яз.).....</i>	<i>723</i>
<i>Информация для авторов и читателей (на англ. яз.).....</i>	<i>725</i>

## CONTENTS

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

<b>Popov A. Yu.</b> Simulation of Square Cluster Planting.....	524
<b>Barysheva N. N., Pronin S. P., Baryshev D. D., Belyaev V. I.</b> Comparing the Membrane Potential of Wheat Grains of Different Varieties and Productivity Divided into Fractions According to Their Aerodynamic Properties.....	550

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

<b>Vodyakov V. N., Kulikovskaya K. A.</b> Optimization of Mechanical Activation Modes for UHMWPE Dry Mixed Powders and Nanomodifiers in the Planetary Ball Mill Pulverisette 7.....	576
<b>Anisimov A. V., Rudik F. Ya.</b> Results of Theoretical Definition of Structural and Kinematic Parameters of Peeling Machine Working Elements.....	594
<b>Vakhidov U. Sh., Kurkin A. A., Levshunov L. S., Molev Iu. I., Proshin D. N., Sogin A. V.</b> Ensuring the Stability of Agricultural Transport and Technological Machines Equipped with Ultra-Low Pressure Tires during Braking.....	609
<b>Skryabin V. A.</b> Manufacturing Parts for Hydraulic Systems of Agricultural Machinery under Conditions of Ultrasonic Cutting.....	624

### **MECHANICAL ENGINEERING**

<b>Maistrenko N. A., Uvarov V. P., Levshin A. G., Khort D. O., Vorotnikova O. S.</b> Unification of Calculating the Performance of Vehicles and Transport-Technological Facilities.....	637
<b>Tarasov E. M., Andronchev I. K., Bulatov A. A., Tarasova A. E.</b> Development of a Trainable Classifier of State of Rail Lines with Multiple Patterns of Image Recognition.....	659
<b>Kravchenko I. N., Migachev Y. S., Kuznetsov Yu. A., Davydkin A. M., Erofeev M. N.</b> Studying the Influence of the Technical Performance Complexity and the Nomenclature and Quantitative Composition of Agricultural Machinery on Its Recyclability Rate.....	683

### **TECHNOLOGIES AND MAINTENANCE MEANS IN AGRICULTURE**

<b>Sidorov S. A., Mironov D. A., Tsench Y. S., Mironova A. V.</b> Assessment of Durability and Service Life of Two-Layer Hardened Earth Cutters in Various Soil Conditions.....	699
<b>Khoroshko L. L., Kuznetsov P. M.</b> Digitalization of Agricultural Machinery Rehabilitation....	711
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in Russian)</i> .....	723
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in English)</i> .....	725

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

УДК 631.53.044-047.58

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202004.524-549

Оригинальная статья



## Моделирование квадратно-гнездового посева

**А. Ю. Попов***ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)**popov\_a\_ju@mail.ru*

*Введение.* Для пропашных культур оптимальной формой площади питания является квадратная, которая обеспечивается квадратно-гнездовым способом посева. В настоящее время из-за высокой металлоемкости и низкой производительности этот способ посева заменен на пунктирный. Но это не решает задачу рационального распределения семян на поле, и проблема точного размещения растений с оптимальной квадратной формой площади питания остается актуальной. Целью исследования является разработка и анализ имитационной модели квадратно-гнездового посева на основе алгоритма управления исполнительными механизмами секций сеялки с применением устройств для локального координирования посевного агрегата.

*Материалы и методы.* Рассмотрен программируемый квадратно-гнездовой посев с применением локального координирования посевного агрегата и алгоритм для его осуществления. Описано построение имитационной модели посева в программной среде Simulink Matlab с обоснованием ее элементов. Учтены разброс семян в борозде и переменная величина скорости сеялки. Теоретически обосновано количество импульсов на один оборот вала энкодера.

*Результаты исследования.* Построены графики пройденного пути, координаты позиций открытия заслонок и сигналов управления в зависимости от времени. Проведен анализ настроек энкодера. При изменении шага посева и координат первого открытия заслонок отклонение последнего гнезда семян варьируется в диапазоне от  $-2,6 \cdot 10^{-3}$  до  $2,7 \cdot 10^{-3}$  м. С увеличением скорости сеялки от 1,5 до 3,0 м/с математическое ожидание отклонений гнезд семян увеличивается от 0,054 до 0,218 м, а коэффициент вариации снижается с 61,2 до 15,0 %.

*Обсуждение и заключение.* Анализ имитационной модели квадратно-гнездового посева показал, что алгоритм управления исполнительными механизмами вместе с системой локального координирования работает адекватно и обеспечивает высокую точность размещения гнезд семян на поле. Определены зависимости оптимального количества импульсов на один оборот вала энкодера от заданного шага посева и радиуса путеизмерительного колеса. Выяснено, что величина максимального отклонения последнего гнезда семян не превышает 2,7 мм на 1 000 м

© Попов А. Ю., 2020

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

(при  $x = 0,3$  м и  $t = 0,7$  м). Установлено, что точность распределения гнезд семян на поле определяется в большей степени скоростью сеялки, нежели настройками измерительного устройства.

**Ключевые слова:** программа управления, квадратно-гнездовой способ, сигнал, энкодер, модель посева, разброс семян, неравномерность распределения

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

**Для цитирования:** Попов, А. Ю. Моделирование квадратно-гнездового посева / А. Ю. Попов. – DOI [10.15507/2658-4123.030.202004.524-549](https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.524-549) // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 524–549.

*Original article*

## Simulation of Square Cluster Planting

**A. Yu. Popov**

*Don State Technical University*

*(Rostov-on-Don, Russian Federation)*

*popov\_a\_ju@mail.ru*

**Introduction.** For cultivated crops, the optimal form of spacing is square form, which is provided by the square cluster method of planting. Currently, due to the high metal consumption and low productivity, this method of planting has been replaced with a single-seed planting one. But this does not solve the problem of rational distribution of seeds in the field, so the problem of plant spacing with the use of the optimal square form of spacing is relevant. The aim of the study is to develop and analyze a simulation model of square cluster planting based on an algorithm for controlling the executive mechanisms of the seeder sections using devices for local coordination of the seeding apparatus.

**Materials and Methods.** A programmable square cluster planting using local coordination of the seeding apparatus and an algorithm for its realization are considered. The article describes the construction of a simulation model of sowing planting in Simulink Matlab with justification of its elements. The seed spreading in furrows and the seeder variable speed are taken into account. The number of pulses per revolution of the encoder shaft is theoretically justified.

**Results.** The graphs of the distance traveled, positions coordinates of the flap opening and control signals depending on the time are constructed. The analysis of the encoder settings is carried out. When varied the plant spacing and the coordinates of the first flap opening, the dimension of the last seed cluster changes in the range from  $-2.6 \cdot 10^{-3}$  to  $2.7 \cdot 10^{-3}$  m. With the increase in the seeder speed from 1.5 to 3.0 m/s, the mathematical expectation of the seed cluster dimensions increase from 0.054 to 0.218 m, and the coefficient of variation decreases from 61.2 to 15.0%.

**Discussion and Conclusion.** The analysis of the simulation model of the square cluster planting showed that the algorithm for controlling executive mechanisms together with the local coordination system works adequately and provides high precision of placing seed clusters in the field. The dependences of the optimal number of pulses per an encoder shaft revolution on the specified seed spacing and radius of the track measuring wheel are determined. It was determined that the maximum dimension of the last seed cluster does not exceed 2.7 mm per 1 000 m (for  $x = 0.3$  m and  $t = 0.7$  m). It was found that the precision of the distribution of seed clusters in the field is determined more by the seeder speed than by the settings of the measuring device.

**Keywords:** control program, square cluster planting method, signal, encoder, seeding model, seed spread, the uneven distribution

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

**For citation:** Popov A.Yu. Simulation of Square Cluster Planting. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(4):524-549. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.524-549>

## Введение

Главной задачей посева как одной из технологических операций возделывания сельскохозяйственных культур является обеспечение благоприятных условий прорастания и дальнейшего вегетативного развития растений, а также размещение растений с оптимальной густотой. Выполнение этих задач возможно лишь при обеспечении заданной нормы высева, равномерном размещении семян на поле и заделке семян на заданную глубину. При этом норма высева и размещение семян на поле определяются биологической площадью питания растения [1; 2]. В агрономии под площадью питания подразумевают площадь участка поля, приходящуюся на одно растение. По существу, ею являются объем почвы, количество питательных веществ, влага, освещение и тепло. В первом приближении площадь питания одного растения устанавливается произведением ширины междурядья и расстояния между растениями в ряду.

Растения размещаются на поле, а значит, форма и площадь их питания формируются различными способами посева. По нахождению семян в рядке можно выделить посевы с хаотичным и упорядоченным расположением. Схемы и размерные характеристики способов посева, выраженные в сантиметрах, представлены на рисунке 1.

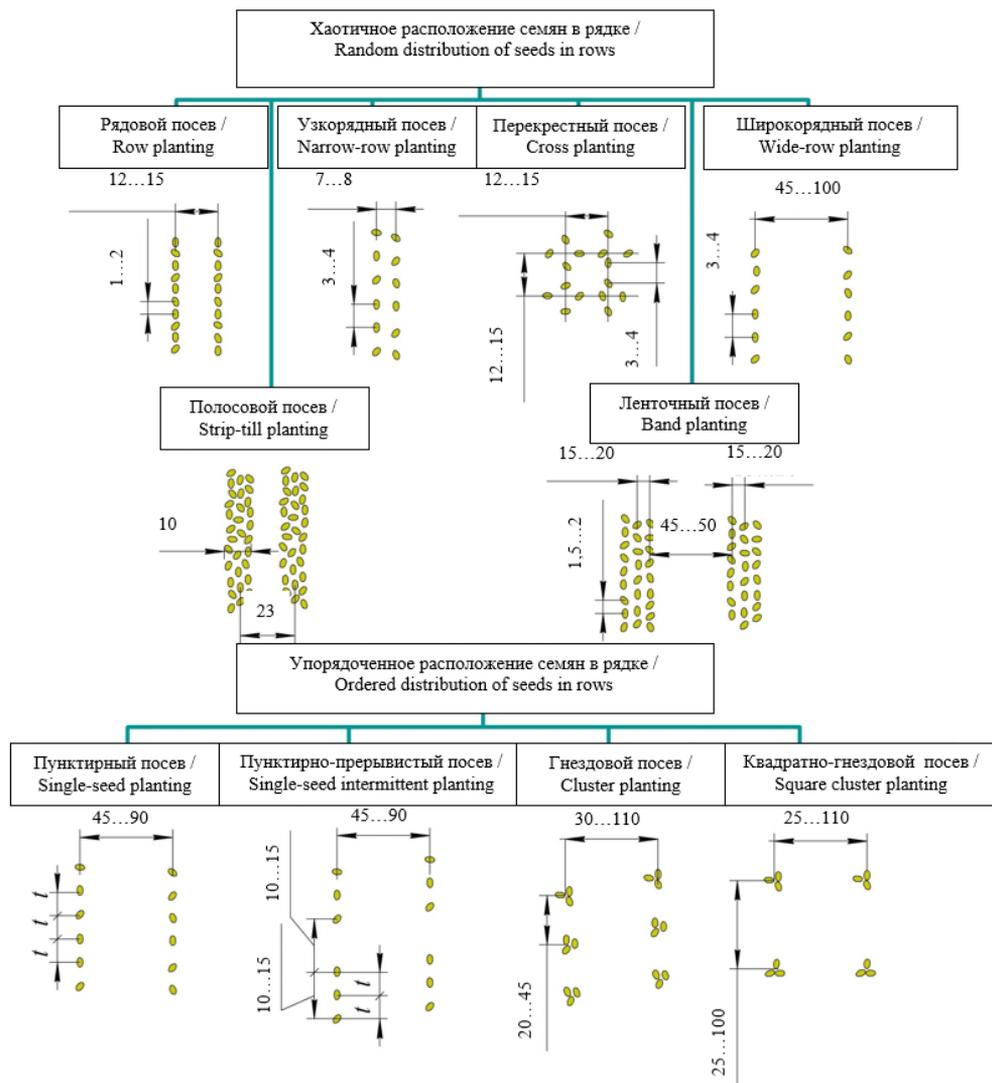
Форма площади питания растений при рядовых способах посева представляет собой прямоугольник с соотношением сторон от 1:6 до 1:10, которые определяются шириной междурядья и расстоянием между растениями в рядке<sup>1</sup>. Для зерновых культур в связи с малыми площадями питания прямоугольная форма питания приемлема и в совокупности с простотой осуществления посевов получила широкое распространение. Но для пропашных

культур с большой площадью питания оптимальной будет являться квадратная форма, при которой возможно наиболее полное использование ресурсов почвы [1]. Поэтому для пропашных культур возникают дополнительные требования к размещению растений в рядке. Они должны располагаться с постоянным шагом посева. Для осуществления такой схемы применяются гнездовые способы посевов и их разновидности, такие как квадратный, прямоугольный и т. д.

При гнездовом посеве семена высеваются по несколько штук в гнезда, которые размещаются в междурядьях с заданным шагом. Этот способ проводится для посева бахчевых и некоторых пропашных культур, которые могут расти вместе в гнезде. Если при этом гнезда будут размещаться в рядах с равным шагом как вдоль, так и поперек поля, что приведет к их размещению в углах квадрата, то будет реализован квадратно-гнездовой способ посева с оптимальной формой площади питания.

Несмотря на достоинства квадратно-гнездового посева, он сложен в осуществлении. Для его проведения необходимы специальные квадратно-гнездовые сеялки с вилками-узловителем и мерной проволокой, которая должна растягиваться по всему полю в направлении движения сеялки. Мерная проволока с закрепленными с постоянным шагом упорами при этом служит инструментом координирования сеялки на поле и триггером для формирования гнезд семян. Но из-за высокой металлоемкости, низкой производительности труда и необходимости задействования большого числа вспомогательного персонала для переноса мерной проволоки квадратно-гнездовой способ посева в последнее время не используется. А гнездовой способ был заменен пунктирным, в том числе с увеличен-

<sup>1</sup> Бузенков Г. М., Ма С. А. Машины для посева сельскохозяйственных культур. М.: Машиностроение, 1976. 272 с.



Р и с. 1. Классификация рядовых способов посева по расположению семян в рядке

F i g. 1. Classification of ordinary methods of sowing by the location of seeds in rows

ным шагом посева и групповым высе-  
вом семян, который менее трудоемок<sup>2</sup>.  
Однако пунктирный посев не решает  
задачу рационального размещения се-  
мян на поле. Так как форма площади  
питания в таком случае представляет

собой прямоугольник, а из-за несовер-  
шенства дозирующих устройств и дей-  
ствия множества случайных факторов  
размещение семян в рядке значительно  
отклоняется от заданного шага посева.  
Это приводит к различным по размеру

<sup>2</sup> Там же.

прямоугольным формам площади питания для каждого растения отдельно.

Таким образом, проблема точного размещения семян на поле остается нерешенной. Однако применение систем геопозиционирования дает надежду на лучшее, например, при дифференцированном внесении удобрений в контексте прецизионного земледелия<sup>3</sup> [3; 4]. Но точности спутниковой связи недостаточно для координирования посевного агрегата и формирования гнезд семян на поле с переменной высотой рельефа и уклонами. Хотя спутниковое геопозиционирование вполне может служить базой отсчета расстояний [5–7]. Поэтому с развитием технологий точного земледелия, доступностью средств автоматизации и цифровизации сельского хозяйства возникает шанс решения проблемы координированного распределения семян на поле без применения мерной проволоки [8–11]. Это возможно благодаря разработке электронных управляющих систем посевных комплексов, использованию элементов спутникового геопозиционирования и алгоритмов управления высевом семян с применением парадигмы локального измерения расстояния [12–15].

Целью исследования являются разработка и анализ имитационной модели квадратно-гнездового посева на основе алгоритма управления исполнительными механизмами секций сеялки с применением устройств для локального координирования посевного агрегата на поле.

### Обзор литературы

Гнездовой способ посева и его варианты известны и применяются достаточно давно. Так, возделывание кукурузы, подсолнечника и других пропашных

культур начиналось именно гнездовым ручным способом. В начале 20 века в США, Германии, Франции и других странах уже производились квадратно-гнездовые сеялки. В США применялись четырехрядные сеялки с шириной междурядья 0,9–1,05 м. Привод высевающих аппаратов осуществлялся от ходовых колес сеялки, а клапанов – от мерной проволоки.

В России также велись поиски технических конструкций сеялок для осуществления квадратно-гнездового и шахматного посева. Так, в 1923 году А. А. Воронковым была предложена конструкция конной гнездовой барабанной сеялки, на которую был выдан патент № 1441. В 30-х годах XX века П. А. Бинковским была разработана первая отечественная кукурузная сеялка квадратно-шахматного посева. Однако в связи с Великой Отечественной войной производство кукурузных сеялок было организовано только в 1947 году. Это была прицепная шестирядная сеялка СШ-6 конструкции Акимовской машиноиспытательной станции. Сеялка была снабжена корректировочным механизмом с ручным управлением, обеспечивающим равные расстояния между гнездами семян в рядке. Ориентиром служили предварительно нарезанные конным маркером поперечные бороздки. Корректировочный механизм, требующий постоянного внимания сеяльщика, вскоре был заменен приспособлением конструкции Всесоюзного института механизации (ВИМ), мерная проволока которого обеспечивала заданное расстояние между гнездами в рядке без корректировочного механизма и маркировки поля<sup>4</sup>.

С середины XX века в СССР активно начал внедряться квадратно-гне-

<sup>3</sup> Копылова Н. О., Яковлева А. И. Дифференциальное внесение веществ как элемент точного земледелия в ресурсосберегающих технологиях // Научное обеспечение инновационного развития агропромышленного комплекса регионов РФ: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (6 февраля 2018 г.). Курган: Изд-во КГСА им. Т. С. Мальцева, 2018. С. 547–550.

<sup>4</sup> Савенко В. А. История автотракторного и сельскохозяйственного машиностроения: учебное пособие. Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2008. 124 с.

здовой посев кукурузы и других пропашных культур с применением специальных сеялок СКНК-6 и ее аналогов (рис. 2). Однорядные секции рабочих органов этих сеялок имели индивидуальный привод высевających аппаратов с регулируемым передаточным отношением. Сеялка оснащалась системой узлоловителей, двумя натяжными станциями и катушкой с мерной проволокой. На мерной проволоке закреплялись упоры, расстояние между которыми определялось шагом посева.

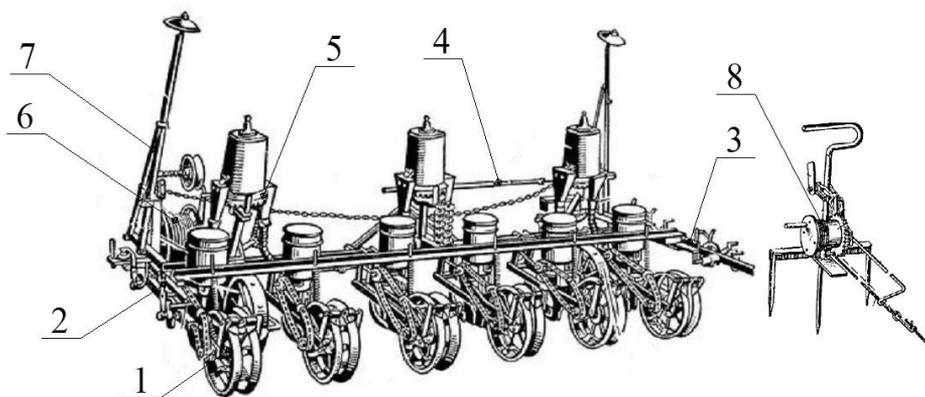
Привод высевających аппаратов осуществлялся от ходовых колес, а клапанов сошников – от мерной проволоки. После прохода сеялки по полю вперед и назад мерную проволоку переносили вручную звеном в 9–11 человек таким образом, чтобы следующие проходы сеялки были строго параллельными. Данная технология и организация посева были сложными. Кроме того, после переноса проволоки рабочее звено оставалось на поле без работы, что было нерационально.

Для снижения трудоемкости посева был разработан и внедрен машинный диагональный перенос мерной

проволоки. Вместо натяжных лебедок использовались отпускные колы, предназначенные для удлинения проволоки при приближении посевного агрегата к концу гона с сохранением постоянного натяжения проволоки.

Внедрялись в производство квадратно-гнездовые сеялки с синхронизированным приводом высевających дисков и клапанов сошников. Сошники выполнялись двухканальными с двумя гнездобразующими клапанами и перекидным клапаном-делителем сверху. Вращение высевających дисков было периодическим. Включение в работу клапанов и высевających дисков осуществлялось от мерной проволоки.

Одновременно с промышленным выпуском квадратно-гнездовых сеялок происходил поиск других путей координирования посева семян. Вместо мерной проволоки предлагалось использовать ультразвуковое управление сеялкой на основе принципа эхолокации, радиодистанционное управление исполнительными механизмами сеялки, управление по сигналам магнитных датчиков, импульсов, применение меток изотопов и другие варианты [16–18].



Р и с. 2. Квадратно-гнездовая сеялка СКНК-6:

1 – высеваящая секция; 2 – левый узлоловитель; 3 – правый узлоловитель; 4 – вал-муфта; 5 – туковывсевающая система; 6 – катушка с мерной проволокой; 7 – маркер; 8 – натяжная станция

F i g. 1. Square cluster seeder SKNK-6:

1 – seeding section; 2 – left slot-out hooks; 3 – right slot-out hooks; 4 – shaft-clutch; 5 – mineral fertilizer distribution system; 6 – reel with a measuring wire; 7 – marker; 8 – tension station

Но эти и аналогичные им способы не получили распространения из-за недостаточной направленности излучения, потерь сигнала, шумов, сложности использования, что приводило к значительным погрешностям при посеве.

Одновременно с конструктивно-техническим совершенствованием гнездовых сеялок проводились и теоретические исследования распределения семян, хотя и менее интенсивно. Так, теоретическим и экспериментальным изучением размещения семян на поле и, в частности, гнездовым посевом занимались З. Азимов, В. А. Белодедов, Г. М. Бузенков, В. В. Василенко, А. Д. Геленов, И. М. Иванов, С. В. Кардашевский, В. Е. Комаристов, П. Я. Лобачевский, С. А. Ма, Т. Д. Мельникова, Л. Л. Расулев, Н. Т. Хайченко, В. М. Холзаков и другие исследователи.

Г. М. Бузенков и С. А. Ма определили оптимальную густоту насаждения ряда пропашных культур, разработали номограммы для расчета гнездового посева и числа растений в гнездах<sup>5</sup>. Также ими были предложены теоретические модели пунктирного и пунктирно-прерывистого посева.

На базе теории вероятностей П. Я. Лобачевский были предложены методы обоснования агротехнических требований к посевным машинам, прогноз распределения семян и растений при различных видах посева [19].

С. В. Кардашевский рассмотрел и построил формализованные модели группового высева семян, провел экспериментальное исследование группового высева<sup>6</sup>. При этом определение причин распределения групп семян выполнялось на основе законов механики и при помощи статистических моделей. Методом цифрового моделирования он установил, что при выносе семян груп-

пами в результате рассеивания их во время падения исходный поток семян преобразуется в простейший.

В. В. Василенко в своих работах подтвердил важность оптимального размещения каждого растения на своей площади питания. На основе закона гамма-распределения им была определена наилучшая по урожайности густота насаждений для ряда пропашных и технических культур. Например, для сахарной свеклы она составляет 4,5–5,0 шт/м, для подсолнечника – 5,0–5,5 шт/м, для клешевины – 4,0 шт/м, для кукурузной силосной массы – 11 шт/м [2]. Кроме того, В. В. Василенко уточнил методику прогнозирования урожайности пропашных культур по параметрам распределения семян и разработал алгоритмы расчета на ЭВМ.

И. М. Иванов провел экспериментальные исследования квадратно-гнездового способа посева на примере высева семян кукурузы сеялкой СКГ-6. Им было изучено влияние поступательной скорости сеялки и заглубления сошников на качество распределения семян. Определено, что с увеличением скорости посева от 1,09 до 1,86 м/с отклонение гнезд от шайб мерной проволоки возрастает от –4,0 до 9,96 см соответственно. При этом отклонение гнезд от осевой линии поперечного рядка, выраженное в процентах гнезд с отклонением не более 5 см в пределах одного захвата сеялки, при возрастании скорости от 1,09 до 1,62 м/с варьируется слабо – от 70,4 до 75,3 %. Но при дальнейшем возрастании скорости сеялки до 1,86 м/с отклонение гнезд увеличивается уже значительно и составляет 62,2 %. В результате исследований им было рекомендовано проводить квадратно-гнездовой посев с мерной про-

<sup>5</sup> Бузенков Г. М., Ма С. А. Машины для посева сельскохозяйственных культур.

<sup>6</sup> Кардашевский С. В. Высевающие устройства посевных машин. М.: Машиностроение, 1973. 176 с.

волокой при скорости сеялки не более 1,86 м/с<sup>7</sup>. Так как при скорости посева выше 1,86 м/с устойчивость рабочего процесса сеялки значительно нарушается. Кроме того, И. М. Ивановым была определена трудоемкость и производительность квадратно-гнездового способа посева при различных вариантах переноса мерной проволоки. Однако наблюдения показали, что увеличение производительности сеялки возрастает в основном за счет увеличения длины гона, которая ограничивается размером мерной проволоки.

Применение химических препаратов для уничтожения сорной растительности, получивших широкое применение в 70-е годы XX века, позволило заменить квадратно-гнездовой способ пунктирным. Промышленность отреагировала на это производством сеялок СКПН-6 и СКПН-8 без сложных механизмов гнездообразования<sup>8</sup>. Но использование мерной проволоки и отпускных колов по-прежнему не позволяло повысить производительность труда, приводило к низкой скорости посева и высоким требованиям, предъявляемым к квалификации тракториста и сеяльщиков. Это в настоящее время привело к окончательному отказу от данного способа посева в современных технологиях возделывания и вместе с этим к прекращению научно-практических и теоретических исследований по оптимизации размещения семян пропашных культур, в том числе организации квадратно-гнездового посева.

В настоящей статье предлагается рассмотреть один из вариантов проведения квадратно-гнездового посева пропашных культур с применением программного формирования гнезд семян и локального координирования сеялки с элементами точного земледелия. Это позволит разместить семена на

поле с оптимальной квадратной формой площади питания и обеспечит повышение урожайности возделываемой культуры при одновременном уменьшении металлоемкости и увеличении производительности посева.

### Материалы и методы

Для размещения семян в гнездах по углам квадратов каждая посевная секция сеялки оснащается исполнительным механизмом в виде шарнирной заслонки, установленной под высевальным аппаратом. Заслонки оснащаются электромагнитным приводом, управляемым микроконтроллером.

Аналогом мерной проволоки с упорами и отпускных колов, которые стали причиной отказа от квадратно-гнездового способа посева, служат глобальные спутниковые системы GPS, ГЛОНАСС. Однако предлагается использовать сигналы со спутника только как базу отсчета расстояний. Для этого предварительно формируется электронная карта засеваемого поля, которая может быть получена в результате предшествующего спутникового мониторинга полей хозяйства или в результате аэросъемки беспилотными летающими аппаратами (БПЛА). При подготовке электронной карты поля определяются прямые границы засеваемого поля и их координаты, которые загружаются в память микроконтроллера и будут служить линиями отсчета для посевного агрегата, то есть выполнять функцию отпускных колов. Для локального координирования сеялки на поле в пределах линий отсчета на нее устанавливается измерительное устройство, которое включает путеизмерительное колесо диаметром 0,42 м и инкрементальный энкодер, жестко соединенный с осью колеса [20]. Инкрементальный энкодер представляет собой датчик угла поворота вала. На каждый оборот вала путе-

<sup>7</sup> Иванов И. М. Пути повышения качества квадратно-гнездового посева и экономической эффективности сеялки СКГ-6: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1956. 19 с.

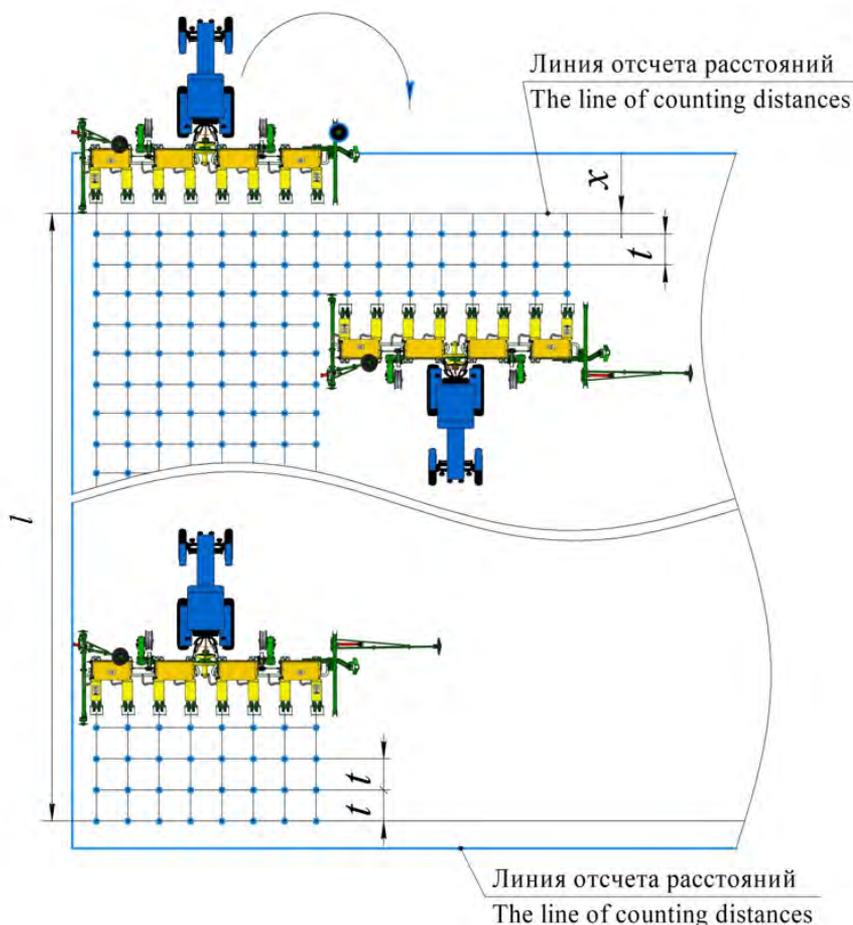
<sup>8</sup> Савенко В. А. История автотракторного и сельскохозяйственного...

измерительного колеса энкодер генерирует определенное количество импульсов, которое задается заранее. Таким образом, каждому сигналу энкодера будет соответствовать определенный пройденный путь сеялки. Сигналы энкодера поступают на микроконтроллер, где производится их постоянное суммирование и определяется пройденное расстояние сеялки в реальном режиме времени.

Во время холостого хода и разворотов при совпадении координат текущего положения сеялки с предварительно загруженными координатами линий отсчета электронной карты поля ми-

кроконтроллер включает или отключает энкодер измерительного устройства. Координаты сеялки определяются посредством GPS-приемника, установленного на посевном агрегате и связанного с микроконтроллером.

Для управления заслонками посевных секций сеялки на микроконтроллер загружается специальная программа управления и задается произвольный шаг посева  $t$ , который определяется нормой высева, шириной междурядья и агротехническими требованиями, предъявляемыми к высеваемой культуре. Схема квадратно-гнездового посева представлена рисунке 3.



Р и с. 3. Схема квадратно-гнездового посева

F i g. 3. Scheme of square cluster planting

Алгоритм программы управления исполнительными механизмами в виде блок-схемы представлен на рисунке 4. Квадратно-гнездовой посев осуществляется следующими образом.

В начале первого прохода сеялка пересекает координаты линии отсчета расстояний. При этом включается энкодер измерительного устройства и запускается программа управления исполнительными механизмами посевных секций. В программе предварительно заданы переменные: шаг посева  $t$ , текущее перемещение сеялки  $l$ , координаты открытия заслонок посевных секций  $l_k$ , координаты первого открытия заслонок  $x$ . По умолчанию в начале первого прохода переменные  $l_k$ ,  $l$  и  $x$  равны нулю.

Когда сеялка проходит расстояние, соответствующее заданному шагу посева  $t$ , микроконтроллер активирует исполнительные механизмы посевных секций, которые сбрасывают порции семян в борозды. В процессе движения сеялки в цикле программы управления осуществляется непрерывное вычисление разности расстояний между текущей позицией сеялки и ее предшествующей позицией, занимаемой на момент последнего открытия заслонки  $l_k$  секции. Открытие заслонок посевных секций происходит при равенстве разности  $l_k - l$  заданному шагу посева  $t$  [21].

При достижении координат противоположной линии отсчета расстояний микроконтроллер отключает энкодер измерительного устройства. При этом происходит выход из цикла программы с последующим сохранением в постоянное запоминающее устройство микроконтроллера расстояния  $x$  от последнего места открытия заслонок до отключения энкодера.

Далее сеялка совершает разворот и начинает второй проход. При этом производится активация энкодера измерительного устройства и обнуление переменных  $l$  и  $l_k$ . При перемещении сеялки на расстояние  $x$  программа управления подает сигнал на открытие

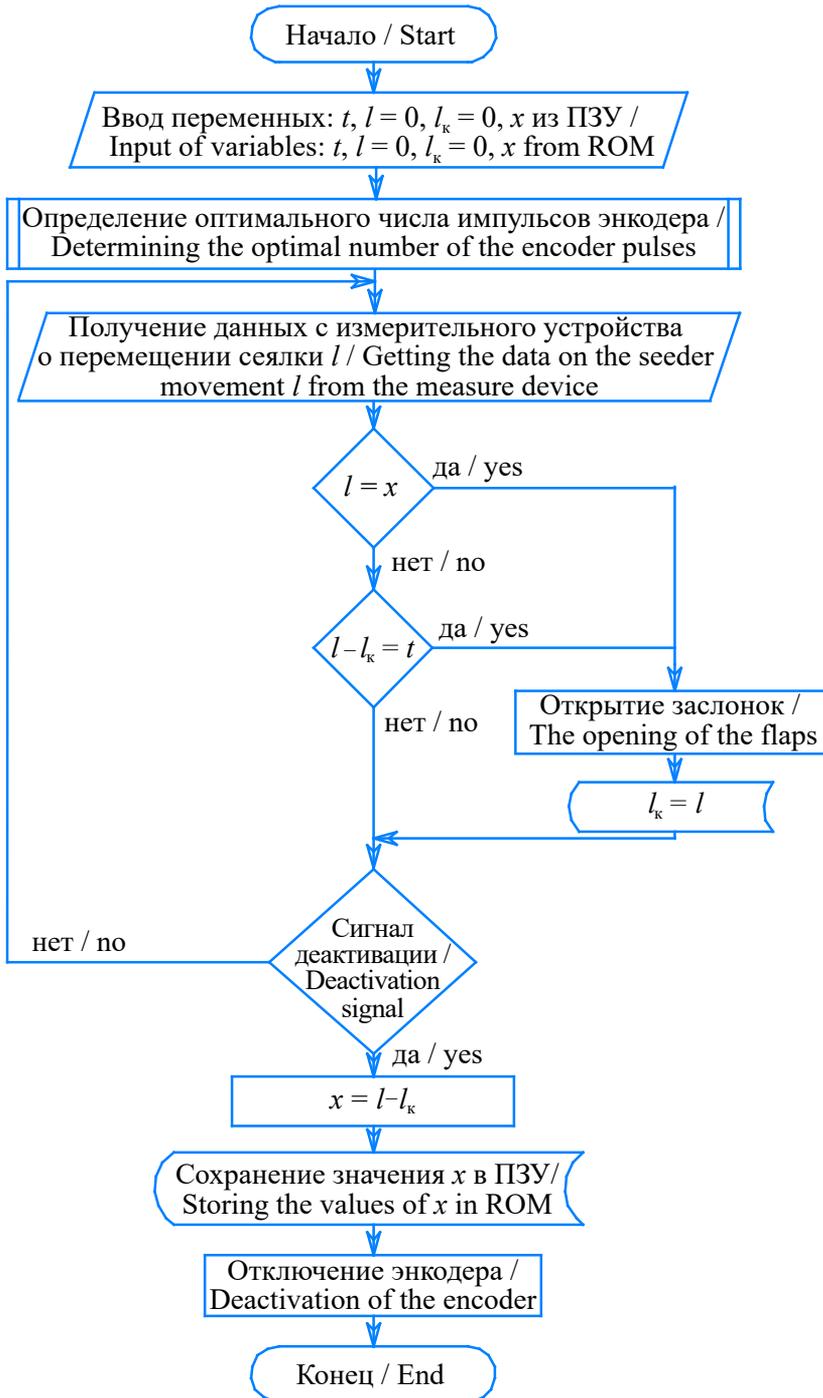
заслонок и высев семян в борозду [21]. Последующие открытия заслонок осуществляются через расстояние шага  $t$  в соответствии с алгоритмом программы управления (рис. 4).

При достижении координат линии отсчета расстояний в конце второго прохода производится отключение измерительного устройства с сохранением нового значения переменной  $x$ , которое будет использоваться в начале следующего прохода. Далее цикл повторяется.

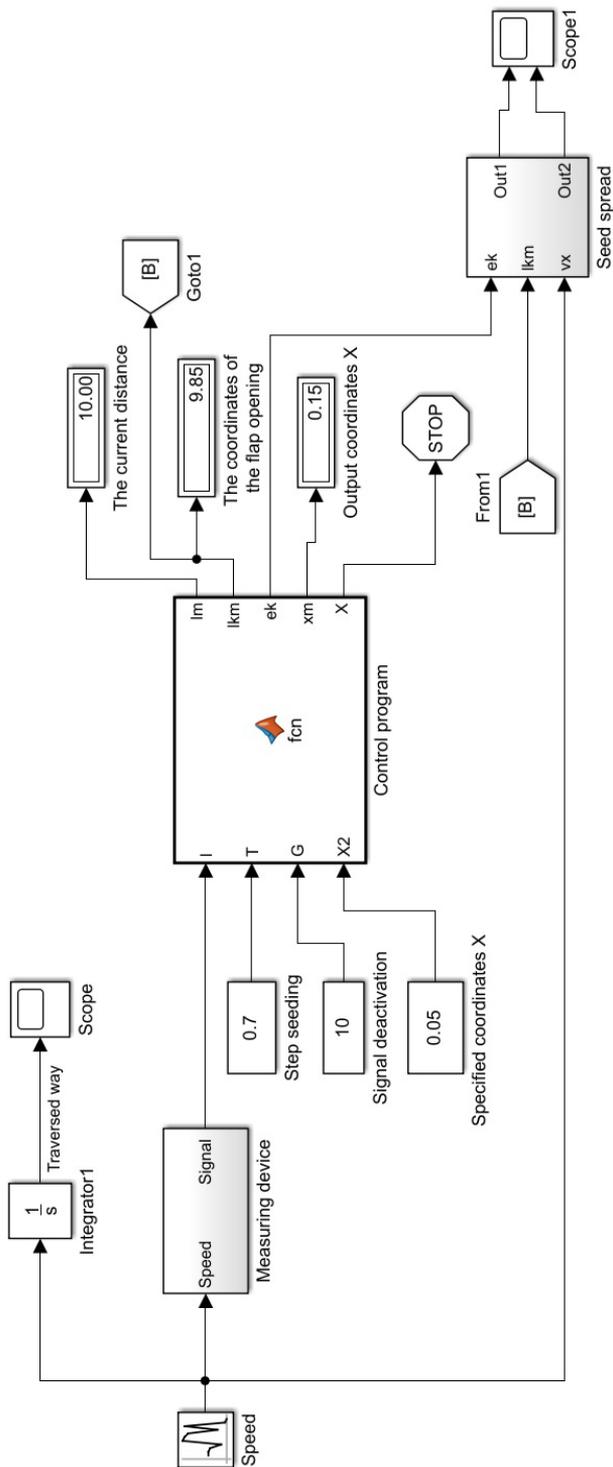
Таким образом гнезда семян размещаются на поле по углам квадрата. При таком способе реализации квадратно-гнездового посева появляется возможность снижения металлоемкости и трудоемкости посева, улучшение точности размещения гнезд семян на поле с переменным рельефом и уклоном поля.

Для анализа представленного алгоритма управления и взаимодействия элементов сеялки разработана имитационная модель квадратно-гнездового посева в программной среде Simulink Matlab, представленная на рисунке 5. Программный пакет Simulink Matlab был выбран как среда разработки исходя из возможности проведения модельно-ориентированного программирования с хорошей и гибкой визуализацией результатов численного эксперимента и удобной обработкой полученных данных инструментами Matlab.

При построении модели были приняты следующие допущения: границы поля приняты прямолинейными, движение сеялки по полю осуществляется перпендикулярно линиям отсчета координат, высевающий аппарат обеспечивает одноштучное дозирование семян без пропусков, масса семян одинаковая, скорость сеялки изменяется по закону нормального распределения, в процессе сброса семян исполнительными механизмами посевных секций сопротивление воздуха не учитывается, сброшенные семена не отскакивают после удара о дно борозды, семена по-



Р и с. 4. Блок-схема алгоритма управления  
F i g. 4. Block diagram of the control algorithm



Р и с. 5. Имитационная модель квадратно-гнездового посева в Simulink Matlab с датчиками  
 Fig. 5. Simulation model of square cluster polyaning in Simulink Matlab with sensors

сле сброса исполнительным механизмом падают с ускорением свободного падения.

Рассмотрим структурную схему имитационной модели квадратно-гнездового посева (рис. 5). При проведении реального посева скорость посевного агрегата непостоянна и зависит от множества неуправляемых факторов, таких как микрорельеф поверхности поля, сопротивление почвы и др. Для учета изменения скорости в модель вводится блок Random Number, с помощью которого задается среднеарифметическая величина скорости и дисперсия, определяющая ее колебания. Так как скорость является первой производной перемещения, то пройденное расстояние сеялкой в модели определяется с помощью блока Integrator, который интегрирует выходной сигнал скорости по времени.

Алгоритм программы управления заслонками каждой посевной секции (рис. 4) реализован с помощью блока Control Program в виде функции, записанной в блоке вида Matlab Function.

На вход блока Control Program при помощи блоков, моделирующих постоянный сигнал, задаются следующие параметры: шаг посева  $t$ , расстояние  $x$  первого открытия заслонок для высева семян и значение расстояния отключения энкодера. Расстояние  $x$  в начале первого прохода сеялки устанавливается равным 0. Блок Signal Deactivation, определяющий расстояние отключения измерительного устройства, моделирует достижение сеялкой координат линии отсчета расстояний в конце прохода и тем самым определяет длину поля.

Из порта  $ek$  блока Control Program выводится сигнал управления открытием заслонок посевных секций сеялки, который равен 1 в момент достижения расчетом расстояний заданного шага  $t$  посева и равен 0 в остальных случаях. Также регистрируется сигнал  $x$ , который определяется как расстояние от последнего открытия заслонок до линии

отсчета расстояний поля. Значение  $x$  выводится по окончании расчета рассматриваемой модели в момент генерации сигнала ненулевого значения на блок Stop. Данный блок останавливает расчет модели, когда входные данные, подаваемые на него, не равны 0. Таким образом, с помощью блоков Signal Deactivation и Stop происходит управление завершением расчета модели и симуляция деактивации измерительного устройства.

Для последующей обработки и визуализации результатов расчета из блока Control Program дополнительно выводятся сигналы  $l_{km}$  – расчетное расстояние открытия заслонок и  $l_m$  – текущее дискретное расстояние, которое определяется из выражения:

$$l_m = k_l \cdot l, \quad (1)$$

где  $k_l$  – расстояние, пройденное сеялкой за один сигнал энкодера, м;  $l$  – сигналы, поступающие с энкодера в форме последовательного ряда целых натуральных чисел,  $l = 0, 1, 2, 3 \dots n$ .

Расстояние  $k_l$  определяется по формуле:

$$k_l = \frac{2\pi R}{n}, \quad (2)$$

где  $R$  – радиус путеизмерительного колеса, м;  $n$  – число импульсов энкодера за один оборот вала путеизмерительного колеса, шт.

Все выходные параметры блока Control Program, кроме блока Stop, визуализируются с помощью блоков числового отображения входных значений Display и в виде временных графиков Scope, как это показано на рисунке 5.

Для моделирования измерительного устройства в модели применена субмодель Measuring Device, схема которой представлена на рисунке 6. Здесь с помощью блоков Gain и Ideal Angular Velocity Source происходит преобразование скорости посевного агрегата

в частоту вращения путеизмерительного колеса, которая служит входным параметром для блока Incremental Shaft Encoder, моделирующим работу инкрементального энкодера, установленного на ось колеса. Блок Incremental Shaft Encoder генерирует на портах *A* и *B* за один оборот вала *n* импульсов, которые задаются в параметрах данного блока перед запуском расчета модели. Сигналы на портах *A* и *B* смещены друг относительно друга на  $90^\circ$ , что позволяет определять направление вращения. На выходе *Z* производится один импульс за один оборот вала, который служит для контроля и корректировки работы энкодера. Для измерения пройденного пути, а значит подсчета количества сигналов энкодера, достаточно использовать один порт *B*. Выходные порты *A*, *B* и *Z* определяются относительно опорного порта *REF*, который заземляется. Для регистрации сигналов в субмодели Measuring Device введены блоки Voltage Sensor, которые симулируют работу вольтметров.

Для подсчета числа импульсов энкодера в субмодели используется блок Pulse Counter в форме блока Matlab Function. В этом блоке реализован простой счетчик, который суммирует каждый сигнал, проходящий с порта *B* энкодера Incremental Shaft Encoder, и передает эту сумму на каждом такте расчета модели на входной порт блока Microcontroller.

Так как длительность импульсов энкодера непостоянна и зависит от заданного количества импульсов *n*, это приводит к тому, что в течение нескольких тактов счета модели на блоке Pulse Counter будет удерживаться ненулевой сигнал энкодера, что приведет к погрешностям в подсчете импульсов. Поэтому возникает необходимость в преобразовании импульсов энкодера в единичные сигналы, которые не будут зависеть от количества импульсов *n*. Для этого используется блок Hit Crossing, который выдает единичный

импульс, когда входной сигнал превысит задаваемое значение в направлении увеличения сигнала.

Одним из важных параметров инкрементальных энкодеров является разрешающая способность, которая характеризует количество сигналов за один оборот вала. Несмотря на то, что этот параметр у современных устройств находится в пределах 5 000–10 000 имп/об, настройка энкодера в сторону высоких значений разрешающей способности еще не означает, что это даст высокую точность измерений при формировании гнезд семян. Связано это с тем, что энкодер генерирует сигналы дискретно, что вносит погрешности при измерении расстояний. Так, учитывая выражение (2), количество импульсов энкодера  $n_i$ , приходящихся на один шаг посева *t*, можно определить по формуле:

$$n_i = \left\lceil \frac{t}{k_i} \right\rceil, \quad (3)$$

где *t* – заданный шаг посева, м.

В выражении (3) квадратные скобки обозначают математическое округление результата вычисления к ближайшему целому числу, так как максимальная абсолютная погрешность такого метода округления, не превысит  $\pm 0,5$  от последнего сохраняемого разряда результата вычисления.

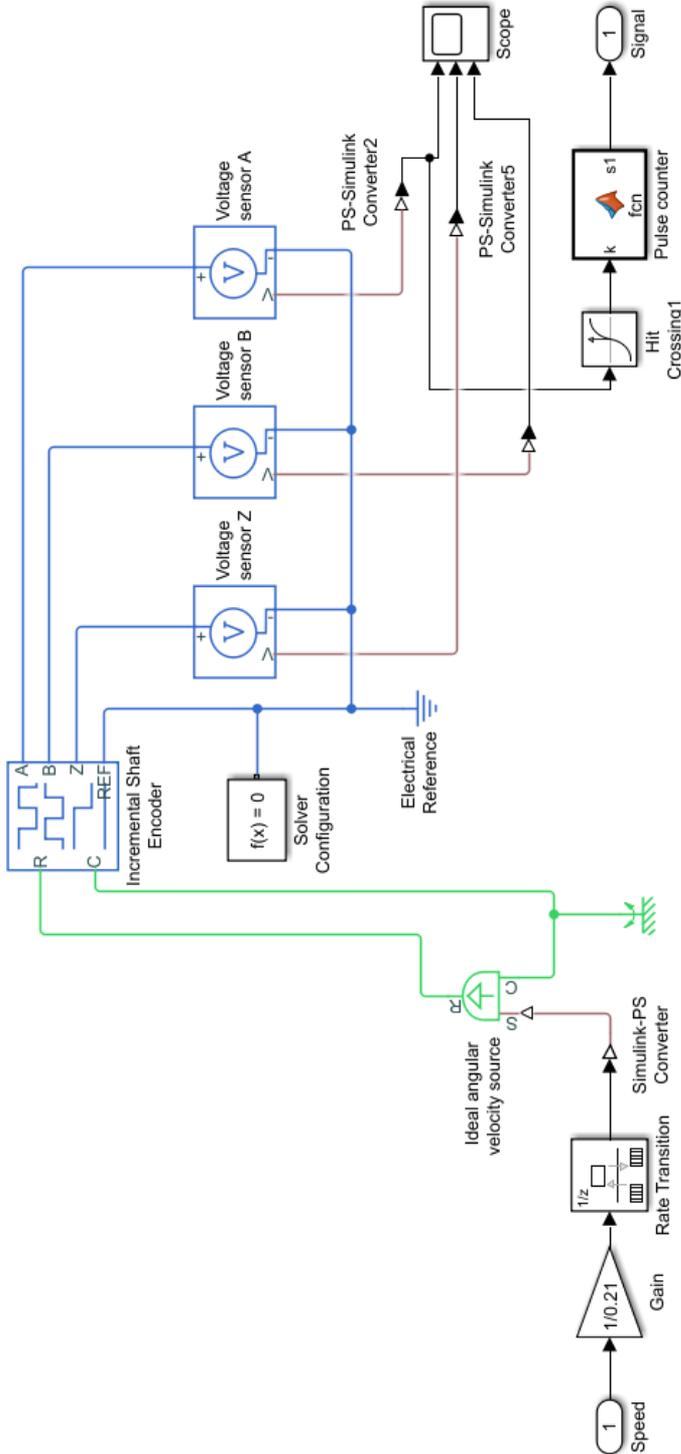
Тогда дискретное расстояние, проходящее сеялкой за  $n_i$  импульсов энкодера, будет определяться по формуле:

$$d = n_i \cdot k_i. \quad (4)$$

При этом отклонение гнезд семян от заданной позиции сброса за один шаг посева *t* составит:

$$\Delta_i = t - n_i \cdot k_i. \quad (5)$$

Отрицательная величина отклонения  $\Delta_i$  означает, что сброс порции семян



Р и с. 6. Субмодель Measuring Device измерительного устройства с датчиками  
 F i g. 6. Measuring Device Submodel with sensors

будет производиться до прохождения сеялкой заданной позиции сброса.

Количество гнезд семян  $n_c$ , сформированных за один проход сеялки, определяется по формуле:

$$n_c = \left[ \frac{L}{t} \right], \quad (6)$$

где  $L$  – длина поля, м. При вычислении дроби в формуле (6) следует производить округление к меньшему числу.

Таким образом, отклонение гнезд семян за один шаг посева  $\Delta_t$  при движении сеялки по полю с каждым шагом посева  $t$  будет накапливаться и приводить к увеличению значений отклонений последующих гнезд семян относительно начала отсчета координат. Поэтому в конце прохода сеялки максимальное отклонение последнего гнезда семян составит:

$$\Delta_L = \Delta_t \cdot n_c. \quad (7)$$

Из формул (2–4) следует, что в результате дискретизации измерения расстояния посредством путеизмерительного колеса отклонения  $\Delta_t$  и  $\Delta_L$  являются неизбежными, но их можно свести к минимуму путем подбора радиуса путеизмерительного колеса  $R$ , заданного шага посева  $t$  и числа импульсов энкодера за один оборот вала  $n$ . Однако для настройки точности размещения гнезд подходит только число импульсов энкодера за один оборот вала  $n$ . При этом смещения гнезд семян  $\Delta_t$  и  $\Delta_L$  не будут однозначно определяться числом импульсов энкодера за один оборот вала  $n$ . То есть выбор заведомо больших значений  $n$  энкодера необязательно будет приводить к уменьшению погрешности за один импульс  $\Delta$ , который представляет собой, как видно из формулы (5), дробную часть результата деления значений параметров, входящих в формулы (3; 4). Кроме того, с изменением заданного шага посева  $t$  будет всегда возникать необходимость нового по-

иска оптимального количества импульсов энкодера  $n$ . Поэтому на этапе ввода параметров посева методом численного перебора по формулам (3–7) определяется оптимальное значение  $n$  энкодера, которое затем передается в программу управления микроконтроллера.

Для автоматического задания параметров решателя модели Simulink в субмодель введен блок Solver Configuration. Для соединения блоков, работающих с физическими размерными сигналами Incremental Shaft Encoder, Ideal Angular Velocity Source и Voltage Sensor с остальными блоками, определяемыми безразмерными характеристиками, в субмодели используются преобразовательные блоки PS-Simulink Converter.

Для обработки связи между блоками, работающими с разной скоростью, применяется блок Rate Transition, конфигурация которого по умолчанию обеспечивает безопасную и детерминированную передачу данных. Поведение этого блока зависит от настроек параметров или времени выборки его входных и выходных портов.

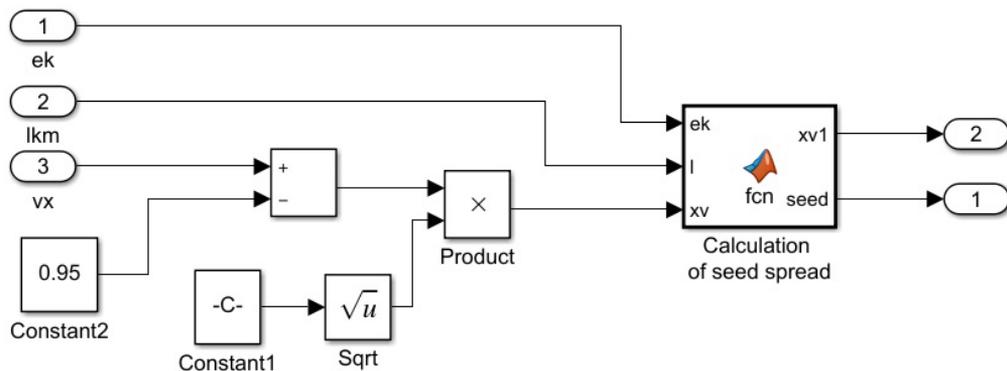
Известно уравнение движения семени, сброшенного в борозду, определяющее его координаты [22]:

$$\begin{cases} X = (v_c - v_{ox}) \cdot t \\ Y = \frac{g \cdot t^2}{2} + v_{oy} \cdot t \end{cases}, \quad (8)$$

где  $v_c$  – скорость сеялки, м/с;  $v_{ox}$ ,  $v_{oy}$  – составляющие начальной скорости семени в момент сброса в борозду, м/с;  $t$  – время, с;  $g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>.

Исходя из принятых допущений, преобразовав уравнение (8), определим разброс семян  $X$  вдоль борозды относительно места сброса заслонкой посевной секции сеялки по формуле:

$$X = (v_c - v_0) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot Y}{g}}. \quad (9)$$



Р и с. 7. Субмодель Seed Spread  
F i g. 7. Seed Spread Submodel

Из выражения (9) видно, что с изменением скорости сеялки будет меняться и разброс семян в борозде. Для моделирования динамики разброса семян в борозде построена субмодель Seed Spread, представленная на рисунке 7.

Блок Calculation of Seed Spread вычисляет абсолютное положение семян в борозде  $l_c$  с учетом выражения (9), местоположения посевных секций и текущего значения скорости. Для этого на вход блока Calculation of Seed Spread подаются с выходных портов ek и lkm блока Microcontroller сигналы управления открытием заслонок и расчетное расстояние открытия заслонок  $l_{km}$  сеялки. При положительном значении сигнала, приходящего с порта ek, фиксируется значение  $l_{km}$ , которое затем используется в вычислении  $l_c$  по формуле:

$$l_c = l_{km} + X. \quad (10)$$

### Результаты исследования

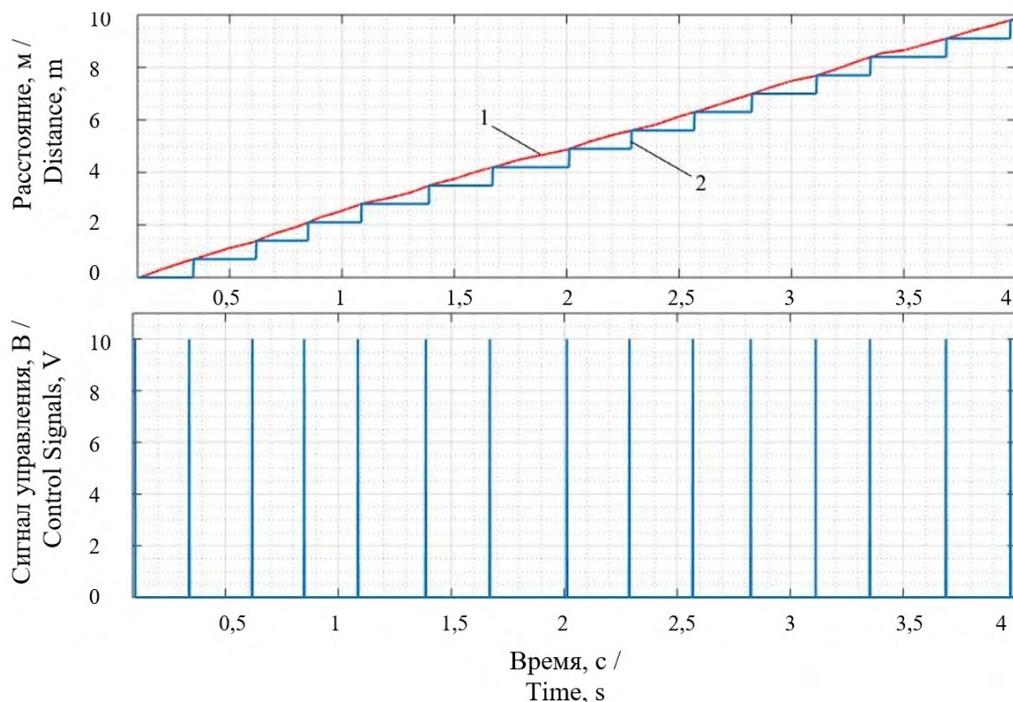
После построения имитационной модели квадратно-гнездового посева (рис. 3) для анализа алгоритма управления проведен ряд расчетов при различных параметрах и режимах работы системы управления исполнительными механизмами посевных секций сеялки.

Для регистрации сигналов в графическом или табличном виде в модель по мере необходимости добавляются или удаляются блоки Scope и Display, а полученные данные обрабатываются программными средствами Matlab.

В начале необходимо проанализировать, как ведет себя алгоритм управления, в частности при шаге посева  $t = 0,7$  м, средней скорости сеялки  $v_{cp} = 2,5$  м/с и дисперсии распределения значений скорости  $D = 0,3$  м/с. При данных параметрах построены совмещенные графики пройденного пути, координаты позиций открытия заслонок посевных секций, а также сигналов управления заслонками в зависимости от времени (рис. 8).

Как видно из совмещенных графиков, алгоритм управления исполнительными механизмами работает адекватно. Сигналы управления открытием заслонок генерируются на каждом шаге посева  $t$  без пропусков. Различные интервалы между сигналами управления на графиках (рис. 8) обусловлено регистрацией сигналов по времени. При этом сигнал управления подается в зависимости от пройденного пути, который переменен во времени.

Как было сказано выше, в связи с дискретностью измерения пройденного



Р и с. 8. График сигналов управления открытием заслонок на посевных секциях: 1 – пройденный путь; 2 – координаты открытия заслонок посевных секций

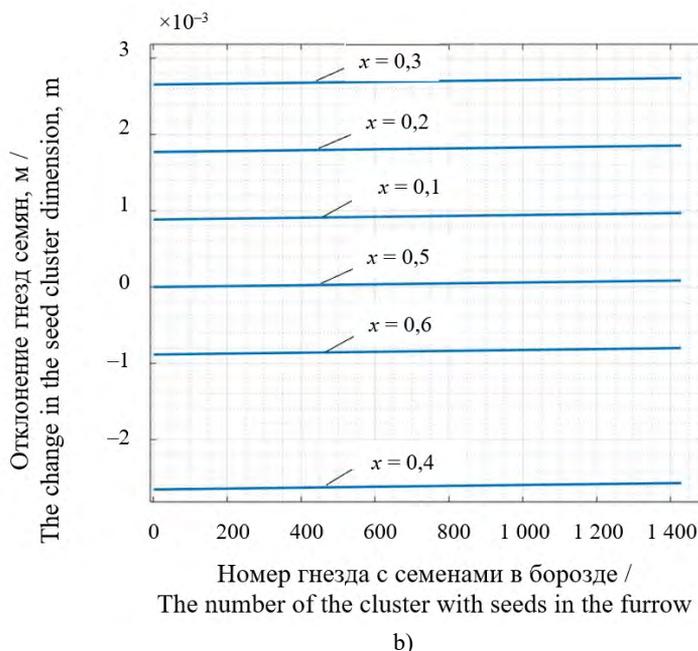
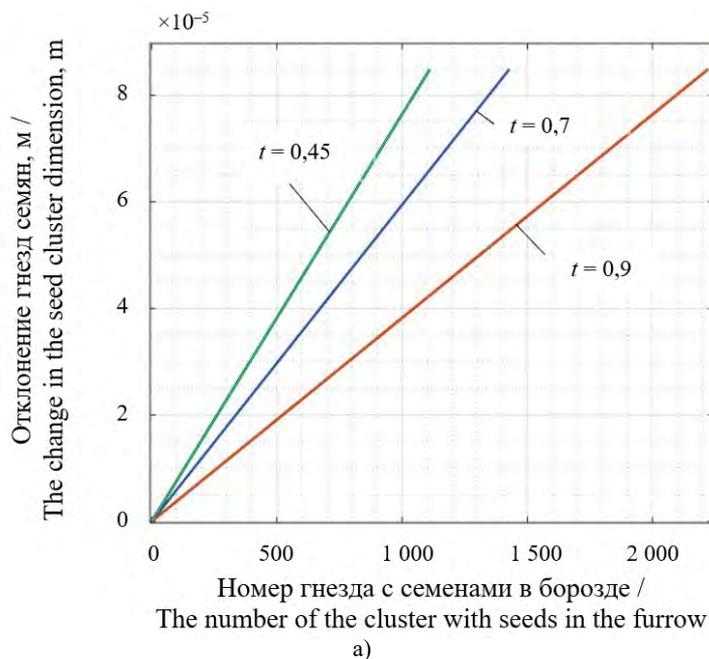
Fig. 8. The graph of signals to control opening flaps on seed sections: 1 – traversed way; 2 – coordinates of the opening of the seed section flaps

сеялкой расстояния возникает отклонение гнезд семян относительно заданных шагом посева  $t$  позиций сброса семян, которые зависят от количества импульсов энкодера  $n$ . Определим отклонения гнезд семян при различных значениях шага посева  $t$  и расстояниях при первом открытии заслонок  $x$ . При этом число импульсов энкодера  $n$  определяется программой предварительной настройки энкодера под условия посева и составляет 994, 213, 497 имп/с при шаге посева  $t$ , равном 0,45, 0,7, 0,9 м соответственно (рис. 9). Дополнительно при шаге  $t = 0,7$  м ступенчато варьировалось значение позиции первого открытия заслонки  $x$  от 0,1 до 0,6 м.

Из графиков (рис. 9) видно, что абсолютное минимальное значение отклонения последнего гнезда семян

$\Delta_L = 8,5 \cdot 10^{-5}$  м наблюдается на всех  $t$  и  $x = 0$ , а абсолютное максимальное значение составило  $\Delta_L = 2,7 \cdot 10^{-3}$  м при  $x = 0,3$  м. На графике (рис. 9b) значения отклонения гнезд семян  $\Delta_L$ , расположенные в области отрицательных чисел, говорят о том, что открытие заслонок осуществляется раньше заданного шага посева  $t$ .

Можно отметить, что величина отклонений последнего гнезда при  $x > 0$  на несколько порядков выше, чем при  $x = 0$  м, и находится в пределах от  $-2,6 \cdot 10^{-3}$  до  $2,7 \cdot 10^{-3}$  м. Это объясняется работой программы подбора числа импульсов энкодера, которая определяет оптимальное значение  $n$  для заданного шага посева  $t$ , но при этом не учитывает значение расстояния первого открытия заслонок  $x$ , в случае если



Р и с. 9. Отклонение гнезд семян на длине прохода 1 000 м при различных значениях шага посева  $t$  и координатах первого открытия заслонки  $x$ :

a)  $t = 0,45$  м,  $t = 0,7$  м и  $t = 0,9$  м при  $x = 0$ ; б)  $x > 0$  м при  $t = 0,7$  м

Fig. 9. Deviation of seed clusters at the passage length of 1,000 m at different values of the seeding step  $t$  and coordinates of the first opening of the flap  $x$ : a)  $t = 0.45$  m,  $t = 0.7$  m and  $t = 0.9$  m at  $x = 0$ ;

b)  $x > 0$  m at  $t = 0.7$  m

оно отлично от шага  $t$ . Соответственно, при первом открытии заслонок число импульсов энкодера  $n$  неоптимально для текущего значения  $x$ . Это приводит к большому отклонению позиции первого гнезда по ходу движения сеялки, а на графике (рис. 9б) наблюдается начальное значение отклонения  $\Delta_L$ , отличающееся от нуля. Однако формирование следующих гнезд семян по ходу движения сеялки идет с шагом  $t$ , для которого  $n$  оптимизировано, и на графиках (рис. 9б) видно монотонное и на порядок меньшее нарастание отклонения  $\Delta_L$ , которое в конце прохода сеялки при перемещении на 1 000 м находится в пределах 0,8–2,7 мм. Таким образом, представленный алгоритм управления открытием заслонок с локальным измерением пройденного расстояния обеспечивает высокую точность размещения семян на поле по углам квадрата, а отклонения последнего гнезда незначительны по сравнению с агротехническими показателями, предъявляемыми к посеву пропашных культур.

Далее рассмотрим распределение семян в борозде после их сброса. На рисунке 10 представлены графики отклонений гнезд семян в борозде относительно заданной шагматности посева  $t$  позиции сброса при изменении скорости сеялки от 1,5 до 3,0 м/с. Расчет проводился на длине прохода се-

ялки 100 м при шаге посева  $t = 0,7$  м и  $x = 0$  м. На графиках показаны отклонения гнезд на 50 м прохода сеялки. Результаты статистической обработки полученных данных, которая проводилась в рабочей среде Workspace Matlab, сведены в таблицу.

Из таблицы видно, что с увеличением скорости сеялки отклонение семян увеличивается, что видно по изменению математического ожидания. Минимальное математическое ожидание отклонения гнезд  $M = 0,054$  м наблюдается при скорости 1,5 м/с, а максимальное  $M = 0,218$  м – при скорости 3,0 м/с. Среднеквадратическое отклонение на всех ступенях варьирования скорости сеялки одинаково и находится в пределах  $\sigma = 0,030–0,033$  м.

При значении скорости сеялки до 2,0 м/с значения выборок отклонений сильно переменчивы, при скорости выше 2,0 м/с – средневариабельны. Так, наибольшее варьирование отклонений гнезд  $V = 61,2$  % наблюдается при скорости 1,5 м/с, наименьшее  $V = 15,0$  % – при скорости 3,0 м/с. Несмотря на то, что с увеличением скорости коэффициент вариации  $V$  уменьшается, посев рациональнее проводить на меньших скоростях, так как в таком случае наименьшее максимальное значение отклонения гнезд наблюдается при скорости 1,5 м/с.

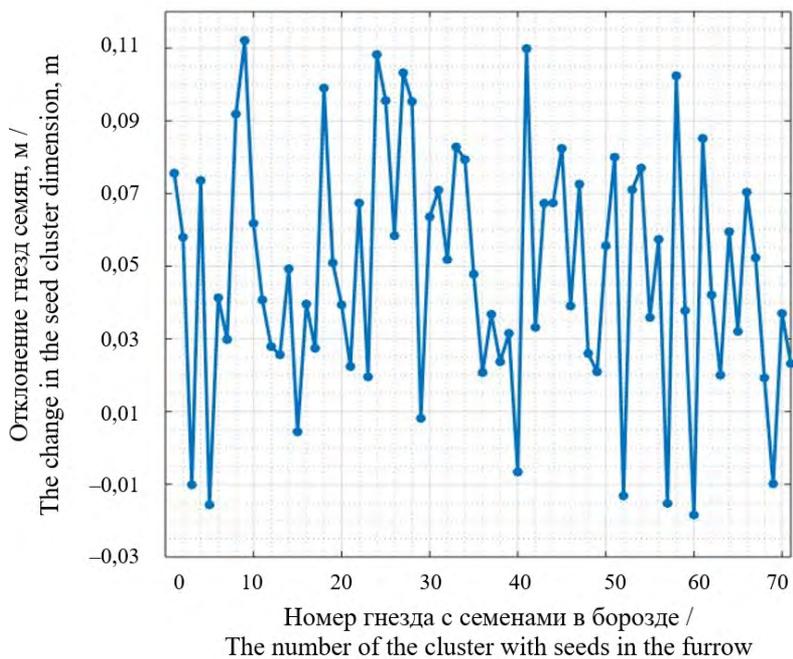
Таблица

Table

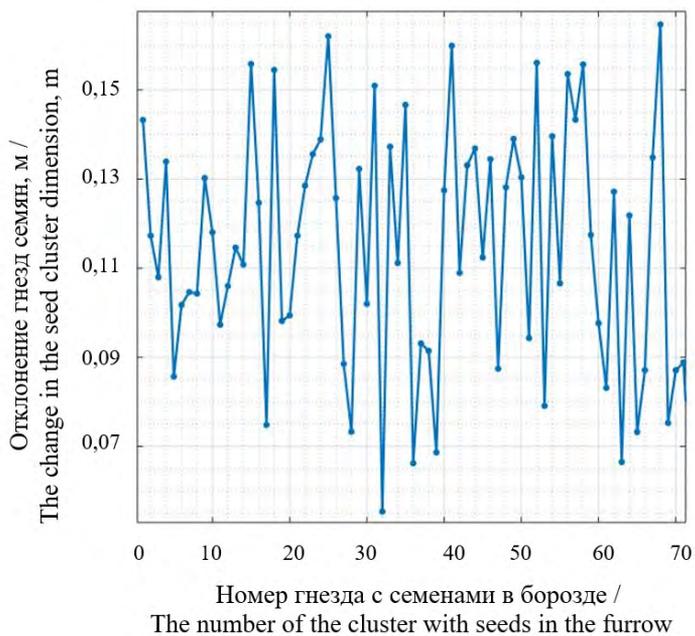
**Статистические показатели неравномерности распределения гнезд семян относительно заданного положения**

**Statistical indicators of the irregularity of distributing seed clusters regarding a given position**

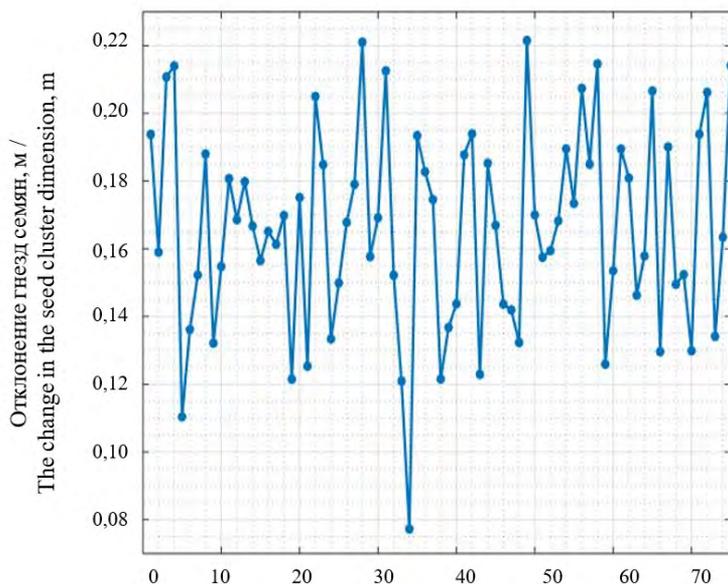
Средняя скорость $v_c$ , м/с / Mean speed $v_c$ , m/s	Минимальное отклонение, м / Minimum deviation, m	Максимальное отклонение, м / Maximum deviation, m	Математическое ожидание $M$ , м / Mathematical expectation $M$ , m	Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ , м / Integrated squared deviation $\sigma$ , m	Коэффициент вариации $V$ , % / Coefficient of variation $V$ , %
1,5	–0,018	0,151	0,054	0,033	61,2
2,0	0,017	0,169	0,114	0,030	26,5
2,5	0,078	0,243	0,166	0,032	19,3
3,0	0,119	0,310	0,218	0,032	15,0



a)

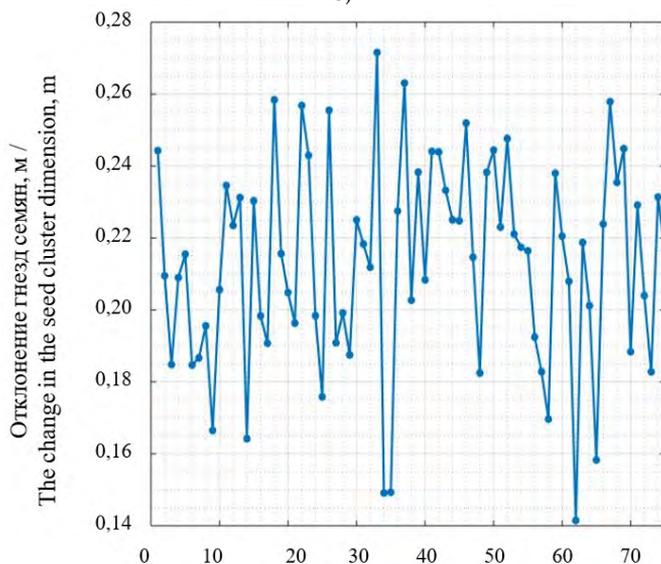


b)



Номер гнезда с семенами в борозде /  
The number of the cluster with seeds in the furrow

c)



Номер гнезда с семенами в борозде /  
The number of the cluster with seeds in the furrow

d)

Р и с. 10. График неравномерности распределения гнезд семян в борозде после сброса при различных скоростях посева: а)  $v = 1,5$  м/с; б)  $v = 2,0$  м/с; в)  $v = 2,5$  м/с; д)  $v = 3,0$  м/с

F i g. 10. The graph of the uneven distribution of seed clusters in the furrow after discharge at variable sowing speeds: а)  $v = 1.5$  m/s; б)  $v = 2.0$  m/s; в)  $v = 2.5$  m/s; д)  $v = 3.0$  m/s

### Обсуждение и заключение

В результате данного исследования в программной среде Simulink Matlab построена имитационная модель квадратно-гнездового посева на базе алгоритма управления исполнительными механизмами посевных секций сеялки с описанием основных этапов ее формирования. Отличительной особенностью рассмотренного способа посева является использование сигналов спутниковых систем геопозиционирования только для определения границ поля как координатных линий отсчета расстояний. Для локального координирования пройденного расстояния предложено измерительное устройство в виде путеизмерительного колеса с инкрементальным энкодером.

Анализ модели проводился при различных значениях переменной скорости сеялки и параметрах посева, в частности варьировались шаг посева и позиция первого открытия заслонок исполнительных механизмов.

Выявлена необходимость в применении предварительной настройки энкодера. В ходе теоретических исследований определены зависимости оптимального числа импульсов на один оборот вала энкодера от заданного шага посева и радиуса колеса. Предложены зависимости для определения отклонений гнезд семян от позиций, заданных шагом посева. На основе полученных выражений разработана программа для подбора оптимальных значений количества импульсов на один оборот вала энкодера перед началом посева.

В результате численных экспериментов определено, что величина мак-

симального отклонения последнего гнезда семян не превышает 2,7 мм на 1 000 м (при  $x = 0,3$  м и  $t = 0,7$  м) при различных вариантах позиции начального открытия заслонок, что незначительно, по сравнению с агротехническими показателями, и достаточно для проведения квадратно-гнездового посева.

Установлено, что точность распределения гнезд семян на поле определяется в большей степени скоростью сеялки, чем настройками измерительного устройства, так как отклонение гнезд семян под влиянием скорости посевного агрегата ( $x = 0,078 - 0,243$  м при  $v = 2,5$  м/с) на порядок превышает отклонения ( $\Delta_L = 2,7 \cdot 10^{-3}$  м при  $x = 0,3$  м,  $v = 2,5$  м/с), определяемые настройками энкодера путеизмерительного колеса и алгоритмом управления. Поэтому возникает необходимость в снижении скорости сеялки для уменьшения разброса семян в борозде. Но это ведет к нивелированию достоинств квадратно-гнездового размещения семян и необходимости поиска способа повышения качества работы заделывающих органов сеялки для снижения разброса и фиксации семян в борозде на высоких скоростях посева.

Таким образом, анализ имитационной модели квадратно-гнездового посева показал, что алгоритм управления исполнительными механизмами вместе с системой локального координирования посевного агрегата и программой предварительной настройки энкодера работает адекватно и обеспечивает высокую точность распределения гнезд семян на поле по углам квадрата.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мухин, В. А. Влияние способов посева зерновых колосовых культур на площадь питания растений / В. А. Мухин, А. А. Кромм, С. Г. Щукин // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2005. – № 6. – С. 71–78. – Рез. англ.
2. Василенко, В. В. Распределение семян и растений сахарной свеклы при пунктирном высеве / В. В. Василенко, С. В. Василенко // Техника в сельском хозяйстве. – 1999. – № 1. – С. 6–9.

3. Технология внесения пестицидов и удобрений беспилотными летательными аппаратами в цифровом сельском хозяйстве / Л. А. Марченко, А. А. Артюшин, И. Г. Смирнов [и др.]. – DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-38-45 // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2019. – Т. 13, № 5. – С. 38–45. – URL: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/355> (дата обращения: 12.10.2020).
4. **Личман, Г. И.** Космический мониторинг в системе точного земледелия / Г. И. Личман, Н. М. Марченко // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2010. – № 1. – С. 27–31.
5. **Патент № 167927 Российская Федерация, МПК А01С 7/08 (2006.01).** Система контроля и управления посевным комплексом : № 2015147700 : заявл. 06.11.2015 : опубл. 12.01.2017 / Скрышник Б. С. ; патентообладатель ООО «Центр точного земледелия Аэросоюз». – URL: [https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPM&DocNumber=167927&TypeFile=html](https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=167927&TypeFile=html) (дата обращения: 12.10.2020).
6. Navigation Algorithm Based on the Boundary Line of Tillage Soil Combined with Guided Filtering and Improved Anti-Noise Morphology / W. Lu, M. Zeng, L. Wang [et al.]. – DOI 10.3390/s19183918 // Sensors. – 2019. – Vol. 19, Issue 18. – Pp. 3918. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/18/3918> (дата обращения: 12.10.2020).
7. **Mitterer, T.** Artificial Landmarks for Trusted Localization of Autonomous Vehicles Based on Magnetic Sensors / T. Mitterer, H. Gietler, L.-M. Faller [et al.]. – DOI 10.3390/s19040813 // Sensors. – 2019. – Vol. 19, Issue 4. – Pp. 813. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/4/813> (дата обращения: 12.10.2020).
8. **Li, Y.** 3D Autonomous Navigation Line Extraction for Field Roads Based on Binocular Vision / Y. Li, X. Wang, D. Liu. – DOI 10.1155/2019/6832109 // Journal of Sensors. – 2019. – Vol. 2019, Article ID 6832109. – 16 p. – URL: <https://www.hindawi.com/journals/js/2019/6832109/> (дата обращения: 12.10.2020).
9. Application of a 3D Tractor-Driving Simulator for Slip Estimation-Based Path-Tracking Control of Auto-Guided Tillage Operation / X. Han, H.-J. Kim, Ch. W. Jeon [et al.]. – DOI 10.1016/j.biosystem-seng.2018.11.003 // Biosystems Engineering. – 2019. – Vol. 178. – Pp. 70–85. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511017309005?via%3Dihub#!> (дата обращения: 12.10.2020).
10. LiDAR-Only Based Navigation Algorithm for an Autonomous Agricultural Robot / F. B. P. Malavazi, R. Guyonneau, J.-B. Fasquel [et al.]. – DOI 10.1016/j.compag.2018.08.034 // Computers and Electronics in Agriculture. – 2018. – Vol. 154. – Pp. 71–79. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169918302679?via%3Dihub> (дата обращения: 12.10.2020).
11. Curved and Straight Crop Row Detection by Accumulation of Green Pixels from Images in Maize Fields / I. Garcia-Santillan, J. M. Guerrero, M. Montalvo, G. Pajares. – DOI 10.1007/s11119-016-9494-1 // Precision Agriculture. – 2018. – Vol. 19. – Pp. 18–41. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11119-016-9494-1> (дата обращения: 12.10.2020).
12. Combining Computer Vision and Deep Learning to Enable Ultra-Scale Aerial Phenotyping and Precision Agriculture: A Case Study of Lettuce Production / A. Bauer, A. G. Bostrom, J. Ball [et al.]. – DOI 10.1038/s41438-019-0151-5 // Horticulture Research. – 2019. – Vol. 6, Article ID 70. – URL: <https://www.nature.com/articles/s41438-019-0151-5> (дата обращения: 12.10.2020).
13. Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing for Field-Based Crop Phenotyping: Current Status and Perspectives / G. Yang, J. Liu, C. Zhao [et al.]. – DOI 10.3389/fpls.2017.01111 // Frontiers in Plant Science. – 2017. – Vol. 8. – URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2017.01111/full> (дата обращения: 12.10.2020).
14. Robot Navigation in Orchards with Localization Based on Particle Filter and Kalman Filter / P. M. Blok, K. Boheemen, F. K. Evert [et al.]. – DOI 10.1016/j.compag.2018.12.046 // Computers and Electronics in Agriculture. – 2019. – Vol. 157. – Pp. 261–269. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169918315230?via%3Dihub> (дата обращения: 12.10.2020).
15. **Fernandez, B.** A Simplified Optimal Path Following Controller for an Agricultural Skid-Steering Robot / B. Fernandez, P. J. Herrera, J. A. Cerrada. – DOI 10.1109/ACCESS.2019.2929022 // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8763950> (дата обращения: 12.10.2020).
16. **Патент № 127497 СССР, МПК А01С 7/18 (2000.01), А01В 69/00 (2000.01).** Способ ультразвукового управления сеялками при квадратно-гнездовом посеве : № 625573 : заявл. 16.04.1959 : опубл. 01.01.1960 / Кобаков О. С., Костин Ю. П., Шварцман Л. М. ; патентообладатель Суханова М. В. – 2 с. – URL: [https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=127497&TypeFile=html](https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=127497&TypeFile=html) (дата обращения: 12.10.2020).

17. Патент № 843811 СССР, МПК А01 С7/04. Способ посева семян кукурузы : № 2752031 : заявл. 12.04.1979 : опубл. 07.07.1981 / Прокопов О. И., Зиязетдинов Р. Ф. ; заявитель и патентообладатель Башкирский сельскохозяйственный институт. – 4 с. – URL: [https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=843811&TypeFile=html](https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=843811&TypeFile=html) (дата обращения: 12.10.2020).

18. Патент № 106630 СССР, МПК А01С 7/18 (2000.01). Устройство для высева сельскохозяйственных культур по квадратно-гнездовому способу : № 454858 : заявл. 13.03.1956 : опубл. 07.07.1957 / Балановский П. А., Домонтович М. В. ; заявитель и патентообладатель Балановский П. А., Домонтович М. В. – 4 с. – URL: [https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=106630&TypeFile=html](https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=106630&TypeFile=html) (дата обращения: 12.10.2020).

19. Лобачевский, П. Я. Закономерности подачи технологического материала дискретными дозами // П. Я. Лобачевский // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 1999. – № 6. – С. 33–35.

20. Патент № 2363131 Российская Федерация, МПК А01С 7/18 (2006.01). Квадратно-гнездовая сеялка : № 2008113792/12 : заявл. 08.04.2008 : опубл. 10.08.2009 / Лобачевский П. Я., Попов А. Ю., Несмиян А. Ю. [и др.] ; патентообладатель ФГОУ ВПО АЧГАА. – 7 с. – URL: [https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2363131&TypeFile=html](https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2363131&TypeFile=html) (дата обращения: 12.10.2020).

21. Патент № 2369069 Российская Федерация, МПК А01С7/18. Квадратно-гнездовой способ посева : № 2008120457 : заявл. 22.05.2008 : опубл. 10.10.2009 / Лобачевский П. Я., Попов А. Ю., Несмиян А. Ю. [и др.] ; патентообладатель ФГОУ ВПО АЧГАА. – 5 с. – URL: [https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2369069&TypeFile=html](https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2369069&TypeFile=html) (дата обращения: 12.10.2020).

22. Зубрилина, Е. М. Распределение семян двух культур в рядке при совместном высеве / Е. М. Зубрилина // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2002. – № 7. – С. 13–15.

*Поступила 10.07.2020; принята к публикации 20.08.2020; опубликована онлайн 30.12.2020*

*Об авторе:*

**Попов Антон Юрьевич**, доцент кафедры проектирования и технического сервиса транспортно-технологических систем ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4922-4158>, popov\_a\_ju@mail.ru

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Mukhin V.A., Kromm A.A., Shchukin S.G. Effect of Cereal Spike Crops Sowing Methods on the Growing Space of Plants. *Sibirskiy vestnik selskokhozyaystvennoy nauki* = Siberian Herald of Agricultural Science. 2005; (6):71-78. (In Russ.)

2. Vasilenko V.V., Vasilenko S.V. [Distribution of Sugar Beet Seeds and Plants at Dotted Sowing]. *Tekhnika v selskom khozyaystve* = Machinery in Agriculture. 1999; (1):6-9. (In Russ.)

3. Marchenko L.A., Artushin A.A., Smirnov I.G., et al. Technology of Pesticides and Fertilizers Application with Unmanned Aerial Vehicles in Digital Agriculture. *Selskokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2019; 13(5):38-45. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2019-13-5-38-45>

4. Lichman G.I., Marchenko N.M. [Space Monitoring in Precision Farming System]. *Selskokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2010; (1):27-31. (In Russ.)

5. [Seed Complex Control and Management System]; Patent 167927 Russian Federation. No. 2015147700; appl. 06.11.2015; publ. 12.01.2017. Bulletin No. 2. Available at: [https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPM&DocNumber=167927&TypeFile=html](https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=167927&TypeFile=html) (accessed 12.10.2020). (In Russ.)

6. Lu W., Zeng M., Wang L., et al. Navigation Algorithm Based on the Boundary Line of Tillage Soil Combined with Guided Filtering and Improved Anti-Noise Morphology. *Sensors*. 2019; 19(18):3918. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/s19183918>

7. Mitterer T., Gietler H., Faller L.-M., et al. Artificial Landmarks for Trusted Localization of Autonomous Vehicles Based on Magnetic Sensors. *Sensors*. 2019; 19(4):813. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/s19040813>

8. Li Y., Wang X., Liu D. 3D Autonomous Navigation Line Extraction for Field Roads Based on Binocular Vision. *Journal of Sensors*. 2019; 2019. 16 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/6832109>
9. Han X., Kim H.-J., Jeon Ch.W., et al. Application of a 3D Tractor-Driving Simulator for Slip Estimation-Based Path-Tracking Control of Auto-Guided Tillage Operation. *Biosystems Engineering*. 2019; 178:70-85. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.11.003>
10. Malavazi F.B.P., Guyonneau R., Fasquel J.-B., et al. LiDAR-Only Based Navigation Algorithm for an Autonomous Agricultural Robot. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018; 154:71-79. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.034>
11. Garcia-Santillan I., Guerrero J.M., Montalvo M., et al. Curved and Straight Crop Row Detection by Accumulation of Green Pixels from Images in Maize Fields. *Precision Agriculture*. 2018; 19:18-41. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9494-1>
12. Bauer A., Bostrom A.G., Ball J., et al. Combining Computer Vision and Deep Learning to Enable Ultra-Scale Aerial Phenotyping and Precision Agriculture: A Case Study of Lettuce Production. *Horticulture Research*. 2019; 6:70. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1038/s41438-019-0151-5>
13. Yang G., Liu J., Zhao C., et al. Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing for Field-Based Crop Phenotyping: Current Status and Perspectives. *Frontiers in Plant Science*. 2017; 8. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01111>
14. Blok P.M., Boheemen K., Evert F.K., et al. Robot Navigation in Orchards with Localization Based on Particle Filter and Kalman Filter. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019; 157:261-269. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.046>
15. Fernandez B., Herrera P.J., Cerrada J.A. A Simplified Optimal Path Following Controller for an Agricultural Skid-Steering Robot. *IEEE Access*. 2019; 7. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2929022>
16. [Method of Ultrasonic Control of Seeders at Square Nest Sowing]: Patent 127497 USSR. No. 625573; appl. 16.04.1959; publ. 01.01.1960. 2 p. Available at: [https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=127497&TypeFile=html](https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=127497&TypeFile=html) (accessed 12.10.2020). (In Russ.)
17. [Method of Sowing Corn Seeds]: Patent 843811 USSR. No. 2752031; appl. 12.04.1979; publ. 07.07.1981. 4 p. Available at: [https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=843811&TypeFile=html](https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=843811&TypeFile=html) (accessed 12.10.2020). (In Russ.)
18. [Device for Sowing Crops by Square-Breeding Method]: Patent 106630 USSR. No. 454858; appl. 13.03.1956; publ. 07.07.1957. 4 p. Available at: [https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=106630&TypeFile=html](https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=106630&TypeFile=html) (accessed 12.10.2020). (In Russ.)
19. Lobachevskiy P.Ya. [Regularities of Flow of Technological Material by Discrete Dispensers]. *Vestnik rossyskoy selskokhozyaystvennoy nauki* = Bulletin of the Russian Agricultural Sciences. 1999; (6):33-35. (In Russ.)
20. [Square Nest Planter]: Patent 2363131 Russian Federation. No. 2008113792/12; appl. 08.04.2008; publ. 10.08.2009. 7 p. Available at: [https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2363131&TypeFile=html](https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2363131&TypeFile=html) (accessed 12.10.2020). (In Russ.)
21. [Square Cluster Sowing Method]: Patent 2369069 Russian Federation. No. 2008120457; appl. 22.05.2008; publ. 10.10.2009. 5 p. Available at: [https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2369069&TypeFile=html](https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2369069&TypeFile=html) (accessed 12.10.2020). (In Russ.)
22. Zubrilina Ye.M. [Distribution of Seeds of Two Crops in a Row When Sowing Together]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva* = Mechanization and Electrification of Agriculture. 2002; (7):13-15. (In Russ.)

*Received 10.07.2020; revised 20.08.2020; published online 30.12.2020*

*About the author:*

**Anton Yu. Popov**, Associate Professor of Chair of Design and Technical Service of Transport and Technological Systems, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4922-4158>, [popov\\_a\\_ju@mail.ru](mailto:popov_a_ju@mail.ru)

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



## Сравнение мембранного потенциала зерен пшеницы, разделенных на фракции по аэродинамическим свойствам, разных сортов с разной урожайностью

Н. Н. Барышева<sup>1\*</sup>, С. П. Пронин<sup>1</sup>, Д. Д. Барышев<sup>1</sup>,  
В. И. Беляев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова»  
(г. Барнаул, Российская Федерация)

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Алтайский государственный аграрный университет» (г. Барнаул, Российская Федерация)

\*[mnp-t@mail.ru](mailto:mnp-t@mail.ru)

*Введение.* Урожайность яровой пшеницы в значительной мере зависит от сорта, качества посевного материала, технологии возделывания и агроклиматических факторов. Установлено, что разделение семян пшеницы на фракции позволяет повысить уровень послеуборочной обработки, скорректировать качество зерна в зависимости от целевого назначения, а посев – увеличить урожайность. Целью статьи является исследование мембранного потенциала на оболочках зерен пшеницы, разделенных на фракции по аэродинамическим свойствам, сопоставление определенных признаков мембранного потенциала с аэродинамическими свойствами этих зерен и с урожайностью выбранных сортов.

*Материалы и методы.* Семена, разделенные на фракции, отличаются разными посевными качествами. Биологически неполноценные семена дают плохую всхожесть. Проведенный обзор свидетельствует о том, что разделение семян на фракции дает положительные тенденции в повышении урожайности, однако основными показателями качества остаются всхожесть и энергия прорастания, поэтому был разработан подход, который позволит определить качество семян пшеницы, разделенных на фракции.

*Результаты исследования.* Проведено исследование изменения мембранного потенциала семян пшеницы, разделенных на фракции по аэродинамическим свойствам. Представлены результаты апробации схемы включения зерна пшеницы в электрическую цепь с плоскими поверхностями электрода-зажима. Для исследования влияния сорта пшеницы, аэродинамических свойств зерен и урожайности на изменения мембранного потенциала были проанализированы следующие признаки: уровень потенциала покоя; 10-процентное время нарастания переменного потенциала; максимальное значение переменного потенциала.

*Обсуждение и заключение.* В результате двухфакторного дисперсионного анализа результатов исследования определены новые информативные показатели, которые достоверно отражают аэродинамические свойства семян и могут быть использованы для прогнозирования урожайности. Использование полученных результатов позволит сельскохозяйственным предприятиям, фермерским хозяйствам определить качество послеуборочной обработки семян пшеницы, скорректировать качество в зависимости от целевого назначения, выполнить оценку и прогноз урожайных свойств со стороны семенного материала.

© Барышева Н. Н., Пронин С. П., Барышев Д. Д., Беляев В. И., 2020



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

**Ключевые слова:** зерна пшеницы, урожайность, мембранный потенциал, варибельный потенциал, показатели, аэродинамические свойства, фракции

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

**Для цитирования:** Сравнение мембранного потенциала зерен пшеницы, разделенных на фракции по аэродинамическим свойствам, разных сортов с разной урожайностью / Н. Н. Барышева, С. П. Пронин, Д. Д. Барышев, В. И. Беляев. – DOI [10.15507/2658-4123.030.202004.550-575](https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.550-575) // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 550–575.

*Original article*

## Comparing the Membrane Potential of Wheat Grains of Different Varieties and Productivity Divided into Fractions According to Their Aerodynamic Properties

N. N. Barysheva<sup>a\*</sup>, S. P. Pronin<sup>a</sup>, D. D. Baryshev<sup>a</sup>,  
V. I. Belyaev<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Polzunov Altai State Technical University  
(Barnaul, Russian Federation)*

<sup>b</sup>*Altai State Agricultural University (Barnaul, Russian Federation)*

\*[mnn-t@mail.ru](mailto:mnn-t@mail.ru)

**Introduction.** Spring wheat yield depends largely on the wheat variety, seed quality, cultivation technology, and agro-climatic factors. It has been found that the separation of wheat seeds into fractions makes it possible to improve the quality of post-harvest processing, adjust the quality of grain depending on the intended use, and the sowing of the wheat grains divided into fractions allows increasing productivity. The aim of the article is to explore the membrane potential on the shells of wheat grains divided into fractions according to their aerodynamic properties and to compare certain membrane potential features with aerodynamic properties of these grains and the yields of selected varieties.

**Materials and Methods.** The seeds, divided into fractions, have different sowing qualities. Biologically deficient seeds have poor germination index. The study have found that the division of seeds into fractions contributes to increasing yields, but the main indicators of quality are still germination and viability, for this reason an approach has been developed to determine the quality of wheat seeds divided into fractions.

**Results.** This article studies the change in membrane potential of wheat seeds, divided into fractions according to their aerodynamic properties. The article presents the results of testing a new clamping electrode with a smooth surface to measure the membrane potential of wheat gains. To study the effect of the wheat variety, the aerodynamic properties of grains and yield on changes in membrane potential, we analyzed three indices: the resting potential level, time of variable potential rise to the maximum value and variable potential maximum value.

**Discussion and Conclusion.** New informative indicators have been determined because of the two-way analysis of variance of the research results. These indicators reliably reflect the aerodynamic properties of seeds and can be used to predict yields. The use of the obtained results will allow agricultural enterprises and farms to determine the quality of post-harvest processing of wheat seeds, adjust the quality depending on the intended use, and evaluate and forecast the productivity of seeds.

**Keywords:** wheat grains, yield, membrane potential, variable potential, indicators, aerodynamic properties, fractions

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

**For citation:** Barysheva N.N., Pronin S.P., Baryshev D.D., et al. Comparing the Membrane Potential of Wheat Grains of Different Varieties and Productivity Divided into Fractions According to Their Aerodynamic Properties. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(4):550-575. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.550-575>

## Введение

Важным фактором полной реализации урожайного потенциала возделываемых сортов сельскохозяйственных культур является обеспечение высокого качества семян. Их производство является основной проблемой развития сельскохозяйственной отрасли.

Качество семян определяется тремя основными составляющими: посевные, сортовые качества и урожайные свойства [1].

Показатели посевных качеств представляют собой совокупность физических свойств семян, характеризующих степень их пригодности для посева. Основные из них – лабораторная всхожесть, энергия прорастания, чистота семенного материала – стандартизированы<sup>1</sup>.

Исследования зависимости значений мембранного потенциала семян пшеницы от их лабораторной всхожести показали, что результаты могут быть использованы для оценки посевных качеств. Разработанный метод дает возможность использовать значение мембранного потенциала семян пшеницы в качестве показателя их посевного качества [2].

К сортовым качествам семян пшеницы относятся подлинность и сортовая чистота семян, показатели определяются после полевой апробации [1].

Урожайные свойства зависят не только от агроклиматических условий и приемов возделывания, но и определяются морфологическими и физиологическими особенностями семян [3].

В связи с необходимостью повышения урожайности возделываемых сортов сельскохозяйственных культур изучение урожайных свойств семян и их зависимость от посевных качеств является актуальным вопросом на сегодняшний день.

Однако важно учитывать, что посевное качество зависит не только от

условий выращивания, способов уборки, сушки, но и от послеуборочной обработки [4–8].

Зерновая масса неоднородна по целому ряду признаков. Семена пшеницы, разделенные на фракции, различаются по биохимическому составу и технологическим качествам [8; 9].

Щуплые, недозрелые, легковесные и поврежденные семена являются биологически неполноценными и дают плохие показатели качества [11]. Полновесные семена характеризуются большей жизнеспособностью.

Выделение из общей массы семян пшеницы по определенным критериям качества позволит повысить урожайность за счет более дружных всходов, сократить норму высева, скорректировать качество зерен в зависимости от целевого назначения [11; 12].

Целью данной работы является исследование и сравнение мембранного потенциала на оболочках зерен пшеницы, разделенных на фракции по аэродинамическим свойствам, сопоставление определенных признаков мембранного потенциала с аэродинамическими свойствами этих зерен и с урожайностью выбранных сортов.

## Обзор литературы

Урожайные свойства семян пшеницы зависят от климатических условий, плодородия почвы, агротехнических приемов. Однако основополагающую роль в формировании урожая играет посевное качество семян пшеницы.

Проблема оценки показателей посевного качества семян пшеницы достаточно широко изучена, представлено множество методов и средств диагностики [13; 14]. Проведено исследование взаимосвязи биологических свойств семян в зависимости от почвенно-климатических условий. Авторами представлена модель прогнозирования урожайных свойств семян [15].

<sup>1</sup> Hampton J. G., TeKrony D. M. Handbook of Vigour Test Methods. Zurich: ISTA, 1995. 117 p. URL: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19960707176> (дата обращения: 15.10.2020).

На примере ряда видов растений установлено, что одним из объективных параметров оценки качества семян являются их форма, размер и плотность. Каждому сорту или гибриду свойственна оптимальная форма семян, при которой посевной материал обладает наиболее высокими биологическими свойствами, которые определяются анатомическими и морфологическими особенностями их структуры, биохимическим составом и физиологическим состоянием [15].

Разделение семян по форме, размеру и плотности происходит в процессе обработки после сбора урожая. По основным физическим различиям происходит отделение семян от сорняков, поврежденных, щуплых семян [16].

Для обработки семян используются такие машины, как спиральные сепараторы и гравитационные столы, которые выполняют точное разделение по определенной физической характеристике [12; 16].

Разделение семян на фракции возможно при использовании воздушно-решетчатых зерноочистительных машин, настроенных на режим фракционирования, по двум признакам: размер зерна и аэродинамические свойствам [12; 16].

По принципу действия сепараторы можно разделить на механические, пневматические, электрические, оптические и рентгеновские [6; 17].

Ранние исследования показали, что использование гравитационного стола было эффективно для разделения семян на фракции по размеру. Фракции с семенами большого размера (более тяжелыми, крупными) давали более эффективные результаты в тестах на всхожесть, чем фракции с небольшими семенами [16].

Исследования размера и веса семян пшеницы показали, что у пшеницы размер семян коррелировал с урожайностью, тогда как масса семян не имела аналогичной тенденции [16]. Более крупные и тяжелые семена име-

ли меньшее содержание влаги, чем более мелкие и более легкие семена, что считалось экономически выгодным, поскольку затраты на сушку уменьшались [16].

Аэродинамические свойства семян – это совокупность свойств, определяющих способность частиц перемещаться под воздействием воздушного потока. Чем большее сопротивление воздуха испытывает зерно, тем медленнее движется и тем раньше упадет.

Сепарация в аэродинамическом потоке позволяет разделять семенной материал на фракции по удельному весу. Данный способ сепарации обеспечивает однородность семян при сепарации  $\pm 3\%$ , что дает возможность выделять фракции с повышенным содержанием клейковины и белка [6; 19].

В процессе сепарирования скорость воздушного потока регулируют по выносу полноценных семян в отходы. При обработке пшеницы скорость воздушного потока в пневмосепарирующих каналах обычно колеблется в пределах от 6 до 11 м/с.

К примеру, для семян озимой пшеницы рекомендуемая скорость потока воздуха в очистительных машинах составляет не менее 8 м/с. Установлено, что использование скорости потока воздуха не менее 8 м/с положительно сказывается на посевном качестве семян пшеницы [20].

Разделение семян по аэродинамическим признакам позволяет выявить семена, подверженные прорастанию, до сбора урожая пшеницы. Метод основан на взаимодействии силы трения и подъемной силы давления воздуха для разделения пшеницы на фракции. Очистка с аспирацией воздухом не использует трение как фактор разделения образца (в данном случае используется только давление воздуха) [17; 18].

Семена, разделенные на фракции, отличаются разными посевными качествами: легкие, щуплые семена – биологически неполноценные, дают

плохие показатели качества; крупные семена с большим удельным весом характеризуются большей жизнеспособностью [12].

В технологических процессах сепарации зерна разделение посевного материала на фракции следует считать одним из агрономических приемов повышения урожайности зерновых культур. Система мер сепарации позволяет обеспечить высокие урожайные свойства зерна, но необходимо также учитывать, что посевные качества семян являются важным фактором, определяющим урожайность. Только при высоких показателях посевного качества могут быть реализованы все потенциальные возможности сорта [19].

### Материалы и методы

Для проведения экспериментальных исследований были выбраны семена производственных посевов следующих сортов яровой пшеницы из урожая 2019 г.:

1) «Алтайская 75» (АО «Чистюньское», Топчихинский р-н, Алтайский край,  $S = 228$  га);

2) «Гранни» (ООО «Вирт», Целинный р-н, Алтайский край,  $S = 154$  га);

3) «Алтайская 75» (АО «Чистюньское», Топчихинский р-н, Алтайский край,  $S = 77$  га);

4) «Тасос» (ООО «Рассия», Новичинский р-н, Алтайский край,  $S = 95$  га).

Урожайность семян сорта «Алтайская 75 (228)» составила в 2019 г. 16,4 ц/га, сорта «Гранни» – 22,3 ц/га, сорта «Алтайская 75 (77)» – 35,0 ц/га, урожайность сорта «Тасос» – 39,6 ц/га. Нормы высева семян – 4 млн шт/га.

*Разделение семян на фракции по аэродинамическим свойствам*

Отбор проб для исследования проводился в соответствии с ГОСТом 12036-85<sup>2</sup>.

Разделение зерен пшеницы по аэродинамическим свойствам выполнено с помощью лабораторного парусного классификатора К-93. Скорости воздушных потоков составляли от 8 до 11 м/с с шагом в 1 м/с.

Таким образом, для исследований было получено 16 образцов зерен (по 4 образца с разными аэродинамическими свойствами для каждого сорта).

Каждый образец содержал 1 100 зерен (1 000 для определения массы тысячи зерен, 100 для измерения мембранного потенциала).

### *Оценка показателей качества*

Перед экспериментальным исследованием мембранного потенциала была измерена масса тысячи зерен каждого образца и проведена оценка лабораторной всхожести по методам ISTA. Из каждого образца зерен, отобранного по аэродинамическим свойствам, были взяты зерна для прорастания на фильтровальной бумаге. Лабораторная всхожесть установлена в соответствии с правилами Международной ассоциации по контролю качества семян (ISTA)<sup>3</sup>. Через семь дней проращивания семян при температуре  $20 \pm 1$  °С были проведены подсчеты нормально проросших зерновок. К числу нормально проросших относят зерна, имеющие хорошо развитые корешки и первичные листочки, занимающие не менее половины длины колеоптиля<sup>4</sup>. В соответствии с количеством проросших зерен установлен процент всхожести. Данные представлены в таблице. Как видно из таблицы, зерна имеют низкую лабораторную всхожесть. Причиной является тот факт, что измерения выполнены сразу после уборки урожая, поэтому зерна не прошли послеуборочного дозревания [26]. У всех куль-

<sup>2</sup> ГОСТ 12036-85. Семена сельскохозяйственных культур. Правила приемки и методы отбора проб (с Изменениями № 1, 2).

<sup>3</sup> Hampton J. G., TeKrony D. M. Handbook of Vigour Test Methods.

<sup>4</sup> Там же.

тур независимо от режима созревания семян с увеличением периода покоя лабораторная всхожесть, как правило, повышается [26]. Тем не менее данные по лабораторной всхожести оказались полезными при исследовании потенциала покоя у зерен пшеницы.

#### *Измерительный процесс*

Для исследования электрофизических свойств семян пшеницы выбран метод, основанный на теории мембранного потенциала [2]. Методика исследования мембранного потенциала семян пшеницы позволяет в кратчайшие сроки определить качество семенного материала и заключается в подготовке семян в течение 12 часов в термокамере при температуре 20 °С с использованием дистиллированной воды и дальнейшем измерении мембранного потенциала с помощью платы сбора данных ЛА-50 USB [2]. Система измерения мембранного потенциала подробно представлена в одной из работ [2].

Визуальный анализ на наличие поврежденных, щуплых, пустотелых семян в данном случае не проводился, поскольку семена прошли предварительный отбор по аэродинамическим свойствам.

Для проведения измерений был модифицирован электрод-держатель. В предыдущих исследованиях применялся электрод-держатель, выполненный в виде «крокодила» с острыми зубцами [2]. Зубчатый электрод был заменен на гладкий, который обеспечивает плотный контакт с оболочкой зерна. Система для измерения мембранного

потенциала у зерен пшеницы представлена на рисунке 1.

Для измерения напряжения использовалось однополюсное подключение зерна к плате ЛА-50 USB. Измеряемый сигнал подавался на нулевой вход, остальные 15 входов заземлены.

Для уменьшения уровня шума к измерительным электродам подключен резистор номиналом  $R = 100$  кОм.

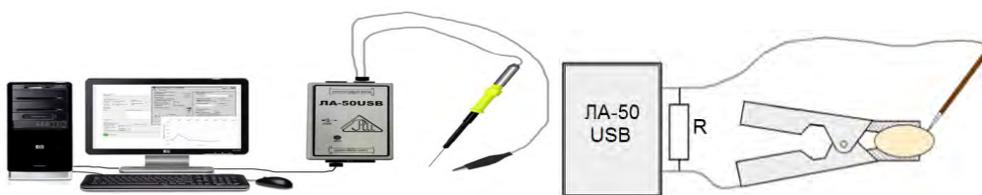
Запись сигнала осуществлялась с помощью программного обеспечения Saver. С помощью программного интерфейса пользователя были установлены частота дискретизации 300 Гц и время одного измерения 5 с.

#### *Обработка данных*

Детальное изучение полученных сигналов показало, что на регистрируемый мембранный потенциал накладывается гармоническая помеха с периодом 6 отсчетов. Учитывая, что один отсчет равен 1/300 с, получим частоту помехи, равную 50 Гц. Для ее исключения в регистрируемых данных использовался метод скользящего среднего окном в 48 отсчетов.

Для проверки однородности выборки полученных сигналов использовался тест Чоу.

При вычислении средних значений параметров, приведенных в таблице, грубые измерения исключались по критерию Граббса. Для анализа влияния сорта и аэродинамических свойств зерен пшеницы на изменения мембранного потенциала применялся двухфакторный дисперсионный анализ с повторениями.



Р и с. 1. Система для измерения мембранного потенциала у зерен пшеницы

F i g. 1. System for measuring membrane potential in wheat grains

**Результаты исследования**

Для проведения исследований было отобрано 4 сорта семян пшеницы. В таблице приведена информация о сортах пшеницы и их урожайности. Зерна каждого сорта были разделены по аэродинамическим свойствам (АДС) на четыре группы, представлено соотношение распределения зерен пшеницы по АДС (табл.).

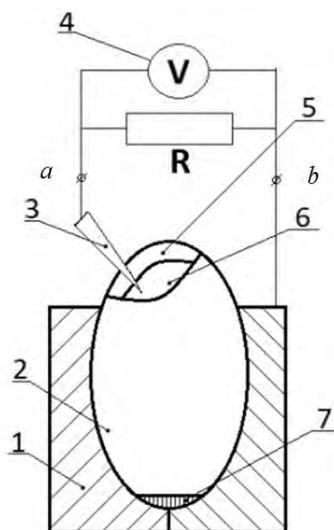
«Гранни» и «Тасос» являются немецкими сортами, «Алтайская 75» – это российский сорт мягкой яровой пшеницы. Для исследований взяты две пробы сорта «Алтайская 75» разной урожайности. Урожайи получены с двух разных полей.

Для алтайского сорта зерен пшеницы процент фракции семян, отобранных при скорости 9 м/с, в общем объеме выше, чем для остальных образцов. Для немецких сортов наибольшая доля семян в общем объеме была получена для фракции при скорости 8 м/с.

По каждой скорости сепарирования приведена масса 1 000 зерен (табл.). Для сорта «Гранни» получен аномальный результат. При скорости сепарирования 9 м/с масса меньше, чем при 8 м/с. У всех остальных сортов наблюдается закономерное возрастание массы 1 000 зерен с увеличением скорости сепарирования.

По каждому из 16 отобранных образцов зерен пшеницы были проведены исследования изменений мембранного потенциала. На рисунке 2 показана функциональная схема включения зерна пшеницы в электрическую цепь.

На этапе подготовки зерна к измерению происходит его набухание. В процессе набухания зерна под действием дистиллированной воды ионы на внешней стороне оболочки накапливаются за счет ионов, расположенных на внутренней ее стороне [21]. Возникает мембранный потенциал (МП), который



Р и с. 2. Функциональная схема включения зерна пшеницы в электрическую цепь: 1 – электрод-зажим; 2 – зерно пшеницы; 3 – электрод-игла; 4 – вольтметр; 5 – оболочка зерна; 6 – область зародыша зерна; 7 – хохолок зерна

F i g. 2. Functional diagram of the inclusion of wheat grain in the electrical circuit: 1 – electrode clamp; 2 – wheat grain; 3 – electrode needle; 4 – voltmeter; 5 – grain shell; 6 – area of a grain germ; 7 – tuft of grain

можно зафиксировать на зажимах электродов  $a - b$  (рис. 2).

Предположим, что концентрации ионов и проницаемости оболочек зерен пшеницы отличаются не только у семян разных сортов, но и у семян с различными АДС. Следовательно, изменения МП во времени тоже должны быть разными. Исследования изменений МП семян разных фракций позволят определить информативные признаки, которые будут достоверно отражать АДС.

На рисунке 3 представлены типичные графики изменения МП для сортов «Гранни» и «Тасос» из фракции семян, отсортированных при скоростях 8 и 9 м/с. Аналогичные экспериментальные графики были получены для других сортов с различными АДС.

Результаты исследований показали, что выборки наблюдений состоят из нескольких подвыборок. На рисунке 3а сигналы № 1 и 2 имеют явные визуальные отличия от остальных. С целью установить, необходимо ли оценивать одну объединенную регрессию или отдельные регрессии для каждой подвыборки, было проведено статистическое исследование. С помощью теста Чоу была выполнена проверка однородности выборки и подтверждено выявленное различие. Так как фактическое значение  $F$ -критерия больше табличного, следует признать существенность различия исследуемых подвыборок. Основываясь на полученных результатах статистического анализа, принято решение исключить сигналы № 1 и 2 из дальнейшей обработки. Аналогичным образом, были проанализированы результаты исследований для всех 16 образцов зерен пшеницы. Практически из каждой выборки были исключены от одного до трех сигналов.

Экспериментально установлено, что в момент прокалывания оболочки зерна электродом-иглой наблюдается отрицательный мембранный потенциал (до 1 с), который называют потенциалом покоя. На рисунке 4 он обозначен

временным интервалом  $t_{pr}$ . Потенциал покоя выделен как первый возможный признак мембранного потенциала, характеризующий свойства зерна.

После потенциала покоя на графиках наблюдается фаза деполяризации оболочки зерна с резким скачком мембранного потенциала до максимального значения и длительной нерегулярной ветвью.

Согласно классификации сигналов высших растений подобные сигналы называют переменным потенциалом (ВП) [22–24].

На временном интервале деполяризации  $t_d$  визуально были выделены еще три признака, которые могут отражать совпадения и различия между сортами пшеницы, их аэродинамическими свойствами и урожайностью. Первый – это линейная скорость нарастания ВП на временном интервале  $t_l$ . Второй – это 10-процентное время нарастания ВП от значения  $0,9 \cdot \max VP$  до  $\max VP$  на временном интервале  $t_{10}$ , где  $\max VP$  – максимальное значение ВП. Третий – максимальное значение ВП. Все интервалы приведены на рисунке 4.

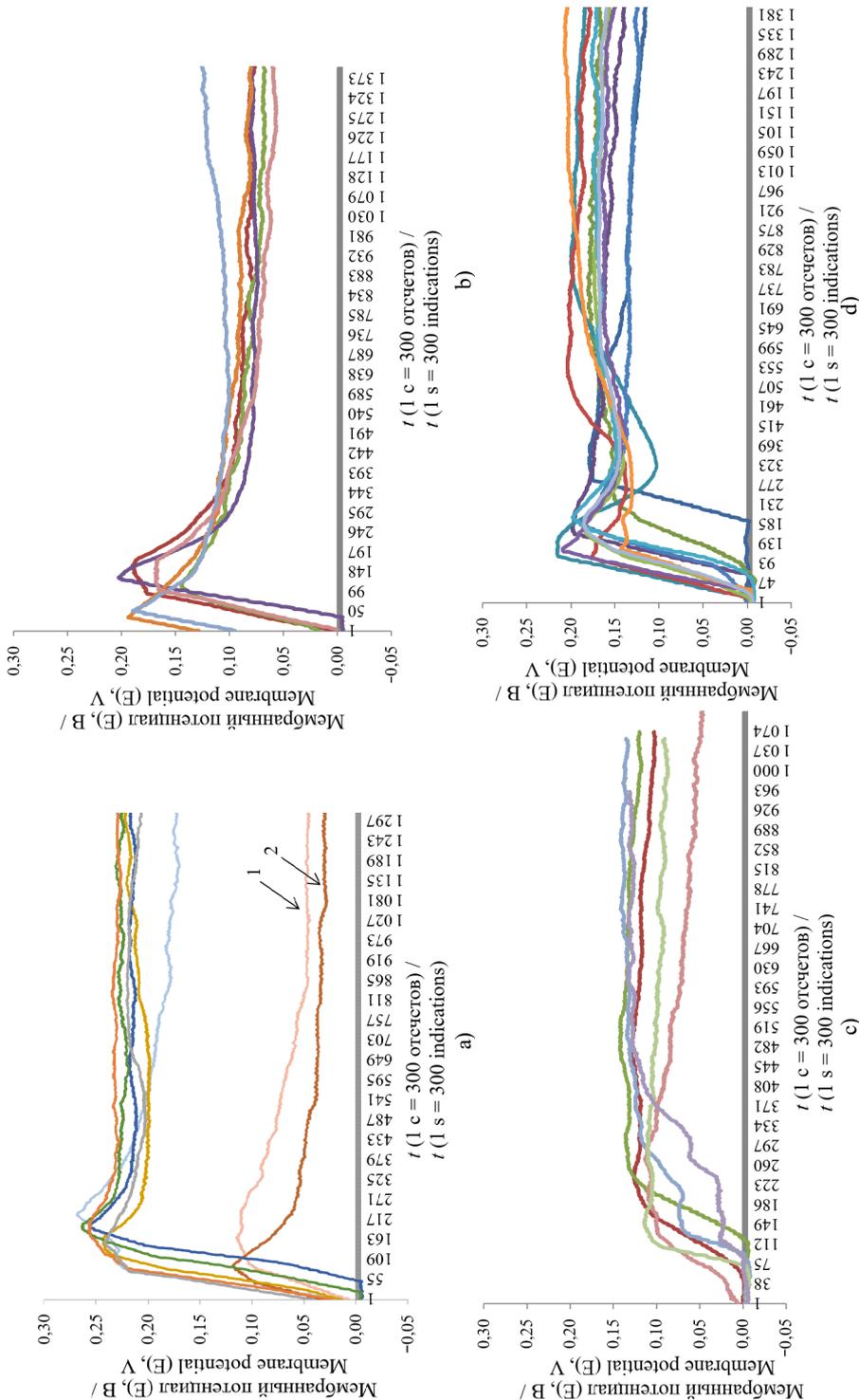
*Потенциал покоя как первый информативный признак*

Следуя классической теории мембранного потенциала, при набухании зерна ионы  $K^+$  выходят на наружную сторону оболочки, поэтому на внутренней стороне возникает отрицательное значение за счет ионов  $Cl^-$ , что и подтверждают экспериментальные графики. На зажимах  $a - b$  возникает потенциал покоя с отрицательным значением на зажиме  $a$ . Оценим возможность применения потенциала покоя как признака, характеризующего такие свойства, как сорт, АДС, урожайность.

Согласно теории Ходжкина – Хакси, сила калиевого  $I_K$  и натриевого  $I_{Na}$  токов равны соответственно [25]:

$$I_K = g_K (V - V_K), \quad (1)$$

$$I_{Na} = g_{Na} (V - V_{Na}), \quad (2)$$



Р и с. 3. Экспериментальные графики изменения мембранного потенциала во времени:

а, б – графики зерен пшеницы сорта «Гранин» при скоростях сепарирования 9 и 10 м/с соответственно;

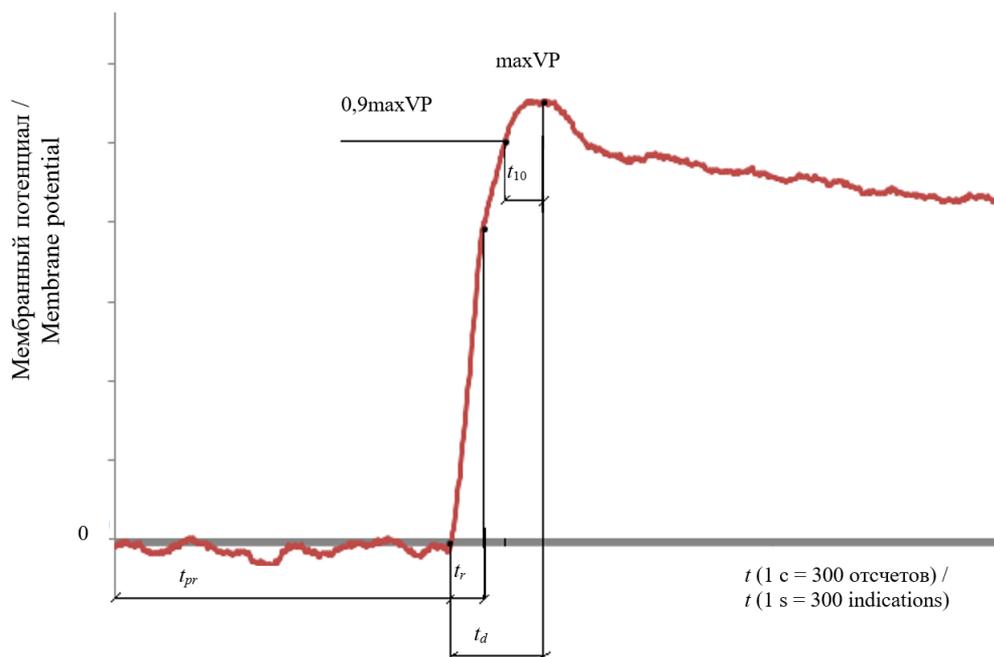
с, д – графики зерен пшеницы сорта «Тасос» при скоростях сепарирования 9 и 10 м/с соответственно

Fig. 3. Experimental graphs of membrane potential changes over time: а, б – graphs of wheat seeds of the “Granini” variety for the separation speeds 9 and 10 m/s; с, д – graphs of wheat seeds of the “Tasos” variety for the separation speeds 9 and 10 m/s

Таблица  
Table

Результаты исследования переменного потенциала  
Results of the variable potential study

Сорт, урожайность, ц/га / Variety productivity, q/ha	Скорость сепарирования, м/с / Separation rate, m/s	Распределение семян по скорости сепарирования, % / Seeds distribution according to the speed of separation, %	Масса 1 000 зерен, г / Mass of 1,000 grains, g	Всхожесть, % / Germination, %	Скорость нарастания ВП, мВ/с / VP growth rate, mV/s	10-процентное время нарастания ВП, с / 10% rise time of VP, s	Среднее максимальное значение ВП, мВ / Average maximum value of VP, mV
1	2	3	4	5	6	7	8
«Алтайская 75 (228)» 16,4 ц/га / "Altayskaya 75 (228)", 16,4 q/ha	8	10,8	21,15	42 %	1,03	0,02 ± 0,01	249 ± 6
	9	40,8	30,69	62 %	0,52	0,15 ± 0,01	174 ± 4
	10	40,4	35,21	50 %	1,14	0,04 ± 0,01	221 ± 7
«Гранни» 22 ц/га / "Granni" 22 q/ha	11	8,0	39,89	35 %	0,75	0,03 ± 0,01	207 ± 6
	8	45,0	38,30	50 %	0,57	0,13 ± 0,01	258 ± 3
	9	34,5	29,30	90 %	0,49	0,31 ± 0,02	236 ± 6
«Алтайская 75 (77)» 35 ц/га / "Altayskaya 75 (77)" 35 q/ha	10	13,2	40,10	58 %	0,46	0,10 ± 0,01	176 ± 4
	11	6,4	42,90	42 %	0,40	0,09 ± 0,01	126 ± 5
	8	32,0	24,26	58 %	0,72	0,19 ± 0,01	231 ± 5
«Тасос» 39,6 ц/га / "Tasos" 39,6 q/ha	9	44,4	29,54	87 %	0,50	0,45 ± 0,01	161 ± 5
	10	14,8	34,23	50 %	0,83	0,09 ± 0,01	209 ± 7
	11	8,8	37,80	75 %	0,26	0,05 ± 0,01	74 ± 2
«Тасос» 39,6 ц/га / "Tasos" 39,6 q/ha	8	44,6	28,20	50 %	0,46	0,24 ± 0,01	197 ± 3
	9	36,0	31,10	92 %	0,33	0,54 ± 0,02	137 ± 1
	10	18,0	36,50	60 %	0,61	0,22 ± 0,01	200 ± 3
	11	1,4	40,60	40 %	0,52	0,10 ± 0,01	162 ± 4



Р и с. 4. Фазы изменения мембранного потенциала:  $t_{pr}$  – временной интервал потенциала покоя;  $t_d$  – временной интервал деполяризации оболочки зерна;  $t_r$  – временной интервал линейного нарастания ВП;  $t_{10}$  – 10-процентное время нарастания ВП от значения  $0,9\max VP$  до  $\max VP$ ;  $\max VP$  – максимальное значение ВП

F i g. 4. Phases of membrane potential change:  $t_{pr}$  – the time interval of the resting potential;  $t_d$  – the time interval of depolarization of the grain shell;  $t_r$  – the time interval of a linear increase in VP;  $t_{10}$  – 10% of the rise time of the VP from the value of  $0.9\max VP$  to  $\max VP$ ;  $\max VP$  – maximum value of variable potential (VP)

где  $V$  – потенциал на оболочке зерна;  $g_K$ ,  $g_{Na}$  – калиевая и натриевая проводимости;  $V_K$ ,  $V_{Na}$  – равновесные потенциалы для ионов  $K^+$  и  $Na^+$ .

В нашем случае  $V$  – это потенциал покоя, отраженный графически на рисунке 4. При потенциале покоя алгебраическая сумма токов равна нулю, поэтому:

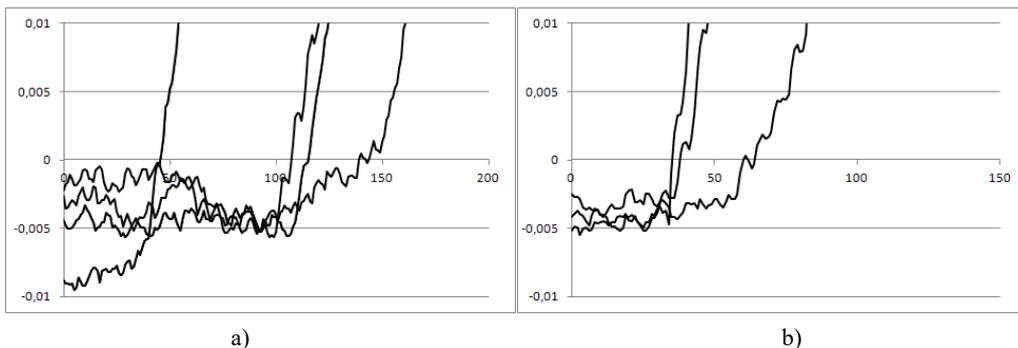
$$g_K(V - V_K) + g_{Na}(V - V_{Na}) = 0. \quad (3)$$

В одном из исследований приведены экспериментальные данные проницаемостей оболочек зерен пшеницы «Алтайский янтарь» [21]. При высокой всхожести проницаемость оболочки для ионов  $K^+$  в 26 раз больше, чем

для ионов  $Na^+$ . При низкой всхожести проницаемость для ионов  $K^+$  в 260 раз выше, чем для ионов  $Na^+$ . Поскольку проницаемость для ионов  $K^+$  гораздо выше, чем для ионов  $Na^+$ , то для оценки равновесного потенциала  $K^+$  примем значения, показанные на рисунке 5.

Ионная проницаемость может быть выражена в терминах ионной проводимости, поэтому приведенные соотношения перенесем на проводимости [25].

Зерна сорта «Тасос» имеют при скорости 9 м/с высокую лабораторную всхожесть 92 % (табл.). На основе экспериментальных данных (рис. 5а) примем равновесный потенциал  $V_K = -10$  мВ. Равновесный натриевый потенциал – это максимальное значение



Р и с. 5. Изменение мембранного потенциала семян пшеницы:  
а) сорт «Тасос», 9 м/с; б) сорт «Гранни», 9 м/с

Fig. 5. Change in the membrane potential of wheat grains: a) variety “Tasos”, 9 m/s;  
b) variety “Granni”, 9 m/s

вариабельного потенциала. По графикам на рисунке 3с можно отметить, что максимальное значение ВП лежит в диапазоне от +120 до +150 мВ. Тогда уравнение (3) для нижней границы примет вид:

$$26g_{Na}(V + 10) + g_{Na}(V - 120) = 0. \quad (4)$$

Решая данное уравнение, получим величину потенциала покоя  $V = -5,2$  мВ. Для верхней границы равновесного потенциала  $V_{Na} = 150$  мВ, поэтому значение потенциала покоя  $V = -4,07$  мВ. Из полученных значений следует, что диапазон изменения потенциала покоя для зерен из фракции 9 м/с сорта «Тасос» составляет 1,13 мВ, а среднее значение – минус 4,6 мВ. Из графиков видно, что у зерен нет стабильного уровня потенциала покоя. Графики представляют ритмические колебания с различной частотой и амплитудой.

На рисунке 5b представлены графики потенциала покоя зерен пшеницы сорта «Гранни» с аэродинамическими свойствами 9 м/с. Зерна имеют низкую всхожесть (60 %, табл.). При низкой всхожести проводимость оболочки для ионов  $K^+$  в 260 раз выше, чем для ионов  $Na^+$ . По максимумам графиков на рисунке 3а можно определить диапазон

равновесного натриевого потенциала:  $V_{Na} = 240 \div 260$  мВ. За равновесный калиевый потенциал примем значение  $V_K = -5$  мВ (рис. 5b).

Тогда уравнение (3) при условии  $V_{Na} = 240$  мВ запишется в виде:

$$260g_{Na}(V + 5) + g_{Na}(V - 240) = 0. \quad (5)$$

А при  $V_{Na} = 260$  мВ:

$$260g_{Na}(V + 5) + g_{Na}(V - 260) = 0. \quad (6)$$

Решая эти уравнения, получим оценку потенциала покоя, который лежит в диапазоне от  $-4,1$  до  $-4,4$  мВ, а среднее значение составляет  $-4,25$  мВ. Сравнивая полученный результат с экспериментальными графиками на рисунке 5b, видим, что изменение потенциала покоя лежит в очень узком диапазоне.

Статистическое усреднение по группе семян с одними и теми же АДС приводит к результату, близкому  $-5$  мВ. Аналогичные вычисления по другим сортам привели к такому же результату.

Следовательно, уровень потенциала покоя не может быть характерным отличительным признаком между зернами различных сортов, АДС и урожайности.

*Скорость нарастания сигнала как второй информативный признак*

В одной из работ сделан вывод о том, что в формирование фазы деполаризации у высших растений большой вклад вносит выходящий поток ионов  $\text{Cl}^-$  в сравнении с выходящим потоком протонов [22]. Эксперименты выполнялись на проростках тыквы и зерен пшеницы. Допустим, что аналогичный механизм действует и на оболочке зерна пшеницы. Тогда за счет выхода ионов  $\text{Cl}^-$  за пределы оболочки на внутренней ее стороне образуется избыток положительных ионов. Ток идет от зажима *a* к зажиму *b* (рис. 2). Открываются каналы оболочки для ионов  $\text{Na}^+$ . Электрическая цепь замыкается, происходит длительная «разрядка» в виде нерегулярной ветви на графиках.

Конечно, высказанный механизм движения ионов в экспериментальной установке является гипотезой, которая еще требует своего подтверждения. Однако именно гипотеза позволяет более осознанно определить признаки у исследуемых сигналов, которые можно будет сопоставить с сортом, урожайностью и аэродинамическими свойствами зерен.

Таким образом, в качестве второго информативного признака выбрана скорость нарастания ВП в фазе деполаризации на прямолинейном участке.

Аналогично выводам авторов, изложенным в другой работе, скорость нарастания ВП характеризует скорость изменения проницаемости оболочки для ионов  $\text{Na}^+$ , а значит, выражает особенности сорта пшеницы с определенными аэродинамическими свойствами их зерен [25].

Скорость нарастания ВП вычисляли по формуле  $\Delta V/\Delta t$ , где  $\Delta V$  – величина изменения ВП на соответствующем ему временном интервале  $\Delta t$ . Скорость, мВ/мс.

Для анализа влияния сорта и АДС зерен пшеницы на скорость нарастания

ВП был применен двухфакторный дисперсионный анализ с повторениями.

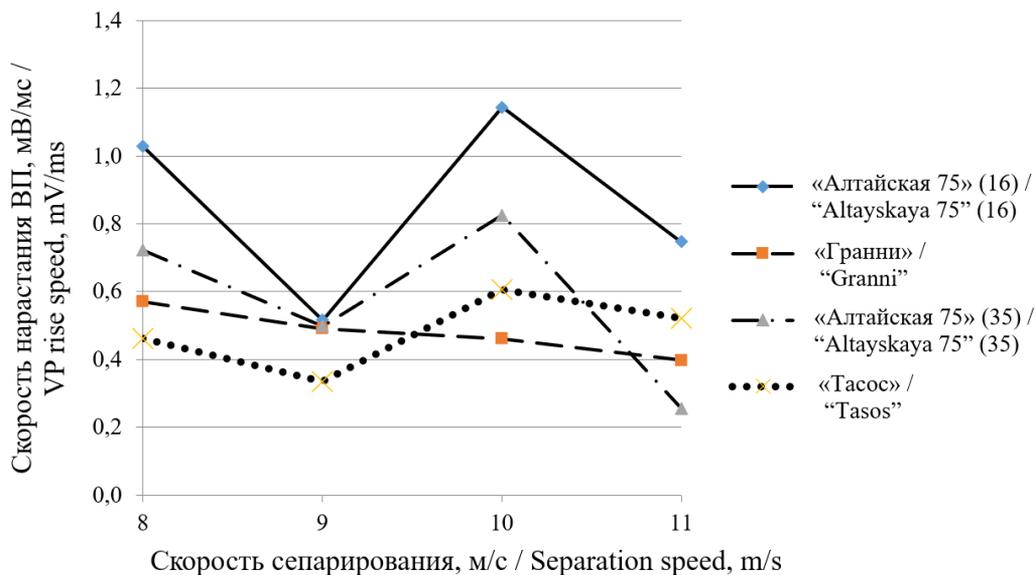
Как следует из таблицы, каждый из четырех сортов пшеницы (первый фактор) включает в себя по четыре фракции семян, разделенных по скорости сепарирования (второй фактор).

На основе расчетных данных выполненного дисперсионного анализа в таблице представлены средние значения скорости нарастания ВП и построены графики для каждой комбинации «сорт – скорость сепарирования», приведенные на рисунках 6 и 7.

Из рисунка 6 следует, что наибольшей скоростью нарастания ВП (в среднем 0,86 мВ/мс) обладают зерна пшеницы сорта «Алтайская 75». Пшеница, собранная с первого поля, имеет урожайность 16,4 ц/га. Этот же сорт пшеницы, собранный с другого поля, имеет урожайность 35 ц/га, а скорость нарастания ВП в среднем 0,58 мВ/мс. Формы графиков очень похожи.

Поскольку посевной материал был один и тот же, свойства оболочек зерен пшеницы нового урожая сохраняют идентичность по скорости нарастания ВП. Вероятнее всего, на формирование свойств оболочки у зерен пшеницы, полученных с первого поля, существенное влияние оказало другое качество почвы. Однако у зерен этого сорта при скорости сепарирования 9 м/с наблюдаются практически одинаковые скорости нарастания ВП, что свидетельствует об одинаковых свойствах оболочек зерен. Возможно, что зерна, отсортированные при скорости 9 м/с с первого и второго полей, при высеве на одном поле дадут одинаковые результаты. Эту гипотезу планировалось проверить осенью 2020 г.

Линии графика сорта пшеницы «Тасос» в диапазоне от 8 до 10 м/с параллельны линиям графика сорта пшеницы «Алтайская 75». Сорт «Тасос» имеет среднюю скорость нарастания ВП 0,48 мВ/мс. Таким образом, является тенденция зависимости ско-



Р и с. 6. Изменения скорости нарастания ВП от скорости сепарирования для четырех сортов пшеницы

F i g. 6. Changes in the VP rise speed depending on the separation seed for four wheat varieties

рости нарастания ВП от урожайности пшеницы. С повышением урожайности скорость нарастания ВП уменьшается.

Результаты сорта «Гранни» являются аномальными относительно других сортов. Во-первых, форма графика отличается от других графиков и представляет монотонно убывающую функцию (рис. 6). Во-вторых, как следует из таблицы, масса 1 000 зерен составляет 29,3 г при скорости сепарирования 9 м/с. По логике масса должна быть больше, чем при скорости сепарирования 8 м/с.

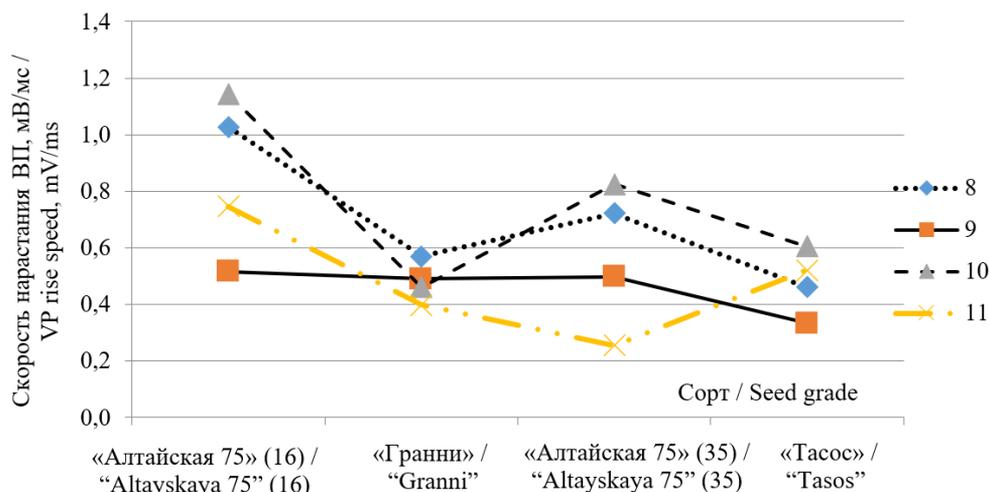
Вполне вероятно, что на этот высокоурожайный сорт тоже повлияло качество почвы. Из всего графика выделяется значение скорости нарастания ВП при скорости сепарирования 9 м/с. Это значение практически совпадает со значением сорта «Алтайская 75». Следовательно, свойства оболочек зерен пшеницы у этих сортов очень близки и, высеянные на одном и том же поле, они дают одинаковые урожаи.

Второй аномальный результат скорости нарастания ВП получен при

скорости сепарирования 11 м/с. Во-первых, наблюдается очень большой разброс по скорости нарастания ВП. Во-вторых, нарушается логический вывод: уменьшается скорость нарастания ВП – увеличивается урожайность. Причиной могут быть микротрещины в оболочках зерен, которые и влияют на изменение скорости нарастания ВП. Движение ионов через оболочку происходит не только по ионным каналам, но и микротрещинам.

Из рисунка 7 следует, что у зерен пшеницы сорта «Алтайская 75» с различными АДС наблюдаются большие расхождения в скорости нарастания ВП. Этот факт говорит о нестабильности свойств оболочки зерна. Видимо, поэтому зерна, высеянные в хорошую почву, дают высокий урожай, и наоборот. Вывод, на первый взгляд, тривиальный, но он требует конкретизации понятия «хорошая почва». Причем в сочетании со свойствами оболочки зерна.

На рисунке 7 выделяется график из фракции 9 м/с. Во-первых, в нем нет сильных изменений скорости нараста-



Р и с. 7. Изменение скорости нарастания ВП от сорта пшеницы при заданной скорости сепарирования

Fig. 7. Changes in the VP rise speed depending on the wheat variety at a given separation speed

ния ВП для всех исследованных сортов. Во-вторых, график имеет минимальные значения скорости нарастания ВП для всех сортов, исключая аномальный график при скорости сепарирования 11 м/с.

Дисперсионный анализ в целом по всем скоростям сепарирования свидетельствует об очень сильной зависимости скорости нарастания ВП от сорта пшеницы. Уровень значимости составляет  $5 \cdot 10^{-6}$ , что во много раз меньше заданного уровня значимости 0,05. При этом расчетное значение отношения дисперсий 11,25 значительно превышает критическое значение 2,75.

Сильно влияют на скорость нарастания ВП зерен скорость их сепарирования. Уровень значимости  $1,3 \cdot 10^{-4}$  меньше заданного уровня значимости 0,05, а расчетное отношение дисперсий 7,98 превышает критическое 2,75.

Влияние взаимодействия обоих факторов на скорость нарастания ВП тоже значимо, но выражено весьма слабо. Уровень значимости составляет 0,045, а расчетное значение отношения дисперсий 2,08 незначительно превышает критическое 2,03.

При отсутствии взаимодействия между факторами графики становятся параллельными. Следовательно, при слабом взаимодействии у отдельных графиков может наблюдаться тенденция к параллельности. Она хорошо проявляется на рисунке 6 в диапазоне скорости сепарирования  $8 \div 10$  м/с для сортов «Тасос» и «Алтайская 75».

По данным урожайности из первого столбца таблицы и данным скорости нарастания ВП при 9 м/с для каждого сорта вычислен коэффициент линейной корреляции:  $R = 0,74$ , что свидетельствует о сильной зависимости между скоростью нарастания ВП и урожайностью. Линейное уравнение скорости нарастания  $v_{ВП}$  для зерен этой фракции имеет вид:

$$v_{ВП} = -0,006x + 0,62, \quad (7)$$

где  $x$  – урожайность исследуемых сортов пшеницы.

Аналогично получено линейное уравнение для зерен из фракции 8 м/с:

$$v_{ВП} = -0,016x + 1,16. \quad (8)$$

Коэффициент линейной корреляции составляет  $R = 0,71$ . Переменная  $x$  обозначает урожайность, а коэффициент при  $x$  имеет размерность мВ-га/с-ц.

Полученные коэффициенты свидетельствуют о сильной зависимости времени нарастания ВП от урожайности при скоростях сепарирования 8 и 9 м/с.

Остальные фракции зерен имеют меньшие коэффициенты линейной корреляции 0,42 и 0,55 для фракций 10 и 11 м/с соответственно.

График на рисунке 7 при скорости сепарирования 9 м/с и уравнение (7) показывают, что линия имеет очень малый угол наклона. Следовательно, независимо от урожайности скорость нарастания ВП остается неизменной у зерен всех сортов. Значит, оболочки имеют одинаковые свойства. Исследователи выдвигают версию о том, что наибольшую урожайность дают зерна из фракций  $8 \div 9$  м/с. Такая версия вполне себя оправдывает с точки зрения скорости нарастания ВП [12].

*10-процентное время нарастания сигнала как третий информативный признак*

10-процентное время нарастания ВП представляет собой процесс завершения деполаризации оболочки зерна. Очевидно, что нелинейное изменение ВП на временном интервале  $t_{10}$  определяется скоростью изменения проницаемости оболочки зерна.

В результате двухфакторного дисперсионного анализа с повторениями получен следующий результат. Наблюдается сильная зависимость 10-процентного времени нарастания от сорта пшеницы. Уровень значимости составляет  $4,8 \cdot 10^{-10}$ , что во много раз меньше заданного уровня значимости 0,05. При этом расчетное значение дисперсионных отношений 18,15 значительно превышает критическое значение 2,68.

Сильно влияют на 10-процентное время нарастания ВП зерна с различными скоростями сепарирования. Уровень значимости  $6,99 \cdot 10^{-19}$  меньше за-

данного уровня значимости 0,05, а расчетное отношение дисперсий 40,04 превышает критическое 2,68.

Влияние взаимодействия обоих факторов на скорость нарастания ВП тоже значимо. Уровень значимости составляет 0,02, а расчетное значение отношения дисперсий 2,29 незначительно превышает критическое 1,95.

В диапазоне скоростей сепарирования от 8 до 10 м/с наблюдается тенденция параллельности линий графиков. Параллельность означает отсутствие взаимодействия между факторами и наличие явных закономерностей при скоростях сепарирования 8 и 9 м/с (рис. 8). У зерен всех сортов наблюдается увеличение 10-процентного времени нарастания с увеличением урожайности. Особенно наглядно эти закономерности проявляются на графиках рисунка 9. Однако графики нельзя использовать для определения и анализа функциональной зависимости, потому что по оси абсцисс отражены сорта с возрастающей урожайностью, а не сами урожайности. Если по оси абсцисс задать урожайности, то для зерен из фракции 9 м/с получим зависимость, которую можно аппроксимировать линейной функцией:

$$t_{10} = 4,38x - 15,3. \quad (9)$$

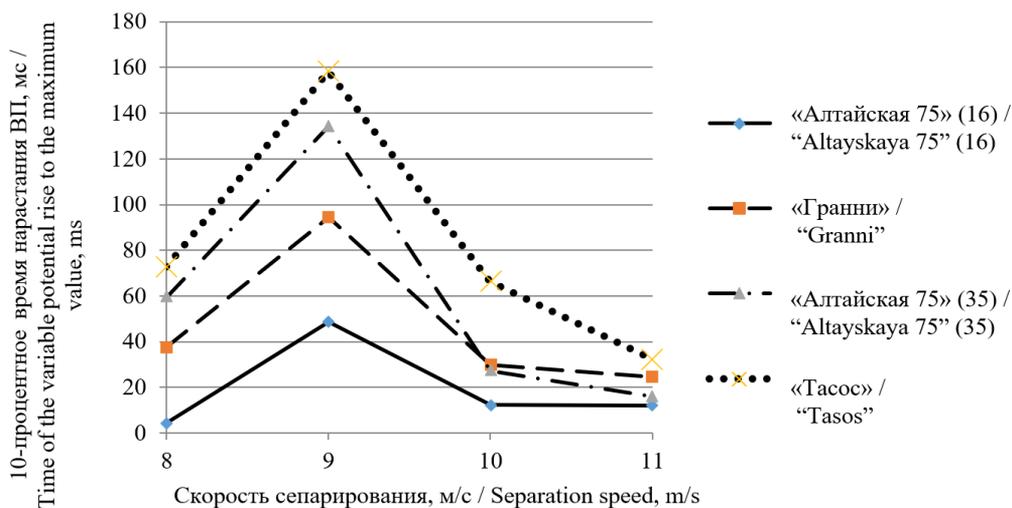
Коэффициент линейной корреляции составляет 0,982.

Аналогично можно построить линейную зависимость для зерен из фракции 8 м/с:

$$t_{10} = 2,64x - 32,24. \quad (10)$$

Коэффициент линейной корреляции составляет 0,965. Переменная  $x$  обозначает урожайность, а коэффициент при  $x$  имеет размерность с-га/ц.

Закономерное увеличение 10-процентного времени нарастания ВП с увеличением урожайности у зерен всех сортов свидетельствует о различ-



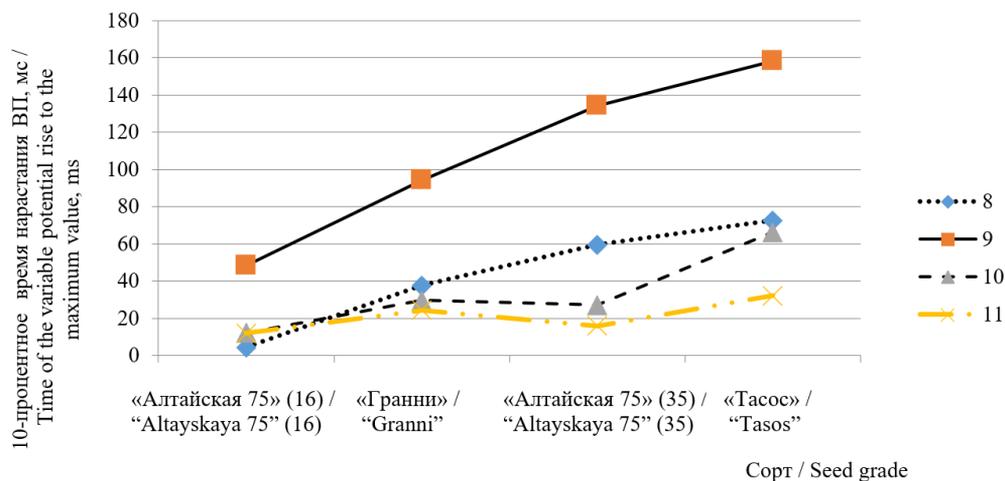
Р и с. 8. Изменения времени нарастания ВП от скорости сепарирования для четырех сортов пшеницы

F i g. 8. Changes in the VP rise time depending on the separation speed for four wheat varieties

ном изменении скорости проницаемости оболочек. Наименьшую скорость проницаемости имеют зерна с большей урожайностью. Максимально выраженные изменения 10-процентного времени нарастания ВП от урожайно-

сти наблюдаются у зерен из фракций 8 и 9 м/с.

В перспективе, имея экспериментальный результат, можно решать обратную задачу. По значению 10-процентного времени нарастания у зерен



Р и с. 9. Изменение 10-процентного времени нарастания ВП от сорта пшеницы при заданной скорости сепарирования

F i g. 9. Changes in VP rise time to the maximum value depending on a wheat variety at a given separation speed

пшеницы из фракции 9 м/с возможно прогнозирование общей урожайности сорта по всем фракциям.

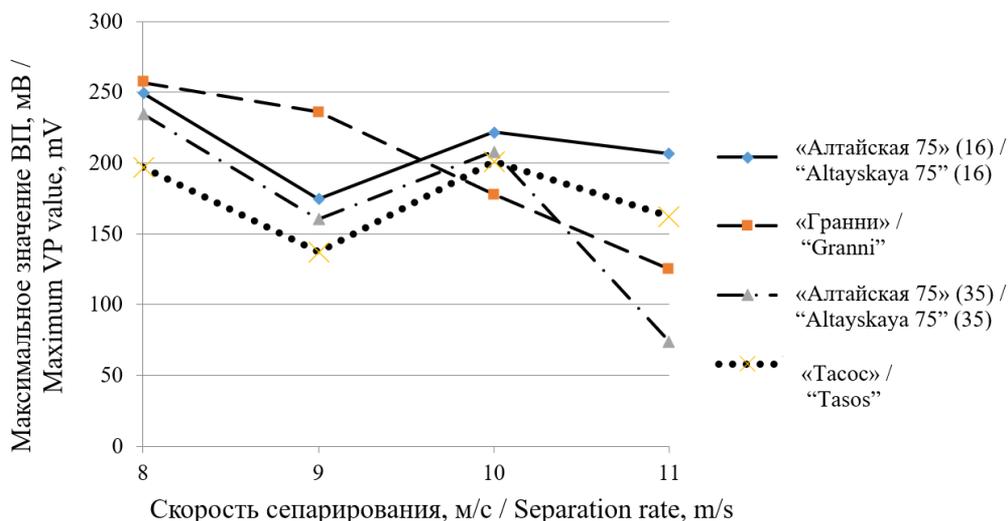
*Максимальное значение вариабельного потенциала как четвертый информативный признак*

Фаза деполяризации заканчивается максимальным значением ВП. Максимальное значение зависит от стимула воздействия, внешней и внутренней концентраций ионов относительно оболочки. На оболочку зерен воздействовали одним стимулом – прокаливанием. Изначально внешняя концентрация ионов отсутствовала, потому что набухание происходило под действием дистиллированной воды. Поскольку процесс деполяризации оболочки зерна происходит за счет ионов  $N^+$ , то максимальное значение ВП определяется концентрацией ионов  $N^+$ , содержащихся в зерне [25]. Максимальные значения ВП были определены из экспериментальных данных по каждому зерну. Для исключения «грубых» значений использовался критерий Граббса. Средние значения и доверительные интервалы, вычисленные при доверительной вероятности 0,95, отражены в таблице.

На рисунке 10 представлены изменения максимального значения ВП от скорости сепарирования для четырех сортов пшеницы.

При скорости сепарирования 11 м/с наблюдаются значительные расхождения в максимальных значениях ВП у разных сортов. Зато в диапазоне от 8 до 10 м/с проявляются закономерности. В среднем максимальное значение ВП для зерен сорта «Алтайская 75» с урожайностью 16,4 ц/га выше, чем у зерен этого же сорта с урожайностью 35 ц/га. Формы графиков очень похожи. Следовательно, свойства оболочек идентичны. Большее максимальное значение ВП свидетельствует о большей концентрации ионов  $Na^+$  у зерен с меньшей урожайностью. Вероятно, что поле, засеянное этим сортом, имело большую концентрацию соли  $NaCl$ .

Дисперсионный анализ в целом по всем скоростям сепарирования свидетельствует об очень сильной зависимости максимального значения ВП от сорта пшеницы. Уровень значимости составляет  $2,93 \cdot 10^{-6}$ , что во много раз меньше заданного уровня значимости 0,05. При этом расчетное значение ди-



Р и с. 10. Изменение максимального значения ВП от скорости сепарирования для четырех сортов пшеницы

F i g. 10. Changes in the maximum VP value depending on the separation speed for four wheat varieties  
*Technologies and means of agricultural mechanization*

сперсионных отношений 10,44 значительно превышает критическое значение 2,67.

Сильно влияют на максимальное значение ВП разделение семян на фракции по АДС. Уровень значимости  $5,34 \cdot 10^{-18}$  меньше заданного уровня значимости 0,05, а расчетное отношение дисперсий 37,57 превышает критическое 2,65.

Влияние взаимодействия обоих факторов на максимальное значение МП тоже значимо. Уровень значимости составляет  $2,04 \cdot 10^{-10}$ , а расчетное значение отношения дисперсий 7,74 превышает критическое 1,95.

Наблюдается тенденция зависимости максимального значения ВП от урожайности пшеницы. С повышением урожайности максимальное значение ВП уменьшается. По данным урожайности из таблицы и средним максимальным значениям ВП получено линейное уравнение для зерен из фракции 9 м/с:

$$\max VP = -2,54x + 249, \quad (11)$$

с коэффициентом линейной корреляции  $R = 0,65$ .

Линейное уравнение для зерен пшеницы из фракции 8 м/с:

$$\max VP = -2,08x + 293, \quad (12)$$

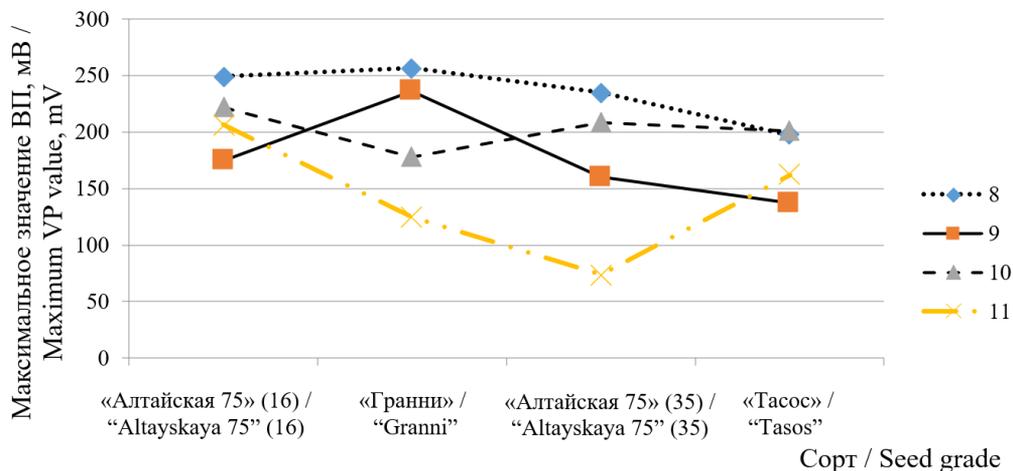
с коэффициентом линейной корреляции  $R = 0,85$ . Переменная  $x$  обозначает урожайность, а коэффициент при  $x$  имеет размерность мВ·га/ц.

**Обсуждение и заключение**

Предложена и апробирована схема включения зерна пшеницы в электрическую цепь с плоскими поверхностями электрода-зажима.

Изменения мембранного потенциала у зерен пшеницы идентичны изменениям мембранного потенциала у высших растений. По классификации ряда авторов подобные сигналы называют варибельным потенциалом.

Для исследования влияния сорта пшеницы, аэродинамических свойств зерен и урожайности на изменения варибельного потенциала были заданы четыре признака: уровень потенциала покоя; скорость нарастания варибельного потенциала на линейном участке; 10-процентное время нарастания варибельного потенциала от  $0,9 \cdot \max VP$  до  $\max VP$ ; макси-



Р и с. 11. Изменение максимального значения ВП в зависимости от сорта  
 F i g. 11. Changes in the maximum VP value depending on the wheat variety

мальное значение переменного потенциала –  $\max V_P$ .

Выполнены измерения и анализ мембранного потенциала на оболочках зерен пшеницы, разделенных на фракции по аэродинамическим свойствам, у четырех сортов с разной урожайностью и лабораторной всхожестью в полеуборочный период.

Экспериментальные исследования и теоретический анализ потенциала покоя показали, что зерна с высокой всхожестью представляют ритмические колебания с различной частотой и амплитудой. У зерен с низкой всхожестью уровень потенциала покоя лежит в узком диапазоне его изменений. Однако статистическое усреднение по группе зерен с одними и теми же аэродинамическими свойствами приводит к близкому результату ( $-5$  мВ) независимо от сорта. Следовательно, уровень потенциала покоя не может быть характерным отличительным признаком различия зерен пшеницы по аэродинамическим свойствам и урожайности.

В результате двухфакторного дисперсионного анализа была установлена сильная зависимость скорости нарастания сигнала, 10-процентного времени нарастания ВП и максимального значения ВП от сорта пшеницы и скорости сепарирования (аэродинамических свойств зерен).

Установлена линейная зависимость скорости нарастания ВП на линейном участке фазы деполяризации от урожайности для зерен из фракции 9 м/с. Коэффициент корреляции составил 0,74. С повышением урожайности скорость нарастания ВП на линейном участке фазы деполяризации незначительно падает. Тангенс угла наклона составляет всего  $-0,006$ . Для зерен из фракции 8 м/с линейная зависимость имеет коэффициент корреляции 0,71, тангенс угла наклона равен  $-0,016$ . Как видно из представленного результата, у зерен фракции 8 м/с с повышением урожайности скорость нарастания

ВП тоже падает, но в большей степени. Зерна из других фракций показали слабую корреляционную зависимость.

Скорость нарастания ВП характеризует проницаемость оболочек для ионов  $\text{Na}^+$ . Чем выше проницаемость, тем больше ионов  $\text{Na}^+$  и ниже урожайность. Незначительное изменение ВП от урожайности свидетельствует о равнозначных свойствах оболочек у зерен различных сортов. Значит, можно предположить, что зерна из фракции 9 м/с потенциально имеют высокие урожайные свойства по сравнению с другими фракциями. Исследователи тоже отмечают, что зерна пшеницы из фракций 8-9 м/с отличаются хорошими урожайными свойствами [12].

Результаты исследования 10-процентного времени нарастания ВП показали максимальную корреляцию с урожайными свойствами зерен пшеницы для всех сортов. С увеличением урожайности 10-процентное время нарастания увеличивается. Для зерен из фракции 9 м/с коэффициент линейной корреляции составил 0,98. Для зерен из фракции 8 м/с – 0,97. Зависимости отражены в линейных уравнениях (9) и (10). Увеличение 10-процентного времени нарастания ВП в фазе деполяризации характеризует уменьшение скорости проницаемости оболочек для ионов  $\text{Na}^+$ . Меньшую скорость изменения проницаемости имеют зерна с высокой урожайностью.

Наблюдается тенденция зависимости изменения максимального значения ВП от урожайности пшеницы. С повышением урожайности максимальное значение ВП уменьшается. Получены линейные уравнения (11) и (12) для зерен пшеницы из фракции 9 и 8 м/с с коэффициентами линейной корреляции  $R = 0,65$  и  $R = 0,85$  соответственно. Однако из экспериментальных результатов не следует вывод, что максимальное значение ВП полностью эквивалентно концентрации ионов  $\text{Na}^+$ , накопленных зерном. Дело в том, что при большой

скорости изменения проницаемости оболочки (малом 10-процентном времени нарастания ВП) происходит больший кратковременный выброс ионов  $\text{Na}^+$ , а при меньшей скорости – меньший, что и определяет максимальное значение ВП. Поэтому степень эквивалентности максимального значения ВП концентрации ионов  $\text{Na}^+$  требует дальнейшего уточнения.

При сопоставлении зависимости массы 1 000 зерен от аэродинамических свойств у сорта «Гранни» обнаружен аномальный эффект. При скорости сепарирования 9 м/с масса 1 000 зерен меньше, чем масса 1 000 зерен при скорости сепарирования 8 м/с. Аномальные свойства проявляются при исследовании

скорости нарастания ВП при скорости сепарирования 9 м/с (рис. 6) и при исследовании максимального значения ВП при той же скорости сепарирования 9 м/с (рис. 10). Уровень максимального значения ВП гораздо выше, чем у остальных сортов, что говорит о высокой концентрации ионов  $\text{Na}^+$ .

Предполагается продолжить исследования в данном направлении для семян пшеницы разных сортов, посевного качества и урожайных свойств. А также планируется апробация полученных результатов в полевых условиях и подтверждение возможности прогнозирования урожайности семян пшеницы по полученным информативным признакам.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Захарова, Н. Н.** Урожайные свойства семян яровой мягкой пшеницы / Н. Н. Захарова // Научно-методический электронный журнал Концепт. – 2013. – Т. 3. – С. 521–525. – URL: <http://e-koncept.ru/2013/53106.htm> (дата обращения: 15.10.2020). – Рез. англ.

2. **Барышева, Н. Н.** Метод определения всхожести семян пшеницы на основе мембранных потенциалов / Н. Н. Барышева, С. П. Пронин. – DOI [10.15507/2658-4123.029.201903.443-455](https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.443-455) // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 3. – С. 443–455. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/84-19-3/725-10-15507-0236-2910-029-201903-8> (дата обращения: 15.10.2020).

3. **Вдовина, Т. В.** Урожайные свойства семян яровой пшеницы в зависимости от основных приемов технологии выращивания / Т. В. Вдовина, П. В. Поползухин, Н. А. Поползухина // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В. Р. Филиппова. – 2008. – № 2 (11). – С. 54–59. – URL: [http://www.bgsha.ru/files/images/Vestnik/2008\\_2.pdf](http://www.bgsha.ru/files/images/Vestnik/2008_2.pdf) (дата обращения: 15.10.2020).

4. Интроскопический экспресс-контроль целостности внутренних структур зерновок при формировании производственных партий зерна, наиболее пригодных для длительного хранения / М. В. Архипов, Н. С. Прияткин, Л. П. Гусакова [и др.] // Селекция, семеноводство и генетика. – 2015. – № 2. – С. 53–54. – URL: <https://fsvps.gov.ru/fsvps-docs/ru/news/smi/select/select-2-2015.pdf> (дата обращения: 15.10.2020).

5. **Архипов, М. В.** Выявление скрытой дефектности семян зерновых культур методом микрофокусной рентгенографии / М. В. Архипов, Н. С. Прияткин, Л. П. Гусакова // Таврический вестник аграрной науки. – 2018. – № 3 (15). – С. 8–13. – URL: [http://tvan.niishk.ru/data/documents/1\\_3.pdf](http://tvan.niishk.ru/data/documents/1_3.pdf) (дата обращения: 15.10.2020). – Рез. англ.

6. **Белецкий, С. Л.** Современные принципы и технические средства сепарации семян / С. Л. Белецкий, Н. С. Прияткин, М. В. Архипов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2018. – № 3. – С. 89–97. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-printsipy-i-tehnicheskie-sredstva-separatsii-semyan> (дата обращения: 15.10.2020). – Рез. англ.

7. Measurement Techniques and Application of Electrical Properties for Nondestructive Quality Evaluation of Foods – A Review / S. N. Jha, K. Narsaiah, A. L. Basediya [et al.]. – DOI [10.1007/s13197-011-0263-x](https://doi.org/10.1007/s13197-011-0263-x) // Journal of Food Science and Technology. – 2011. – Vol. 48. – Pp. 387–411. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13197-011-0263-x> (дата обращения: 15.10.2020).

8. Изменение показателей качества зерна озимой ржи при его фракционировании / А. В. Пасынков, В. Л. Андреев, А. А. Завалин, Е. Н. Пасынкова // Достижения науки и техники АПК. – 2013. – № 9. – С. 36–40. – URL: <http://www.agroapk.ru/year-2013> (дата обращения: 15.10.2020). – Рез. англ.
9. Change in Quality Parameters of Hulled Oats Grain at Fractionation / E. N. Pasynkova, A. A. Zavalin, A. V. Pasyнков, N. V. Kotelnikova. – DOI 10.3103/S1068367418050142 // Russian Agricultural Sciences. – 2018. – Vol. 44. – Pp. 409–413. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103%2FS1068367418050142> (дата обращения: 15.10.2020).
10. Разработка методики настройки вибропневмосепаратора усовершенствованной конструкции при очистке пшеницы от трудноотделимых примесей / В. Д. Галкин, А. А. Хавыев, В. А. Хандриков [и др.] // Пермский аграрный вестник. – 2018. – № 1 (21). – С. 14–22. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-metodiki-nastroyki-vibro-pnevmo-separatora-usovershenstvovannoy-konstruktsii-pri-ochistke-pshenitsy-ot-trudnootdelimyyh> (дата обращения: 15.10.2020). – Рез. англ.
11. Подготовка высококачественных семян с использованием пневмосепараторов / А. И. Бурков, Г. А. Баталова, А. Л. Глушков, В. А. Ладыкин // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2017. – № 2 (57). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podgotovka-vysokokachestvennyh-semyan-s-ispolzovaniem-pnevmo-separatorov> (дата обращения: 15.10.2020). – Рез. англ.
12. Снижение травмирования зерна при послеуборочной обработке // Вестник аграрной науки Дона / А. П. Тарасенко, В. И. Оробинский, А. М. Гиевский [и др.] – 2019. – № 1. – С. 63–68. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/snizhenie-travmirovaniya-zerna-pri-posleuborochnoy-obrabotke/viewer> (дата обращения: 15.10.2020).
13. A Reliable Methodology for Determining Seed Viability by Using Hyperspectral Data from Two Sides of Wheat Seeds / T. Zhang, W. Wei, B. Zhao [et al.]. – DOI 10.3390/s18030813 // Sensors – 2018. – Vol. 18, Issue 3. – Pp. 813. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/3/813> (дата обращения: 15.10.2020).
14. **Anisur, R.** Assessment of Seed Quality Using Non-Destructive Measurement Techniques: A Review / R. Anisur, Ch. Byoung-Kwan. – DOI 10.1017/S0960258516000234 // Seed Science Research. – 2016. – Vol. 26, Issue 4. – Pp. 285–305. – URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/seed-science-research/article/assessment-of-seed-quality-using-nondestructive-measurement-techniques-a-review/CA4DAA31C7642A0BC38AD944448BCCC9> (дата обращения: 15.10.2020).
15. **Макрушин, Н. М.** Важнейшие принципы прогнозирования биологических свойств и отбора семян / Н. М. Макрушин, Е. М. Макрушина // Наукові праці Південного філіалу «Кримський агротехнологічний університет» Національного аграрного університету. – 2009. – Вып. 127. – С. 11–15. – URL: [http://www.cnsnb.ru/jour/j\\_as.asp?id=110996](http://www.cnsnb.ru/jour/j_as.asp?id=110996) (дата обращения: 15.10.2020).
16. Conditioning Shriveled Soybean Seed Part I. Variation in Physical Properties / J. H. Risse, M. K. Misra, A. D. Knapp, C. J. Bern. – DOI 10.13031/2013.31687 // Transactions of the ASAE. – 2013. – Vol. 34, Issue 2. – Pp. 481–486. – URL: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp??JID=3&AID=31687&CID=t1991&v=34&i=2&T=1> (дата обращения: 15.10.2020).
17. **Phenow, E. A.** Experimental Study of Parameters of Grain Milling Product Separation in Pneumatic Screw Classifier / E. A. Phenow, A. A. Mezenov, Y. Y. Gigoolo. – DOI 10.13005/bbra/2083 // Biosciences Biotechnology Research Asia. – 2016. – Vol. 13, Issue 2. – Pp. 669–680. – URL: <http://www.biotech-asia.org/vol13no2/experimental-study-of-parameters-of-grain-milling-product-separation-in-pneumatic-screw-classifier/> (дата обращения: 15.10.2020).
18. **Bettge, A. D.** Air-Aspirated Cleaning to Separate Sound from Preharvest-Sprouted Wheat / A. D. Bettge, Y. Pomeranz // Cereal Chemistry. – 1993. – Vol. 70, Issue 1. – Pp. 36–41. – URL: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US9416316> (дата обращения: 15.10.2020).
19. **Куценко, Ю. Н.** Обоснование структуры электрооборудования и системы автоматизированного управления установки сепарации зерновых культур / Ю. Н. Куценко // Вестник аграрной науки Дона. – 2014. – № 2 (26). – С. 15–19. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-struktury-elektrooborudovaniya-i-sistemy-avtomatizirovannogo-upravleniya-ustanovki-separatsii-zernovykh-kultur/viewer> (дата обращения: 15.10.2020).

20. **Orobinsky, V. I.** Seed Refinement in the Harvesting and Post-Harvesting Process / V. I. Orobinsky, A. M. Gievsky, I. V. Baskhakov. – DOI [10.2991/agrosmart-18.2018.163](https://doi.org/10.2991/agrosmart-18.2018.163) // International Scientific and Practical Conference “AgroSMART – Smart Solutions for Agriculture” (AgroSMART 2018) – 2018. – URL: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/agrosmart-18/55908808> (дата обращения: 15.10.2020).

21. **Мерченко, Н. Н.** Зависимость мембранного потенциала зерен пшеницы от концентрации ионов на внутренней стороне оболочки и ее проницаемости / Н. Н. Мерченко, С. П. Пронин // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8. – С. 1539–1544. – URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=35248> (дата обращения: 15.10.2020). – Рез. англ.

22. Распространение переменного потенциала, индуцированного ожогом семядольного листа проростка тыквы / В. А. Воденев, Р. В. Мамонов, С. С. Пятагин, В. А. Опритов // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2007. – № 2. – С. 122–126. – URL: <http://www.vestnik.unn.ru/nomera?anum=1643> (дата обращения: 15.10.2020). – Рез. англ.

23. **Воденев, В. А.** Электрические сигналы у высших растений: механизмы генерации и распространения / В. А. Воденев, Л. А. Катичева, В. С. Сухов // Биофизика. – 2016. – Т. 61, № 3. – С. 598–606. – Рез. англ.

24. **Pyatygin, S. S.** Signaling Role of Action Potential in Higher Plants / S. S. Pyatygin, V. A. Opritov, V. A. Vodenev. – DOI [10.1134/S1021443708020179](https://doi.org/10.1134/S1021443708020179) // Russian Journal of Plant Physiology. – 2008. – Vol. 55, Issue 2. – Pp. 285–291. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134%2F51021443708020179> (дата обращения: 15.10.2020).

25. **Hodgkin, A. L.** A Quantitative Description of Membrane Current and Its Application to Conduction and Excitation in Nerve / A. L. Hodgkin, A. F. Huxley. – DOI [10.1007/BF02459568](https://doi.org/10.1007/BF02459568) // Bulletin of Mathematical Biology. – 1990. – Vol. 52. – Pp. 25–71. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02459568> (дата обращения: 15.10.2020).

26. **Хлебова, Л. П.** Оценка возможности сокращения периода покоя семян зерновых культур в регулируемых условиях выращивания / Л. П. Хлебова, А. А. Арзуманян. – DOI [10.14258/abs.v1i1-2.780](https://doi.org/10.14258/abs.v1i1-2.780) // Acta Biologica Sibirica. – 2015. – № 1–2. – С. 22–37. – URL: <http://journal.asu.ru/index.php/biol/article/view/780> (дата обращения: 15.10.2020). – Рез. англ.

*Поступила 12.06.2020; принята к публикации 15.09.2020; опубликована онлайн 30.12.2020*

#### *Об авторах:*

**Барышева Надежда Николаевна**, доцент кафедры информационных систем в экономике ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (656038, Российская Федерация, г. Барнаул, пр-т Ленина, д. 46), кандидат технических наук, Researcher ID: C-9650-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1338-9740>, [mnp-t@mail.ru](mailto:mnp-t@mail.ru)

**Пронин Сергей Петрович**, профессор кафедры информационных технологий ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (656038, Российская Федерация, г. Барнаул, пр-т Ленина, д. 46), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5066-2609>, [sppronin@mail.ru](mailto:sppronin@mail.ru)

**Барышев Денис Дмитриевич**, старший преподаватель кафедры информационных систем в экономике ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (656038, Российская Федерация, г. Барнаул, пр-т Ленина, д. 46), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0112-6919>, [denis.baryshev@bk.ru](mailto:denis.baryshev@bk.ru)

**Беляев Владимир Иванович**, заведующий кафедрой сельскохозяйственной техники и технологий ФГБОУ ВО «Алтайский государственный аграрный университет» (656049, Российская Федерация, г. Барнаул, Красноармейский пр-т, д. 98), доктор технических наук, профессор, [prof-belyaev@yandex.ru](mailto:prof-belyaev@yandex.ru)

#### *Заявленный вклад соавторов:*

Н. Н. Барышева – обзор литературы, разработка методик, анализ результатов исследования, формулировка выводов, эксперименты, подготовка первоначального варианта статьи; С. П. Про-

нин – проведение теоретических исследований, формулировка основных концепций исследования, окончательное редактирование текста; Д. Д. Барышев – корректировка текста, исправление выводов; В. И. Беляев – окончательное редактирование текста.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Zakharova N.N. Yield Properties of Seeds of Spring Wheat. *Nauchno-metodicheskiy elektronnyy zhurnal Kontsept* = Scientific and Methodological Electronic Journal Concept. 2013; 3:521-525. Available at: <http://e-koncept.ru/2013/53106.htm> (accessed 15.10.2020). (In Russ.)
2. Barysheva N.N., Pronin S.P. Method of Determining Seed Germination by Using Membrane Potential of Wheat Seeds. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):443-455. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.443-455>
3. Vdovina T.V., Popolzukhin P.V., Popolzukhina N.A. [Yield Properties of Spring Wheat Seeds Depending on the Main Methods of Cultivation Technology]. *Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii im. V.R. Filippova* = Filippov Buryat State Agricultural Academy Bulletin. 2008; (2):54-59. Available at: [http://www.bgsha.ru/files/images/Vestnik/2008\\_2.pdf](http://www.bgsha.ru/files/images/Vestnik/2008_2.pdf) (accessed 15.10.2020). (In Russ.)
4. Arkhipov M.V., Priyatkin N.S., Gusakova L.P., et al. [Introsopic Express Control of the Integrity of Internal Grain Structures during the Formation of Production Lots of Grain, Most Suitable for Long-Term Storage]. *Selektsiya, semenovodstvo i genetika* = Breeding, Seed and Genetics. 2015; (2):53-54. Available at: <https://fsvps.gov.ru/fsvps-docs/ru/news/smi/select/select-2-2015.pdf> (accessed 15.10.2020). (In Russ.)
5. Arkhipov M.V., Priyatkin N.S., Gusakova L.P. Detection of Hidden Defects in the Seeds of Grain Crops by the Method of Microfocus X-RAY. *Tavricheskiy vestnik agrarnoy nauki* = Tavrida Bulletin of the Agrarian Sciences. 2018; (3):8-13. Available at: [http://tvann.iishk.ru/data/documents/1\\_3.pdf](http://tvann.iishk.ru/data/documents/1_3.pdf) (accessed 15.10.2020). (In Russ.)
6. Beletskiy S.L., Priyatkin N.S., Arkhipov M.V. Novel Principles and Technical Solutions of Seeds Sorting. *Khranenie i pererabotka selkhozsyirya* = Storage and Processing of Farm Products. 2018; (3):89-97. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-printsipy-i-tehnicheskie-sredstva-separatsii-semyan> (accessed 15.10.2020). (In Russ.)
7. Jha S.N., Narsaiah K., Basediya A.L., et al. Measurement Techniques and Application of Electrical Properties for Nondestructive Quality Evaluation of Foods – A Review. *Journal of Food Science and Technology*. 2011; 48:387-411. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0263-x>
8. Pasyнков A.V., Andreev V.L., Zavalin A.A., et al. Changes in the Parameters of Winter Rye Quality after Grain Fractionation. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AIC. 2013; (9):36-40. Available at: <http://www.agroapk.ru/year-2013> (accessed 15.10.2020). (In Russ.)
9. Pasynkova E.N., Zavalin A.A., Pasyнков A.V., et al. Change in Quality Parameters of Hulled Oats Grain at Fractionation. *Russian Agricultural Sciences*. 2018; 44:409-413. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068367418050142>
10. Galkin V.D., Khavyev A.A., Khandrikov V.A., et al. Development of Adjustment Method for Vibro-Pneumatic Separator with an Improved Design by the Wheat Purification from Hard-Separable Impurities. *Permskiy agrarnyy vestnik* = Perm Agrarian Journal. 2018; (1):14-22. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-metodiki-nastroyki-vibropnevmostparatora-usovershenstvovannoy-konstruksii-pri-ochistke-pshenitsy-ot-trudnootdelimyh> (accessed 15.10.2020). (In Russ.)
11. Burkov A.I., Batalova G.A., Glushkov A.L., et al. Preparation of High Quality Seeds Using a Pneumatic Separator. *Agrarnaya nauka Yevro-Severo-Vostoka* = Agrarian Science of Euro-North-East. 2017; (2). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/podgotovka-vysokokachestvennyh-semyan-s-ispolzovaniem-pnevmostparatorov> (accessed 15.10.2020). (In Russ.)
12. Tarasenko A.P., Orobinskiy V.I., Gievskiy A.M., et al. [Reducing Injury to Grain During Post-Harvest Processing]. *Vestnik agrarnoy nauki Dona* = Don Agrarian Science Bulletin. 2019; (1):63-68. Avail-

lable at: <https://cyberleninka.ru/article/n/snizhenie-travmirovaniya-zerna-pri-posleuborochnoy-obrabotke/viewer> (accessed 15.10.2020). (In Russ.)

13. Zhang T., Wei W., Zhao B., et al. A Reliable Methodology for Determining Seed Viability by Using Hyperspectral Data from Two Sides of Wheat Seeds. *Sensors*. 2018; 18(3):813. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/s18030813>

14. Anisur R., Byoung-Kwan Ch. Assessment of Seed Quality Using Non-Destructive Measurement Techniques: A Review. *Seed Science Research*. 2016; 26(4):285-305. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1017/S0960258516000234>

15. Makrushin N.M., Makrushina Ye.M. [The Most Important Principles of Biological Properties Prediction and Seed Selection]. *Naukovi pratsi Pivdenного filialu "Krimskiy agrotekhnologichniy universitet" Natsionalnoy agrarnogo universitetu* = Scientific Works of the Southern Branch Crimean Agrotechnological University of National Agrarian University. 2009; 127:11-15. Available at: [http://www.cnsnb.ru/jour/j\\_as.asp?id=110996](http://www.cnsnb.ru/jour/j_as.asp?id=110996) (accessed 15.10.2020). (In Russ.)

16. Risse J.H., Misra M.K., Knapp A.D., et al. Conditioning Shriveled Soybean Seed Part I. Variation in Physical Properties. *Transactions of the ASAE*. 2013; 34(2):481-486. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.31687>

17. Phenow E.A., Mezenov A.A., Gigoolo Y.Y. Experimental Study of Parameters of Grain Milling Product Separation in Pneumatic Screw Classifier. *Biosciences Biotechnology Research Asia*. 2016; 13(2):669-680. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.13005/bbra/2083>

18. Bettge A.D., Pomeranz Y. Air-Aspirated Cleaning to Separate Sound from Preharvest-Sprouted Wheat. *Cereal Chemistry*. 1993; 70(1):36-41. Available at: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US9416316> (accessed 15.10.2020). (In Eng.)

19. Kutsenko Yu.N. [Justification of Electric Equipment Structure and Automated Control System of Grain Separation Plant]. *Vestnik agrarnoy nauki Dona* = Don Agrarian Science Bulletin. 2014; (2):15-19. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-struktury-elektrooborudovaniya-i-sistemy-avtomatizirovannogo-upravleniya-ustanovki-separatsii-zernovyh-kultur/viewer> (accessed 15.10.2020). (In Eng.)

20. Orobinsky V.I., Gievsky A.M., Baskhakov I.V. Seed Refinement in the Harvesting and Post-Harvesting Process. In: International Scientific and Practical Conference "AgroSMART – Smart Solutions for Agriculture" (AgroSMART 2018). 2018. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2991/agrosmart-18.2018.163>

21. Merchenko N.N., Pronin S.P. Dependence of Membrane Potential of Wheat Seeds on Ions Concentration on the Cover Inside and Its Permeability. *Fundamentalnye issledovaniya* = Fundamental Research. 2014; (8):1539-1544. Available at: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=35248> (accessed 15.10.2020). (In Russ.)

22. Vodeneev V.A., Mamonov R.V., Pyatygin S.S., et al. [Spread of Variability Potential Induced by a Burned Seed Gourd Leaf]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo* = Lobachevsky Nizhny Novgorod University Bulletin. 2007; (2):122-126. Available at: <http://www.vestnik.unn.ru/numera?anum=1643> (accessed 15.10.2020). (In Russ.)

23. Vodeneev V.A., Katicheva L.A., Sukhov V.S. Electrical Signals in Higher Plants: Mechanisms of Generation and Propagation. *Biofizika* = Biophysics. 2016; 61(3):598-606. (In Russ.)

24. Pyatygin S.S., Opritov V.A., Vodeneev V. A. Signaling Role of Action Potential in Higher Plants. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2008; 55(2):285-291. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S1021443708020179>

25. Hodgkin A.L., Huxley A.F. A Quantitative Description of Membrane Current and Its Application to Conduction and Excitation in Nerve. *Bulletin of Mathematical Biology*. 1990; 52:25-71. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02459568>

26. Khlebova L.P., Arzumanyan A.A. Studying the Possibility of Reducing the Period of Seed Dormancy in Crops under Controlled Growth Conditions. *Acta Biologica Sibirica*. 2015; (1-2):22-37. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.14258/abs.v1i1-2.780>

Received 12.06.2020; revised 15.09.2020; published online 30.12.2020

*About the authors:*

**Nadezhda N. Barysheva**, Associate Professor of Chair of Information Systems in Economy, Polzunov Altai State Technical University (46 Prospekt Lenina, Barnaul 656038, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: C-9650-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1338-9740>, [mnn-t@mail.ru](mailto:mnn-t@mail.ru)

**Sergey P. Pronin**, Professor of Chair of Information Technology, Polzunov Altai State Technical University (46 Prospekt Lenina, Barnaul 656038, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5066-2609>, [spronin@mail.ru](mailto:spronin@mail.ru)

**Denis D. Baryshev**, Senior Lecturer of Chair of Information Systems in Economy, Polzunov Altai State Technical University (46 Prospekt Lenina, Barnaul 656038, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0112-6919>, [denis.baryshev@bk.ru](mailto:denis.baryshev@bk.ru)

**Vladimir I. Belyaev**, Head of Chair of Agricultural Machinery and Technology, Altai State Agricultural University (98 Krasnoarmeyskiy Prospekt, Barnaul 656049, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Professor, [prof-belyaev@yandex.ru](mailto:prof-belyaev@yandex.ru)

*Contribution of the authors:*

N. N. Barysheva – review of literature, development of methodology, analysis of research results, formulation of conclusions, experiments, preparation of the initial version of the article; S. P. Pronin – theoretical research, formulation of the main research concepts, final text editing; D. D. Baryshev – text correction, correction of conclusions; V. I. Belyaev – final text editing.

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

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

УДК 621.4:620.22-022.532

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202004.576-593

Оригинальная статья



## Оптимизация режимов механоактивации сухосмешанных порошков СВМПЭ и наномодификаторов в планетарно-шаровой мельнице Pulverisette 7

**В. Н. Водяков, К. А. Куликовская\***  
ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва»  
(г. Саранск, Российская Федерация)  
\*[anata.kulikovskaya@gmail.com](mailto:anata.kulikovskaya@gmail.com)

*Введение.* В настоящее время в различных областях техники бронза, чугун и другие металлы антифрикционного назначения заменяются полимерными композитами, обеспечивающими существенно больший ресурс трибосопряжений. Перспективным антифрикционным полимером является сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Работа посвящена определению оптимальных удельных энергозатрат на механоактивацию сухосмешанных порошков данного полимера и наномодификаторов в планетарно-шаровой мельнице Pulverisette 7, обеспечивающих достижение лучшего комплекса физико-механических и реологических свойств нанокомпозитов.

*Материалы и методы.* В работе использованы сверхвысокомолекулярный полиэтилен марки ГУР 4120 Ticona с молекулярной массой 5 млн г/моль, концентрат Tuball Matrix Beta активированных углеродных нанотрубок в концентрации 0,1 % в пересчете на углеродные нанотрубки и гидрофобный нанокристаллический диоксид кремния с дисперсностью 20 нм в такой же концентрации. Совместная механоактивация порошков полимера и наномодификаторов с варьированием удельных энергозатрат проводилась в планетарно-шаровой мельнице Pulverisette 7. Изготовление пленок из порошков для исследования упруго-прочностных и реологических характеристик нанокомпозитов проводилось на гидравлическом прессе Gibitре. Испытания проведены на разрывной машине UAI-7000 М и реометре Нааке MARS III соответственно.

*Результаты исследования.* Установлено, что при удельных энергозатратах на механоактивацию 3 000–3 200 Дж/г достигается лучший комплекс физико-механических и реологических свойств нанокомпозитов, что позволяет считать их оптимальными. Механоактивация порошка сверхвысокомолекулярного полиэтилена при незначительном снижении модуля упругости и предела прочности термпрессованных образцов не оказывает влияния на динамическую вязкость расплавов при энергозатратах 650–4 550 Дж/г.

*Обсуждение и заключение.* Введение углеродных нанотрубок и нанокристаллического диоксида кремния в концентрации 0,1 % позволяет значительно улучшить физико-механические и реологические свойства полимера в планетарно-шаровых

© Водяков В. Н., Куликовская К. А., 2020



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

мельницах при энергозатратах 3 000–3 200 Дж/г на механоактивацию. Более эффективным модификатором является нанокристаллический диоксид кремния, что объясняется его лучшим диспергированием в полимерной матрице из-за меньшей склонности наночастиц к агломерации.

**Ключевые слова:** сверхвысокомолекулярный полиэтилен, углеродные нанотрубки, нанокристаллический диоксид кремния, наноккомпозит, механоактивация, планетарно-шаровая мельница, удельные энергозатраты, физико-механические характеристики, реологические характеристики

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

**Для цитирования:** Водяков, В. Н. Оптимизация режимов механоактивации сухосмешанных порошков СВМПЭ и наномодификаторов в планетарно-шаровой мельнице Pulverisette 7 / В. Н. Водяков, К. А. Куликовская. – DOI [10.15507/2658-4123.030.202004.576-593](https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.576-593) // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 576–593.

*Original article*

## Optimization of Mechanical Activation Modes for UHMWPE Dry Mixed Powders and Nanomodifiers in the Planetary Ball Mill Pulverisette 7

V. N. Vodyakov, K. A. Kulikovskaya\*

*National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)*

\**anata.kulikovckaya@gmail.com*

**Introduction.** Currently, in various technology areas, bronze, cast iron and other antifriction metals are replaced by polymer composites, which extend significantly service life of tribocoupling. An advanced antifriction polymer is ultra-high-molecular-weight polyethylene. The study deals with determining the optimal specific energy consumption for the mechanical activation of the polymer dry mixed powders and nanomodifiers in the planetary ball mill Pulverisette 7, which ensure the best complex of physico-mechanical and rheological properties of nanocomposites.

**Materials and Methods.** In this work, we used GUR 4120 Ticona ultra-high-molecular-weight polyethylene with a molecular weight of 5 million, a Tuball Matrix Beta concentrate of activated carbon nanotubes at a concentration of 0.1%, calculated with reference to carbon nanotubes, and hydrophobic nanocrystalline silicon dioxide with a dispersion of 20 nm at the same concentration. Mechanical co-activation of polymer powders and nanomodifiers, when varying the specific energy consumption, was carried out in the planetary ball mill Pulverisette 7. The production of films from powders, for studying the elastic-strength and rheological characteristics of nanocomposites, was carried out with the use of the hydraulic press Gibitre. Tests were carried out respectively on the tensile testing machine UAI-7000 M and the rheometer Haake MARS III.

**Results.** It has been established that the best physico-mechanical and rheological properties of nanocomposites are with specific energy consumption for mechanical activation of 3,000–3,200 J/g that allows us to consider them optimal. The mechanical activation of ultra-high molecular weight polyethylene powder, reducing slightly the elasticity modulus and tensile strength of thermally pressed samples, does not affect the dynamic viscosity of melts at an energy consumption of 650–4,550 J/g.

**Discussion and Conclusion.** The use of carbon nanotubes and nanocrystalline silicon dioxide at a concentration of 0.1% can significantly improve the physical-mechanical and rheological properties of the polymer with energy costs of 3,000–3,200 J/g for mechanical activation in planetary ball mills. Nanocrystalline silicon dioxide is a more effective modifier that can be explained by its better dispersion in the polymer matrix due to the lower tendency of nanoparticles to agglomerate.

**Keywords:** ultra-high-molecular-weight polyethylene, carbon nanotubes, nanocrystalline silicon dioxide, nanocomposite, mechanical activation, planetary ball mill, specific energy consumption, physico-mechanical characteristics, rheological characteristics

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

*For citation:* Vodyakov V.N., Kulikovskaya K.A. Optimization of Mechanical Activation Modes for UHMWPE Dry Mixed Powders and Nanomodifiers in the Planetary Ball Mill Pulverisette 7. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(4):576-593. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.576-593>

## Введение

В настоящее время в различных областях техники бронза, чугун и другие металлы антифрикционного назначения заменяются полимерными композитами, обеспечивающими существенно больший ресурс трибосопряжений<sup>1</sup> [1]. Актуальность задачи повышения их ресурса обусловлена тем, что выход из строя даже одного из многочисленных узлов трения вызывает остановку машины и, как следствие, технологической системы, что приводит к значительным экономическим потерям.

«Перспективным антифрикционным полимером является сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ). Он обладает высокой ударной вязкостью, влаго- и маслостойкостью, низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью. К недостаткам следует отнести хладотекучесть и относительно невысокие значения упруго-прочностных характеристик, что ограничивает его применение в высоконагруженных узлах трибосопряжений» [1].

«Одним из резервов повышения качества полимерных материалов является применение нанотехнологических подходов» [2]. Применительно к проблеме упрочнения СВМПЭ приоритетным направлением является его модификация нанодисперсными частицами, которые по размеру значительно меньше частиц полимера. В связи с трудоемкостью равномерного диспергирования наноразмерных порошков в высоковязком полимерном объеме из-за сильной тенденции к агрегации смешение их с порошком СВМПЭ проводят, как правило, в планетарно-шаровых мельницах [2–4].

Основной задачей проводимых в настоящее время многочисленных исследований является подбор наиболее эффективных модификаторов, их оптимального содержания в нанокompозитах СВМПЭ, а также оптимальных режимов совместной обработки СВМПЭ и наномодификаторов в планетарно-шаровых мельницах.

Целью настоящей работы является определение оптимальных удельных энергозатрат на механоактивацию сухосмешанных порошков СВМПЭ и наномодификаторов в планетарно-шаровой мельнице Pulverisette 7, обеспечивающих достижение лучшего комплекса физико-механических и реологических характеристик нанокompозитов СВМПЭ.

## Обзор литературы

Проведены детальные исследования структуры исходного и механоактивированного в планетарной шаровой мельнице MP/0,5×4 порошка СВМПЭ (фирма Ticona, молекулярная масса 2–7 млн г/моль) с использованием электронного микроскопа, рентгеновского дифрактометра XRD-6000 и ИК-спектрометра [4]. Установлено, что «механоактивация приводит к изменению формы и увеличению эффективной поверхности частиц связующего, разрыву и последующей сшивке углеводородных цепей С–О группами; имеет место уменьшение размера кристаллитов и, соответственно, изменение характера укладки углеводородных цепей в полимере (от частично фибриллярного к ламеллярному); наблюдается измельчение и более плотная упаковка структурных элементов полимера, что способствует повышению его триботехнических и деформационно-прочностных харак-

<sup>1</sup> Машков Ю. К. Трибофизика металлов и полимеров: монография. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. 240 с.

теристик (износостойкость, плотность, модуль упругости, предел текучести, твердость), в частности, росту износостойкости в 4 раза; оптимальное время активации исходных порошков СВМПЭ составляет 20 мин (при более длительной активации перечисленные характеристики не улучшаются)» [4].

Изучены изменения СВМПЭ, происходящие в результате обработки в атриторной мельнице в течение 8 часов при варьировании скорости вращения в диапазоне 200–600 об/мин [5]. Установлено, что при увеличении скорости вращения происходит морфологическое изменение структуры СВМПЭ.

Исследовано механическое измельчение порошка СВМПЭ в различных планетарно-шаровых мельницах [6]. Обработка выполнялась в мельнице SPEX CertiPrep в течение 1, 4, 8 и 16 часов; в мельнице Pulverisette 6 – при скорости вращения 400 об/мин в течение 1, 2, 4, 8, 16 и 24 часов; в атриторной мельнице 01-HD (Union Process) – при скорости вращения 500 об/мин в течение 5, 8, 10 и 15 часов. Установлено, что интенсивность структурных изменений в СВМПЭ зависит от интенсивности напряжений сдвига и длительности обработки. Более значимые фазовые превращения достигнуты в атриторной мельнице.

Изучено влияние многостенных углеродных нанотрубок «Таунит» (МУНТ) в концентрации 2 % на структуру нанокомпозитов СВМПЭ [7]. Изготовление образцов осуществлялось совместной обработкой порошков СВМПЭ и МУНТ в мельнице АПФ-3 с последующим их термопрессованием. Использован следующий режим работы: частота вращения 400 об/мин, время обработки 3 мин, пауза 3 мин. Установлено, что такая обработка распределяет МУНТ только по поверхности частиц полимера и распределение не является однородным из-за агломерации наночастиц.

Для сравнительной оценки вклада углеродных нановолокон (УНВ) и углеродных нанотрубок УНТ исследованы механические и триботехнические характеристики нанокомпозитов СВМПЭ и полиэфирэфиркетона (ПЭЭК). «Перемешивание порошков СВМПЭ, ПЭЭК и наполнителей в концентрациях 1 масс. % проводилось в мельнице МР/0,5×4 с предварительным диспергированием взвеси компонентов в этиловом спирте в ультразвуковой ванне. Установлено, что износостойкость композитов возрастает в 2 раза при сухом трении скольжения» [8].

В другом исследовании МУНТ в концентрациях 0,3, 0,5, 0,7 и 1,0 масс. % встраивали в матрицу СВМПЭ обработкой в высокоэнергетической мельнице Fritsch Mini Mill II в течение 5 мин с частотой вращения 250 об/мин [9]. Данный цикл повторялся по 25 раз для каждого состава. Установлено, что при концентрации МУНТ 1 % имеет место рост модуля упругости, предела текучести композита при снижении относительного удлинения и предела прочности при растяжении.

Исследовано влияние порошка  $\text{SiO}_2$  с размером частиц 5 мкм на механические свойства и износостойкость композитов СВМПЭ при сухом трении скольжения [10]. Установлено, что максимальные значения износостойкости и физико-механических характеристик достигаются в диапазоне концентраций 0,5–1 масс. %. При больших значениях влияние на механические свойства и износостойкость снижалось.

В исследованиях С. В. Панина и коллег совмещение СВМПЭ и наночастиц в мельнице МР/0,5×4 «проводилось с предварительным диспергированием в ультразвуковой ванне взвеси компонентов в этиловом спирте» [11; 12]. Установлено, что твердосмазочные микро- и нанокомпозиты имеют более высокую износостойкость, чем исходный СВМПЭ, что обусловлено

формированием микронаполнителями (дисульфид молибдена, графит, стеарат кальция, политетрафторэтилен) и нанонаполнителями (УНТ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{AlO}(\text{OH})$ ) пленки переноса на контртеле.

Установлено, что «зависимость коэффициентов трения и износа композита на основе СВМПЭ, наполненного  $\text{TiO}_2$ , имеет вид кривой с минимумом при содержании модификатора 3 масс. %» [13]. При указанной величине наполнения достигается восьми-девятикратное снижение износа и коэффициента трения. Введение модификатора в СВМПЭ осуществлялось в реакционной плазмохимической камере дугового разряда низкого давления в рамках единого технологического процесса.

Исследованы трибологические свойства полученных методом полимеризации *in situ* нанокompозитов СВМПЭ с монтмориллонитом, нанопластинами графита, дисульфидом молибдена и шунгитом [14]. Установлено, что при концентрациях 0,4–7 масс. % модификаторы повышают в 2–3 раза износостойкость при трении скольжения по стали.

В другой работе процесс смешения МУНТ с СВМПЭ проводился в мельнице АПФ-3 в течение 45 мин при скорости вращения 450 об/мин [15]. Для изготовления смеси использованы чистые и фторированные МУНТ в концентрации 0,1, 0,5 и 1 масс. %. Итоговым результатом явилось увеличение прочности СВМПЭ при растяжении с 21 до 132 МПа, причем преобладающим фактором упрочнения явилась ориентация полимерных цепей при заметном влиянии фторированных МУНТ.

Представлено покрытие из СВМПЭ, усиленное глиноземом с содержанием 0,5, 3, 5 и 10 масс. % [16]. Установлено, что покрытия, содержащие 3–5 масс. % глинозема, имеют значительно более высокую износостойкость по отношению к покрытию из СВМПЭ. Изготовление композита проводилось сочетанием ультразвукового воздей-

ствия и перемешивания в магнитной мешалке.

Описана композиция СВМПЭ и наноразмерного углеродного порошка УМ-76, полученная диспергированием в течение 1 ч в турбулентном смесителе-диспергаторе со скоростью 20 000 об/мин в горячем жидком стекле с добавкой поверхностно-активного вещества [17]. Установлено снижение механических свойств композита при повышении содержания углеродного наполнителя сверх оптимального значения.

Для улучшения свойств СВМПЭ группой ученых использован оксид графена (ГО) с последующим упрочнением композита обработкой гамма-лучами [18]. Образцы композитов с различной дозировкой ГО (0,1, 0,5 и 1,0 масс. %) получены смешением ГО в спиртовом растворе в течение 3 минут с ультразвуковой обработкой. Затем суспензия смешивалась с порошком СВМПЭ при обработке ультразвуком в течение 1 часа. После удаления спирта полученные продукты измельчали в мельнице с последующим термopрессованием образцов. Установлено улучшение механических свойств нанокompозитов.

В другой работе порошок СВМПЭ совмещался с различным количеством УНТ в шаровой мельнице в течение 2 часов при частоте вращения барабана 200 об/мин, после чего порошки подвергали горячему прессованию [19]. Установлено, что УНТ в количестве до 1,5 масс. % улучшает трибологические свойства. При росте концентрации происходило ухудшение данных свойств.

Сравнение эффективности мельниц АГО-2 и Активатор-2SL при активации порошка титана марки ПТОМ-2 показало, что «введение сопоставимых значений энергии в порошок титана разными мельницами приводит к схожим результатам по качеству объемного распределения частиц» [20].

Ю. А. Веригиным и соавторами разработана математическая модель и определены условия оптимизации процесса помола микрочастиц в шаровых мельницах. Установлено, что «предлагаемая математическая модель позволяет управлять процессом измельчения различных материалов и переносить результаты на шаровые мельницы любых конструкций» [21].

В результате энергетического анализа механоактивации порошковых смесей в мельнице АГО-3 сформулированы следующие важные предположения: «максимальная энергонапряженность мелющих тел на холостом ходу достигается в интервале 30–45 % объема заполнения; большая часть механической энергии двигателя передается водилу и планетарным реакторам от 65 до 70 %, но наблюдается степенной рост ( $n \sim 2$ ) передаваемой энергии при увеличении частоты вращения; удельная энергонапряженность мельницы растет пропорционально кубической степени свободного объема реактора» [22].

Изложены представления о поведении мелющих тел в планетарной шаровой мельнице Pulverisette 7 [23]. Авторы работы отмечают, что разработанная математическая модель, описывающая энергетические характеристики мельницы, является ориентировочной, однако может быть успешно использована при проведении экспериментальных работ, позволяя оценивать величину подводимой к обрабатываемому материалу энергии.

Различными физическими методами исследованы продукты механоактивации порошковой смеси СВМПЭ и карбида бора, которая провела в мельнице с энергонапряженностью 1,1 Вт/г от 5 до 25 мин [24]. Показано, что в этих условиях при отсутствии окислительной деструкции полимера формируются полимерные частицы чешуйчатой формы размером 100–160 мкм с хаотичным распределением в них

наночастиц размером 1–5 мкм. Авторы отмечают, что основными возможными результатами взаимодействия порошков СВМПЭ и наполнителя являются процессы сшивки при некотором вероятном уменьшении молекулярной массы полимера.

Таким образом, из рассмотренных работ следует, что при создании нанокompозитов СВМПЭ наиболее часто для совмещения порошков СВМПЭ и наномодификаторов (УНТ, МУНТ, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> и др.) используют их совместную обработку (механоактивацию) в планетарно-шаровых мельницах. В большинстве работ отмечено позитивное влияние наномодификаторов в диапазоне концентраций 0,1–1 масс. % на упруго-прочностные и трибологические характеристики нанокompозитов. В ряде работ отмечается значительный разброс экспериментальных значений упруго-прочностных и трибологических характеристик. Причинами являются некачественное распределение и диспергирование наночастиц в объеме полимера из-за их склонности к агломерации. При этом практически отсутствуют публикации, посвященные исследованию влияния механоактивации на реологические свойства полученных нанокompозитов СВМПЭ.

В качестве технологических параметров, характеризующих интенсивность обработки, принимают частоту вращения барабанов, длительность обработки и температуру механоактивации. Очевидно, что в зависимости от конструкции мельницы при одних и тех же параметрах может достигаться различная интенсивность обработки порошков и, следовательно, различный уровень эксплуатационных и технологических характеристик нанокompозитов СВМПЭ.

Объективной характеристикой энергонапряженности процесса, однозначно определяющей достигнутый уровень значений физико-механических, реологических и трибологических ха-

рактических нанокompозитов, может служить показатель удельных энергозатрат на механоактивацию порошков СВМПЭ и наномодификаторов в планетарно-шаровых мельницах.

### Материалы и методы

В настоящем исследовании использованы СВМПЭ марки ГУР 4120 Ticona с молекулярной массой 5 млн г/моль и размером частиц 120–150 мкм, концентрат Tuball Matrix Beta активированных углеродных нанотрубок (УНТ) и гидрофобный нанокристаллический диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ) дисперсностью 20 нм. Концентрации наночастиц, вводимых в СВМПЭ, были приняты в соответствии с работами ряда ученых и составили 0,1 %<sup>2</sup> [25].

Механоактивация СВМПЭ и сухосмешанных порошков СВМПЭ и модификаторов проводилась в планетарной мельнице Pulverisette 7 (Premium Line), снабженной системой дистанционного (компьютерного) мониторинга давления газов и температуры в размольных стаканах.

Был принят следующий режим работы, исключающий перегрев полимера: «обработка порошка с реверсированием вращения карусели и стаканов, частота вращения водила 1 000 об/мин, время обработки 15 мин, время покоя 15 мин, количество циклов 1–7. Масса загружаемых в каждый контейнер стальных шаров диаметром 3 мм составляла 150 г, порошков СВМПЭ и модификаторов – 20 г» [26].

Исходя из уравнений, полученных ранее, и принятого режима работы, выведена следующая формула для расчета удельной энергии (Дж/г) механоактивации смеси порошков СВМПЭ и модификаторов в мельнице [23]:

$$U_{\text{уд}} = 7,215 \cdot 10^{-10} f^3 t, \quad (1)$$

где  $f$  – частота вращения водила и контейнеров мельницы, об/мин;  $t$  – полная длительность механоактивации смеси порошков без учета времени покоя, с.

Энергонапряженность процесса ( $W_{\text{уд}} = U_{\text{уд}} / t$ ) составляла 0,72 Вт/г, что согласуется с результатами предыдущих исследований [24]. Максимальная температура порошков в мельнице в течение времени обработки не превышала 90 °С, величина давления соответствовала атмосферному.

Из полученных порошков для каждого состава и режима механоактивации, в соответствии с ранее разработанной методикой, способом термопрессования получались пластины, из которых штанцами вырубали по 5 лопаток (тип 1) для испытаний по ГОСТу 11262-2017 и дисков диаметром 20 мм для динамических испытаний на реометре HAAKE MARS III<sup>3</sup> [26; 27].

«Физико-механические испытания проведены на разрывной машине UAI-7000 М при температуре  $23 \pm 2$  °С и скорости растяжения 10 мм/мин. Истинные значения напряжений (МПа) вычисляли по формуле:

$$\sigma = lF / (l_0 A_0), \quad (1)$$

где  $l$  и  $l_0 = 25$  – значения текущей и рабочей длин образца, мм;  $A_0$  – начальная площадь сечения, мм<sup>2</sup>;  $F$  – текущее значение усилия растяжения, Н.

Деформация растяжения вычислялась в мере Генки по формуле:

$$\varepsilon_{\text{H}} = \ln(l / l_0). \quad (2)$$

Значения начального  $E_{\text{н}}$  и конечного  $E_{\text{к}}$  модулей упругости (МПа) определяли как тангенсы угла наклона касательных соответственно к начальному и конечному прямолинейным участкам

<sup>2</sup> Танкова К. И., Ананьева Е. С. Исследование влияния модификации связующего углеродными нанотрубками на свойства однонаправленных образцов // Труды XIV Международной научной школы-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение» / под ред. В. Б. Маркина. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2017. С. 154–158.

<sup>3</sup> ГОСТ 11262-2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение.

кривых  $\sigma = f(\varepsilon_H)$ . Значения пределов вынужденной эластичности и предела прочности принимали равными соответственно условному пределу текучести (ГОСТ 11262-2017) и максимальному значению достигнутого напряжения» [26].

Динамические испытания проведены при амплитуде колебаний рифленого ротора 0,001 рад, угловых скоростях 0–800 с<sup>-1</sup> и температурах 150–180 °С. Использование принципа температурно-временной суперпозиции позволило расширить диапазон скоростей до четырех десятичных порядков.

### Результаты исследования

На рисунке 1 представлен типичный вид кривых растяжения стандартных образцов, сформированных из СВМПЭ и нанокompозитов СВМПЭ при величине удельных энергозатрат на механоактивацию 3 200 Дж/г.

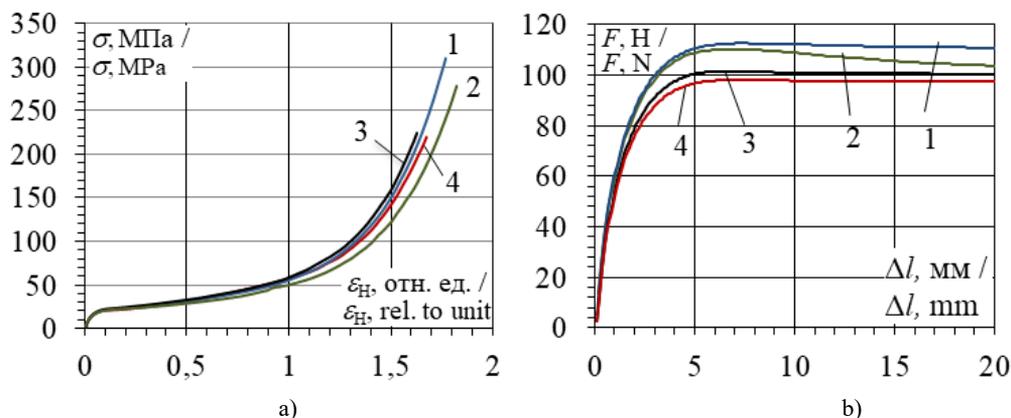
Из графиков видно, что наличие модификатора значительно повышает пределы прочности (рис. 1а) и текучести (рис. 1б) механоактивированного СВМПЭ из-за образования «поперечно сшитых структур» [24].

На рисунке 2 представлены полученные зависимости физико-механических характеристик образцов пластин СВМПЭ и нанокompозита СВМПЭ + 0,1 % УНТ от удельных энергозатрат на механоактивацию порошков.

Как следует из графиков, механоактивация порошка СВМПЭ приводит с ростом удельных энергозатрат от 650 до 4 550 Дж/г к незначительному (в пределах 3–5 %) снижению прочности и конечного модуля упругости полимера, что согласуется с результатами другой работы [4].

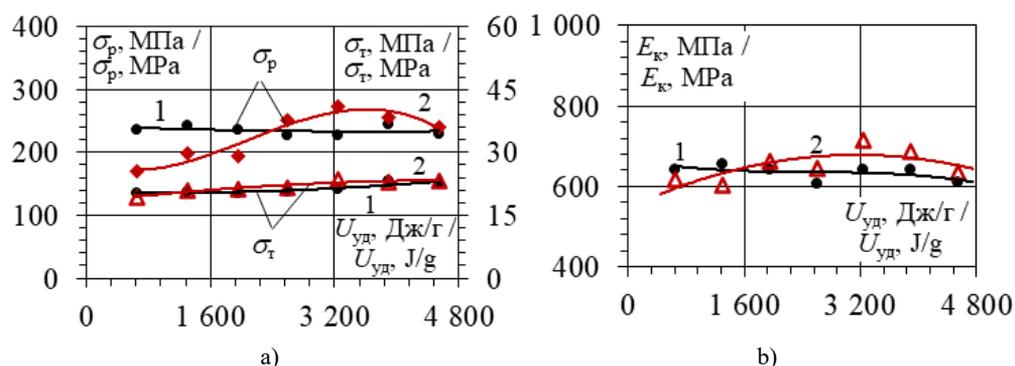
В отличие от СВМПЭ весь комплекс упруго-прочностных характеристик образцов нанокompозита СВМПЭ + 0,1 % УНТ заметным образом зависит от величины удельных энергозатрат на совместную обработку сухосмешанных порошков в планетарно-шаровой мельнице.

При малых (600–2 000 Дж/г) значениях энергозатрат упруго-прочностные характеристики СВМПЭ заметно превосходят характеристики нанокompозита, что можно объяснить неудовлетворительным качеством дисперги-



Р и с. 1. Типичные кривые растяжения образцов СВМПЭ и нанокompозитов на его основе (а) и их поведение в области предела текучести (б): 1 – СВМПЭ + SiO<sub>2</sub>; 2 – СВМПЭ + УНТ; 3 – СВМПЭ с механоактивацией (3 200 Дж/г); 4 – СВМПЭ без механоактивации

F i g. 1. Typical stretching curves of samples of UHMWPE and nanocomposites based on it (a) and their behavior in the yield point region (b): 1 – UHMWPE + SiO<sub>2</sub>; 2 – UHMWPE + CNT; 3 – UHMWPE with mechanical activation (3,200 J/g); 4 – UHMWPE without mechanical activation



Р и с. 2. Зависимость пределов прочности  $\sigma_p$  и текучести  $\sigma_T$ (а), конечного  $E_k$  модуля упругости (б) пластин СВМПЭ (1) и нанокompозита СВМПЭ + 0,1 % УНТ (2) от удельных энергозатрат на механоактивацию сухосмешанных порошков

F i g. 2. Dependence of tensile strength  $\sigma_p$  and yield strength  $\sigma_T$ (a), final  $E_k$  elastic module (b) of UHMWPE plates (1) and UHMWPE + 0.1 % CNT nanocomposite (2) on specific energy consumption for mechanical activation of dry mixed powders

рования УНТ в объеме СВМПЭ. Согласно структурным исследованиям, проведенным Т. А. Охлопковой, в композите в этом случае «присутствуют дефектные области с агломерированными наночастицами наполнителя, которые при приложении внешней нагрузки выступают в качестве концентраторов напряжения, снижающих механические свойства полимерного композиционно-го материала»<sup>4</sup>. При увеличении удельных энергозатрат до 3 000–3 200 Дж/г значения всего комплекса упруго-прочностных характеристик достигают максимума, что связано с «формированием в объеме композита устойчивой пространственной сетки физических связей адсорбционного типа с образованием в периферии наночастицы граничного слоя с повышенной степенью упорядоченности в результате действия ее силового поля»<sup>5</sup>.

При дальнейшем увеличении энергозатрат имеет место заметное снижение упруго-прочностных характеристик сформованных образцов нанокompозитов, обусловленное «агломерацией по-

рошков, вызванной высокой эффективной поверхностью частиц» [7].

Из полученных результатов следует, что оптимальные удельные энергозатраты на механоактивацию порошков СВМПЭ и наномодификаторов в планетарной мельнице составляют 3 000–3 200 Дж/г. Усредненные значения физико-механических характеристик исследованных нанокompозитов и результаты их статобработки представлены в таблице.

Из таблицы следует, что большее влияние на упруго-прочностные характеристики СВМПЭ оказывает нанокристаллический диоксид кремния  $SiO_2$  (состав 1). Его ввод в сверхмалой концентрации 0,1 % обеспечивает повышение предела прочности СВМПЭ на 27,5 %, конечного  $E_k$  и начального  $E_n$  модулей упругости соответственно на 22,8 % и 6 %, предела текучести на 4,5 %.

Наличие в СВМПЭ активированных углеродных нанотрубок в концентрации 0,1 % обеспечивает рост предела прочности на 15,6 %, предела текуче-

<sup>4</sup> Охлопкова Т. А. Триботехнические материалы на основе СВМПЭ, модифицированного наноразмерными оксидными керамиками: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2018. 160 с.

<sup>5</sup> Авдейчик С. В. Введение в физику нанокompозиционных машиностроительных материалов. Гродно: ГГАУ, 2009. 439 с.

**Физико-механические характеристики нанокompозитов СВМПЭ при оптимальной энергии механоактивации**  
**Physico-mechanical characteristics of UHMWPE nanocomposites with optimal mechanical activation energy**

Составы согласно рисунку 1 / Compositions according to Figure 1	$\sigma_p$ , МПа / $\sigma_p$ , МПа	$\sigma_r$ , МПа / $\sigma_r$ , МПа	$E_{и^*}$ , МПа / $E_{и^*}$ , МПа	$E_{к^*}$ , МПа / $E_{к^*}$ , МПа	$\epsilon_{и^*}$ , отн. ед / $\epsilon_{и^*}$ , relative to unit
1	301,7 ± 2,2	22,8 ± 0,8	766,2 ± 28,9	810,5 ± 42,8	1,76 ± 0,01
2	274,3 ± 22,5	23,4 ± 0,9	755,7 ± 47,5	715,7 ± 39,3	1,76 ± 0,03
3	228,4 ± 26,8	21,0 ± 1,4	718,9 ± 61,7	641,9 ± 87,5	1,66 ± 0,03
4	236,7 ± 37,6	21,8 ± 1,8	723,1 ± 32,5	659,8 ± 96,3	1,64 ± 0,06

сти на 7,3 %, конечного и начального модулей упругости на 8,5 % и 4,5 %.

Кроме этого, установлено, что «в условиях трения со смазкой введение УНТ обеспечивает снижение коэффициента трения СВМПЭ на 6 %, а интенсивности изнашивания на 33 %» [26].

На рисунке 3 представлены частотные зависимости комплексной вязкости  $\eta^*$  расплавов нанокompозитов для трех составов при оптимальном значении энергозатрат на механоактивацию. Результаты в диапазоне четырех порядков изменения угловой скорости ротора реометра описываются с коэффициентом корреляции не ниже 0,99 степенной зависимостью Оствальда – де Ваале:

$$\eta^* = k\omega^{n-1}, \quad (5)$$

где  $k$  – коэффициент консистенции, Па·с <sup>$n$</sup> ;  $n$  – индекс течения.

Ярко выраженное неньютоновское поведение можно объяснить очень высокой молекулярной массой СВМПЭ, макромолекулы которого требуют дли-

тельного времени релаксации из-за большого количества переплетений.

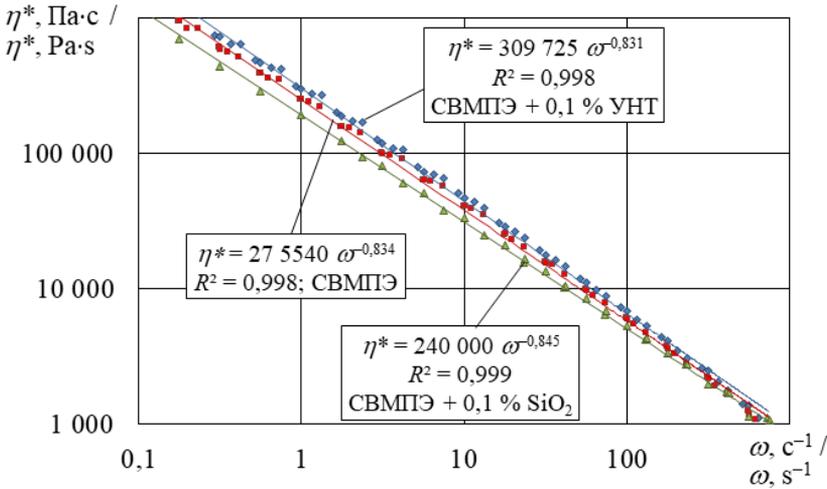
Из графиков следует, что ввод УНТ в полимер приводит к заметному росту комплексной вязкости расплава СВМПЭ из-за высокой структурности данного модификатора. Лучшие реологические свойства достигаются при вводе в СВМПЭ двуокиси кремния SiO<sub>2</sub>.

На рисунке 4 представлена зависимость параметров реологической модели Оствальда – де Ваале от удельных энергозатрат на механоактивацию в шаровой мельнице порошков СВМПЭ (1) и СВМПЭ + 0,1 % УНТ (2).

Из графиков видно, что механоактивация порошка СВМПЭ практически не оказывает влияния на указанные реологические параметры в исследованном диапазоне удельных энергозатрат 0–4 550 Дж/г.

Как известно, вязкость расплава полимера зависит от размера и числа сегментов, входящих в макромолекулярные цепи<sup>6</sup>. Механоактивация СВМПЭ в исследованном диапазоне удельных

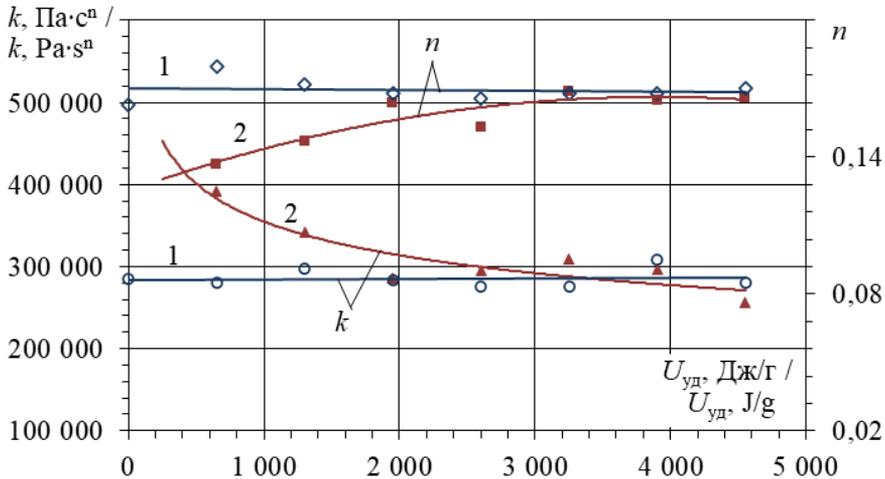
<sup>6</sup> Малкин А. Я., Исаев А. И. Реология: концепции, методы, приложения / пер. с англ. СПб.: Профессия, 2007. 560 с.



Р и с. 3. Зависимость комплексной вязкости расплавов нанокompозитов от угловой скорости ротора при температуре 180 °С: 1 – механоактивированный СВМПЭ; 2 – нанокompозит СВМПЭ + 0,1 % УНТ; 3 – нанокompозит СВМПЭ + 0,1 % SiO<sub>2</sub>  
 F i g. 3. Dependence of the complex viscosity of nanocomposites melts on the angular velocity of the rotor at a temperature of 180 °С: 1 – mechanically activated UHMWPE; 2 – nanocomposite UHMWPE + 0.1% CNT; 3 – nanocomposite UHMWPE + 0.1% SiO<sub>2</sub>

энергoзатрат видимо не изменяет размеры сегментов, имеющих длину порядка нескольких десятков или сотен мономерных единиц.

В отличие от этого коэффициент  $k$  нанокompозита СВМПЭ + 0,1 % УНТ в диапазоне энергoзатрат 650–3 200 Дж/г снижается на 26 %, а индекс течения



Р и с. 4. Зависимость параметров реологической модели Оствальда при температуре 180 °С от удельных энергoзатрат на механоактивацию порошков СВМПЭ (1) и СВМПЭ + 0,1 % УНТ (2)  
 F i g. 4. Dependence of the parameters of the Ostwald rheological model at a temperature of 180 °С on the specific energy costs for the mechanical activation of UHMWPE (1) and UHMWPE powders + 0.1% CNTs (2)

$n$  возрастает на 23 %. В целом это обуславливает снижение комплексной вязкости для изученного диапазона угловых скоростей на 1,5–36 %.

Бликие результаты получены в работе, в которой при температуре 210 °С изучено реологическое поведение СВМПЭ, модифицированного 1 масс. % УНТ [28]. Установлено, что добавление активированных и не активированных ультразвуком УНТ приводит к росту значений комплексной вязкости в диапазоне угловых скоростей  $10^{-2}$ – $10^2$  с $^{-1}$ . Необработанные УНТ оказывают более заметное влияние на комплексную вязкость нанокompозита, вызывая значительное увеличение ее значений по сравнению с чистым полимером. При этом эффект от нанонаполнителей постепенно уменьшается с увеличением времени обработки УНТ ультразвуком, что обусловлено «деградацией структур УНТ и невозможностью формирования перколяционной сети» [28].

#### Обсуждение и заключение

Из вышеприведенных результатов следует, что использование для модификации СВМПЭ углеродных нанотрубок в составе концентрата Tuball Matrix Beta и гидрофобного нанокристаллического диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) дисперсностью 20 нм в оптимальных концентрациях 0,1 % позволяет значимо улучшить физико-механические (эксплуатационные) характеристики СВМПЭ без ухудшения его реологических (технологических) свойств.

Установлено, что лучший комплекс эксплуатационных свойств нанокompозитов достигается при совместной обработке (механоактивации) сухомешанных порошков СВМПЭ и наномодификаторов в планетарно-шаровой мельнице в диапазоне удельных энергозатрат 3 000–3 200 Дж/г. При этом

механоактивация порошка СВМПЭ приводит с ростом удельных энергозатрат в диапазоне 650–4 550 Дж/г к незначительному (в пределах 3–5 %) снижению значений прочности начального и конечного модулей упругости полимера, что согласуется с результатами известных работ.

Исходя из полученных значений пределов текучести (22,8 МПа) и прочности (301,7 МПа) нанокompозита СВМПЭ + 0,1 %  $\text{SiO}_2$ , можно заключить, что уровень рабочих напряжений для антифрикционных деталей, полученных твердофазным формованием нанокompозитов СВМПЭ, может быть увеличен в несколько раз.

Динамическими испытаниями установлено, что механоактивация порошка СВМПЭ в диапазоне удельных энергозатрат 0–4 550 Дж/г не изменяет значений параметров (коэффициента консистенции  $k$  и индекса течения  $n$ ) степенной зависимости Оствальда – де Ваала. В отличие от этого коэффициент консистенции нанокompозита СВМПЭ + 0,1 % УНТ в диапазоне энергозатрат 650–4 550 Дж/г снижается на 26 %, а индекс течения  $n$  возрастает на 23 %, что обуславливает снижение комплексной вязкости расплава для изученного диапазона угловых скоростей  $10^{-1}$ – $10^3$  с $^{-1}$  на 1,5–36 %.

Прикладная технико-экономическая значимость полученных результатов заключается в том, что они открывают перспективы использования исследованных нанокompозитов для изготовления методом твердофазного формования высокоресурсных антифрикционных деталей сельскохозяйственной техники: подшипников скольжения, направляющих, комбинированных уплотнений, грязесъемных колец гидроцилиндров и других деталей аналогичного назначения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Износостойкие полимерные материалы. Структура и свойства / Н. Т. Кахраманов, Г. Ш. Касумова, В. С. Осипчик, Р. Ш. Гаджиева // Пластические массы. – 2017. – № 11–12. – С. 8–15. – URL: <https://www.plastics-news.ru/jour/article/view/213> (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.
2. Композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: свойства, перспективы использования / Г. Е. Селютин, Ю. Ю. Гаврилов, Е. Н. Воскресенская [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. – 2010. – Т. 18, № 3. – С. 375–388. – URL: <http://sciact.catalysis.ru/ru/public/article/5698> (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.
3. Наноструктурированные композиты и полимерное материаловедение / Н. Т. Кахраманов, А. Г. Азизов, В. С. Осипчик [и др.] // Пластические массы. – 2016. – № 1–2. – С. 49–57. – URL: [https://www.plastics-news.ru/jour/article/view/18?locale=ru\\_RU](https://www.plastics-news.ru/jour/article/view/18?locale=ru_RU) (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.
4. Влияние механической активации сверхвысокомолекулярного полиэтилена на его механические и триботехнические свойства / В. Е. Панин, С. В. Панин, Л. А. Корниенко [и др.] // Трение и износ. – 2010. – Т. 31, № 2. – С. 168–176. – URL: <https://mpri.org.by/izdaniya/trenie-i-iznos/2010-tom-31-n-1-6.html> (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.
5. Structural Modifications of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Processed in Attritor Type Mill / М. С. Gabriel, В. М. Carvalho, L. А. Pinheiro [et al.] // 7<sup>th</sup> International Latin American Conference on Powder Technology, November 08-10. – Atibaia, 2009. – Pp. 337–341. – URL: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/47/116/47116488.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/47/116/47116488.pdf) (дата обращения: 21.10.2020).
6. High-Energy Mechanical Milling of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) / М. С. Gabriel, L. В. Mendes, В. М. Carvalho [et al.]. – DOI [10.4028/www.scientific.net/msf.660-661.325](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.660-661.325) // Materials Science Forum. – 2010. – Vol. 660–661. – Pp. 325–328. – URL: <https://www.scientific.net/MSF.660-661.325> (дата обращения: 21.10.2020).
7. **Медведева, Е. В.** Структура содержащих неравноосные неорганические включения полимерных композиционных материалов / Е. В. Медведева, В. В. Чердынцев // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=10459> (дата обращения: 21.10.2020).
8. Влияние углеродных нановолокон/нанотрубок на формирование физико-механических и триботехнических характеристик полимерных композитов на основе термопластичных матриц СВМПЭ и ПЭЭК / С. В. Панин, Л. А. Корниенко, В. О. Алексенко [и др.] // Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология». – 2017. – Т. 60, № 9. – С. 45–51. – URL: <http://journals.isuct.ru/ctj/article/view/200> (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.
9. **Сампо, N.** Incorporation of Carbon Nanotubes into Ultra High Molecular Weight Polyethylene by High Energy Ball Milling / N. Campo, А. М. Visco. – DOI [10.1080/1023666X.2010.510110](https://doi.org/10.1080/1023666X.2010.510110) // International Journal of Polymer Analysis and Characterization. – 2010. – Vol. 15, Issue 7. – Pp. 438–449. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1023666X.2010.510110> (дата обращения: 21.10.2020).
10. Influence of SiO<sub>2</sub> Micro- Particles on Microstructure, Mechanical Properties and Wear Resistance of UHMWPE Based Composite under Dry Sliding Friction / N. Puangmalee, N. Sonjaitham, S. Saengthip [et al.]. – DOI [10.4028/www.scientific.net/kem.769.152](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.769.152) // Key Engineering Materials. – 2018. – Vol. 769. – Pp. 152–157. – URL: <https://www.scientific.net/KEM.769.152> (дата обращения: 21.10.2020).
11. Механические и триботехнические характеристики многокомпонентных твердосмазочных композитов на матрице сверхвысокомолекулярного полиэтилена / С. В. Панин, В. О. Алексенко, Л. А. Корниенко [и др.]. – DOI [10.6060/ivkkt.20186111.11y](https://doi.org/10.6060/ivkkt.20186111.11y) // Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология». – 2018. – Т. 61, № 11. – С. 88–95. – URL: <http://journals.isuct.ru/ctj/article/view/747> (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.
12. Role of Micro- and Nanofillers in Abrasive Wear of Composites Based on Ultra-High Molecular Weight Polyethylene / S. V. Panin, L. A. Kornienko, N. X. Thuc [et al.]. – DOI [10.4028/www.scientific.net](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net)

[net/amr.1040.148](https://www.scientific.net/AMR.1040.148) // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1040. – Pp. 148–154. – URL: <https://www.scientific.net/AMR.1040.148> (дата обращения: 21.10.2020).

13. Получение и применение модифицированного наночастицами сверхвысокомолекулярного полиэтилена / Л. Ю. Федоров, И. В. Карпов, А. В. Ушаков, А. А. Лепешев // Решетневские чтения. – 2013. – Т. 1, № 17. – С. 482–484. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poluchenie-i-primeneniemodifitsirovannogo-nanochastitsami-sverhvyssokomolekulyarnogo-polietilena/viewer> (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.

14. **Заболотнов, А. С.** Износостойкость композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с наполнителями разного типа / А. С. Заболотнов, П. Н. Бревнов, В. В. Акульшин // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2017. – № 12. – С. 13–19. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/322085046\\_Iznosostojkost\\_kompozicionnyh\\_materialov\\_na\\_osnove\\_sverhvyssokomolekulyarnogo\\_polietilena\\_s\\_napolnitelami\\_raznogo\\_tipa/comments](https://www.researchgate.net/publication/322085046_Iznosostojkost_kompozicionnyh_materialov_na_osnove_sverhvyssokomolekulyarnogo_polietilena_s_napolnitelami_raznogo_tipa/comments) (дата обращения: 21.10.2020).

15. Bulk Oriented Nanocomposites of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Reinforced with Fluorinated Multiwalled Carbon Nanotubes with Nanofibrillar Structure / A. V. Maksimkin, A. V. Kharitonov, A. P. Mostovaya [et al.]. – DOI 10.1016/j.compositesb.2016.03.061 // Composites Part B: Engineering. – 2016. – Vol. 94. – Pp. 292–298. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836816301068?via%3Dihub> (дата обращения: 21.10.2020).

16. **Mohammed, A. S.** UHMWPE Nanocomposite Coatings Reinforced with Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Nanoparticles for Tribological Applications / A. S. Mohammed. – DOI 10.3390/coatings8080280 // Coatings. – 2018. – Vol. 8, Issue 8. – Pp. 280. – URL: <https://www.mdpi.com/2079-6412/8/8/280> (дата обращения: 21.10.2020).

17. **Gulbin, V. N.** Structure and Microwave Absorbing Properties of Carbon-Filled Ultra-High Molecular Weight Polyethylene / V. N. Gulbin, V. V. Tcherdyntsev. – DOI 10.1515/secm-2015-0431 // Science and Engineering of Composite Materials. – 2018. – Vol. 25, Issue 1. – Pp. 153–157. – URL: <https://www.degruyter.com/view/journals/secm/25/1/article-p153.xml> (дата обращения: 21.10.2020).

18. The Influence of Irradiation on Thermal and Mechanical Properties of UHMWPE/GO Nanocomposites / Z. Ni, W. Pang, G. Chen [et al.]. – DOI 10.1134/s1070427217110234 // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2017. – Vol. 90, Issue 11. – Pp. 1876–1882. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1070427217110234> (дата обращения: 21.10.2020).

19. **Lawal, D.** Tribological Investigations of Carbon Nanotube-Reinforced Polymer (UHMWPE) Nanocomposites Using Taguchi Methodology / D. Lawal, A. B. Ali, A. S. Mohammed. – DOI 10.1002/app.44018 // Journal of Applied Polymer Science. – 2016. – Vol. 133, Issue 40. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.44018> (дата обращения: 21.10.2020).

20. Сравнение эффективности мельниц «АГО-2» и «Активатор-2SL» при механической активации порошка титана / В. А. Полубояров, О. П. Солоненко, А. А. Жданок [и др.] – DOI 10.17516/1999-494X-2017-10-5-646-656 // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2017. – Т. 10, № 5. – С. 646–656. – URL: <http://journal.sfu-kras.ru/en/article/33855> (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.

21. **Веригин, Ю. А.** Разработка закономерностей оптимизации процессов механического измельчения материалов в строительстве / Ю. А. Веригин, Л. Ю. Маликова, Я. Ю. Веригина // Ползуновский вестник. – 2014. – № 1. – С. 47–52. – URL: [http://elib.altstu.ru/journals/Files/pv2014\\_01/pdf/047verigin.pdf](http://elib.altstu.ru/journals/Files/pv2014_01/pdf/047verigin.pdf) (дата обращения: 21.10.2020).

22. **Бороненко, М. П.** Контроль энергии измельчения и механоактивации планетарной мельницы АГО-3 / М. П. Бороненко, В. В. Лавриков, А. Е. Серегин // Вестник Югорского государственного университета. – 2016. – № 2 (41). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontrol-energii-izmelcheniya-i-mehanoaktivatsii-planetarnoy-melnitsy-ago-3> (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.

23. **Кузьмич, Ю. В.** Модель энергетических характеристик планетарной мельницы / Ю. В. Кузьмич, В. Г. Коротков // Труды Кольского научного центра РАН. – 2015. – № 5 (31). – С. 380–384. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-energeticheskikh-harakteristik-planetarnoy-melnitsy> (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.

24. Влияние механической активации на структуру композиционных порошков на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, наполненного карбидом бора / В. И. Жорник, С. А. Ковалева, М. А. Белоцерковский [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2018. – № 11. – С. 58–63. – Рез. англ.

25. **Охлопкова, А. А.** Управление процессами структурообразования в полимерных композиционных материалах на основе СВМПЭ / А. А. Охлопкова, Т. А. Охлопкова, Р. В. Борисова // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2015. – № 2 (78). – С. 85–90. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-protsessami-strukturoobrazovaniya-v-polimernyh-kompozitsionnyh-materialah-na-osnove-svmpe-1> (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.

26. **Куликовская, К. А.** Влияние сверхмалых концентраций углеродных нанотрубок на упруго-прочностные, реологические и трибологические характеристики сверхвысокомолекулярного полиэтилена / К. А. Куликовская, В. Н. Водяков // Вестник Казанского технологического университета. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 75–78 – URL: <http://sciencerm.ru/Publications/Details/43> (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.

27. **Куликовская, К. А.** Исследование физико-механических и реологических характеристик нанокмозитов сверхвысокомолекулярного полиэтилена / К. А. Куликовская, В. Н. Водяков, А. А. Шабарин. – DOI 10.6060/ivkkt.20196211.5988 // Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология». – 2019. – Т. 62, № 11. – С. 112–116. – URL: <http://journals.isuct.ru/ctj/article/view/1741> (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.

28. Sonication-Induced Modification of Carbon Nanotubes: Effect on the Rheological and Thermo-Oxidative Behaviour of Polymer-Based Nanocomposites / R. Arrigo, R. Teresi, C. Gambarotti [et al.]. – DOI 10.3390/ma11030383 // Materials. – 2018. – Vol. 11, Issue 3. – Pp. 383. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/3/383> (дата обращения: 21.10.2020).

*Поступила 05.05.2020; принята к публикации 10.07.2020; опубликована онлайн 30.12.2020*

*Об авторах:*

**Водяков Владимир Николаевич**, профессор кафедры механизации переработки сельскохозяйственной продукции Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4687-1798>, [vnvod@mail.ru](mailto:vnvod@mail.ru)

**Куликовская Ксения Анатольевна**, аспирант кафедры механизации переработки сельскохозяйственной продукции Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9386-0939>, [anata.kulikovckaya@gmail.com](mailto:anata.kulikovckaya@gmail.com)

*Заявленный вклад соавторов:*

В. Н. Водяков – постановка задачи исследования, разработка методики и редактирование статьи; К. А. Куликовская – анализ литературных данных, проведение экспериментальных работ и статистическая обработка полученных результатов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Kakhramanov N.T., Gasumova G.Sh., Osipchik V.S., et al. Wearproof Polymeric Materials. Structure and Properties. *Plasticheskie Massy* = Plastics. 2017; (11-12):8-15. Available at: <https://www.plastics-news.ru/jour/article/view/213> (accessed 21.10.2020). (In Russ.)

2. Selyutin G.E., Gavrillov Y.Y., Voskresenskaya E.N., et al. Composite Materials Based on Ultrahigh-Molecular Polyethylene: Properties, Outlooks for Use. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya* =

Chemistry for Sustainable Development. 2010; 18(3):375-388. Available at: <http://sciact.catalysis.ru/public/article/5698> (accessed 21.10.2020). (In Russ.)

3. Kakhramanov N.T., Azizov A.G., Osipchik V.S., et al. Nanostructured Composites and Polymeric Materials Technology. *Plasticheskie Massy*. 2016; (1-2):49-57. Available at: [https://www.plastics-news.ru/jour/article/view/18?locale=ru\\_RU](https://www.plastics-news.ru/jour/article/view/18?locale=ru_RU) (accessed 21.10.2020). (In Russ.)

4. Panin V.Ye., Panin S.V., Kornienko L.A., et al. Effect of Mechanical Activation of Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene on Its Mechanical and Triboengineering Properties. *Trenie i iznos = Journal of Friction and Wear*. 2010; 31(2):168-176. Available at: <https://mpri.org.by/izdaniya/trenie-i-iznos/2010-tom-31-n-1-6.html> (accessed 21.10.2020). (In Russ.)

5. Gabriel M.C., Carvalho B.M., Pinheiro L.A., et al. Structural Modifications of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Processed in Attritor Type Mill. In: 7<sup>th</sup> International Latin American Conference on Powder Technology, November 08-10. Atibaia; 2009. Pp. 337-341. Available at: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/47/116/47116488.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/47/116/47116488.pdf) (accessed 21.10.2020).

6. Gabriel M.C., Mendes L.B., Carvalho B.M., et al. High-Energy Mechanical Milling of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE). *Materials Science Forum*. 2010; 660-661:325-328. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.660-661.325>

7. Medvedeva Ye.V., Cherdynstev V.V. [Structure of Polymer Composite Materials Containing Non-Uniform Inorganic Inclusions]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*. 2013; (5). Available at: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=10459> (accessed 21.10.2020). (In Russ.)

8. Panin S.V., Kornienko L.A., Aleksenko V.O., et al. Influence of Nanofibers/Nanotubes on Physical-Mechanical and Tribotechnical Properties of Polymer Composites Based on Thermoplastic UHMWPE and PEEK Matrixes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya "Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya"* = Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology. 2017; 60(9):45-51. Available at: <http://journals.isuct.ru/ctj/article/view/200> (accessed 21.10.2020). (In Russ.)

9. Campo N., Visco A.M. Incorporation of Carbon Nanotubes into Ultra High Molecular Weight Polyethylene by High Energy Ball Milling. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*. 2010; 15(7):438-449. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/1023666X.2010.510110>

10. Puangmalee N., Sonjaitham N., Saengthip S., et al. Influence of SiO<sub>2</sub> Micro-Particles on Microstructure, Mechanical Properties and Wear Resistance of UHMWPE Based Composite under Dry Sliding Friction. *Key Engineering Materials*. 2018; 769:152-157. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.769.152>

11. Panin S.V., Aleksenko V.O., Kornienko L.A., et al. Mechanical and Tribotechnical Properties of Multicomponent Solid Lubricant Composites Based on Ultra High Molecular Weight Polyethylene. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya "Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya"* = Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology. 2018; 61(11):88-95. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20186111.11y>

12. Panin S.V., Kornienko L.A., Thuc N.X., et al. Role of Micro- and Nanofillers in Abrasive Wear of Composites Based on Ultra-High Molecular Weight Polyethylene. *Advanced Materials Research*. 2014; 1040:148-154. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1040.148>

13. Fedorov L.Yu., Karpov I.V., Ushakov A.V., et al. Manufacturing and Applying the UHMWPE Modified of Nanoparticles. *Reshetnevskie chteniya = Readings in Memory of Reshetnev*. 2013; 1(17):482-484. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/poluchenie-i-primeneniye-modifitsirovannogo-nanochastitsami-sverhvysokomolekulyarnogo-polietilena/viewer> (accessed 21.10.2020). (In Russ.)

14. Zabolotnov A.S., Brevnov P.N., Akulshin V.V. [Wear Resistance of Composite Materials Based on Ultra-High Molecular Weight Polyethylene with Different Types of Fillers]. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik = All Materials. Encyclopedic Handbook*. 2017; (12):13-19. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/322085046\\_Iznosostojkost\\_kompozicionnyh\\_materialov\\_na\\_osnove\\_sverhvysokomolekulyarnogo\\_polietilena\\_s\\_napolnitelami\\_raznogo\\_tipa/comments](https://www.researchgate.net/publication/322085046_Iznosostojkost_kompozicionnyh_materialov_na_osnove_sverhvysokomolekulyarnogo_polietilena_s_napolnitelami_raznogo_tipa/comments) (accessed 21.10.2020). (In Russ.)

15. Maksimkin A.V., Kharitonov A.V., Mostovaya A.P., et al. Bulk Oriented Nanocomposites of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Reinforced with Fluorinated Multiwalled Carbon Nanotubes with Nanofibrillar Structure. *Composites Part B: Engineering*. 2016; 94:292-298. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.03.061>
16. Mohammed A.S. UHMWPE Nanocomposite Coatings Reinforced with Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Nanoparticles for Tribological Applications. *Coatings*. 2018; 8(8):280. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings8080280>
17. Gulbin V.N., Tcherdyntsev V.V. Structure and Microwave Absorbing Properties of Carbon-Filled Ultra-High Molecular Weight Polyethylene. *Science and Engineering of Composite Materials*. 2018; 25(1):153-157. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1515/secm-2015-0431>
18. Ni Z., Pang W., Chen G., et al. The Influence of Irradiation on Thermal and Mechanical Properties of UHMWPE/GO Nanocomposites. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2017; 90(11):1876-1882. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/s1070427217110234>
19. Lawal D., Ali A.B., Mohammed A.S. Tribological Investigations of Carbon Nanotube-Reinforced Polymer (UHMWPE) Nanocomposites Using Taguchi Methodology. *Journal of Applied Polymer Science*. 2016; 133(40). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1002/app.44018>
20. Poluboyarov V.A., Solonenko O.P., Zhdanok A.A., et al. Comparison of the Efficiency of the Mills “AGO-2” and “Activator-2SL” at the Mechanical Activation of Titanium Powder. *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2017; 10(5):646-656. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2017-10-5-646-656>
21. Verigin Yu.A., Malikova L.Yu., Verigina Ya.Yu. [Development of the Regularities for Optimization of the Processes of Mechanical Crushing of Materials in Construction]. *Polzunovskiy vestnik* = Polzunov's Bulletin. 2014; (1):47-52. Available at: [http://elib.altstu.ru/journals/Files/pv2014\\_01/pdf/047verigin.pdf](http://elib.altstu.ru/journals/Files/pv2014_01/pdf/047verigin.pdf) (accessed 21.10.2020). (In Russ.)
22. Boronenko M.P., Lavrikov V.V., Seregin A.Ye. Energy Control and Grinding Mechanoactivation Planetary Mill AGO-3. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta* = Yugra State University Bulletin. 2016; (2). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontrol-energii-izmelcheniya-i-mehanoaktivatsii-planetarnoy-melnitsy-ago-3> (accessed 21.10.2020). (In Russ.)
23. Kuzmich Yu.V., Korotkov V.G. Simulation of the Energy Characteristics of the Planetary Mill. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN* = Works of the Kola Scientific Center of the RAS. 2015; (5):380-384. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-energeticheskikh-harakteristik-planetarnoy-melnitsy> (accessed 21.10.2020). (In Russ.)
24. Zhornik V.I., Kovaleva S.A., Belotserkovskiy M.A., et al. Influence of Mechanical Activation on Structure of Composite Powders Based on Ultrahigh-Molecular Weight Polyethylene Filled by Boron Carbide. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost. Prikladnye nauki* = Polotsk State University Bulletin. Series B. Industry. Applied Sciences. 2018; (11):58-63. (In Russ.)
25. Okhlopkova A.A., Okhlopkova T.A., Borisova R.V. [Structural Formation Processes Management in Polymer Composite Materials Based on UHMWPE]. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktki* = Arctic and Subarctic Natural Resources. 2015; (2):85-90. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-protsessami-strukturoobrazovaniya-v-polimernyh-kompozitsionnyh-materialah-na-osnove-svmpe-1> (accessed 21.10.2020). (In Russ.)
26. Kulikovskaya K.A., Vodyakov V.N. Effects Provided by the Ultra-Low Concentrations of Carbon Nanotubes on the Stress-Related, Rheological and Tribological Characteristics of Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* = Kazan Technological University Bulletin. 2019; 22(2):75-78. Available at: <http://sciencerm.ru/Publications/Details/43> (accessed 21.10.2020). (In Russ.)
27. Kulikovskaya K.A., Vodyakov V.N., Shabarin A.A. Investigation of Physico-Mechanical and Rheological Characteristics of Nanocomposites of Ultrahigh-Molecular Polyethylene. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya “Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya”* = Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology. 2019; 62(11):112-116. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20196211.5988>

28. Arrigo R., Teresi R., Gambarotti C., et al. Sonication-Induced Modification of Carbon Nanotubes: Effect on the Rheological and Thermo-Oxidative Behaviour of Polymer-Based Nanocomposites. *Materials*. 2018; 11(3):383. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11030383>

*Received 05.05.2020; revised 10.07.2020; published online 30.12.2020*

*About the authors:*

**Vladimir N. Vodyakov**, Professor of Chairs of Mechanization of Agricultural Processing of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4687-1798>, [vnvod@mail.ru](mailto:vnvod@mail.ru)

**Kseniya A. Kulikovskaya**, Postgraduate Student of Chairs of Mechanization of Agricultural Processing of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9386-0939>, [anata.kulikovckaya@gmail.com](mailto:anata.kulikovckaya@gmail.com)

*Contribution of the authors:*

V. N. Vodyakov – formulation of the research task, development of methods and editing the article; K. A. Kulikovskaya – literary data analysis, experimental works and statistical processing of the obtained results.

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



## Результаты теоретического определения конструктивных и кинематических параметров рабочих органов шелушительной машины

А. В. Анисимов\*, Ф. Я. Рудик

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (г. Саратов, Российская Федерация)

\*[anisimovaleksan@mail.ru](mailto:anisimovaleksan@mail.ru)

*Введение.* Шелушение перед помолом увлажненного зерна позволяет удалить с поверхности большую часть внешних оболочек с находящимися на них загрязнениями. Наиболее распространенными в настоящее время машинами для шелушения являются устройства, работающие по принципу «сжатие и трение», в которых зерновки перемещаются по фрикционным поверхностям рабочих органов. Целью данного исследования является установление и выбор конструктивных и кинематических параметров рабочих органов машины, при которых наиболее эффективно выполнялся бы процесс шелушения; проведение энергетической оценки процесса шелушения зерна.

*Материалы и методы.* Для определения зависимости конструктивных и режимных параметров машины от угла наклона и угла высштаповки ситового цилиндра была составлена схема движения зерновки по наклонному цилиндру с использованием элементов теории движения точки по шероховатым поверхностям. Движение зерновки по поверхности цилиндра рассмотрено методами аналитической динамики.

*Результаты исследования.* Выражены значения геометрических параметров положения частицы в точке  $A$  в функции от угла наклона цилиндра  $\alpha$  и угла, характеризующего форму наклонной линии высштаповки цилиндра  $\beta$ . Проведена энергетическая оценка процесса шелушения зерна. При радиусе ситового цилиндра  $R_0 = 0,135$  м, ширине рабочего кольцевого зазора  $k = 0,01$  м, длине цилиндра  $L = 0,4$  м, горизонтальном расположении цилиндра, угловой скорости вала  $\omega = 90$  рад/с, угле наклона высштаповки  $\beta = 22^\circ$  расчетная мощность составила  $P = 4,5$  кВт.

*Обсуждение и заключение.* В результате проведенного анализа траектории движения зерна, находящегося на поверхности цилиндра, были получены выражения, связывающие форму наклонной линии высштаповки цилиндра, характеризующую углом  $\beta$ , с углом наклона  $\alpha$  и радиусом  $R_0$  цилиндра, угловой скоростью вала и фрикционными свойствами зерна. Полученные аналитические зависимости могут быть использованы для приближенного определения конструктивных и кинематических параметров шелушительной машины.

**Ключевые слова:** очистка поверхности зерна, шелушение, фрикционная поверхность, ситовой цилиндр, энергетическая оценка процесса

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

**Для цитирования:** Анисимов, А. В. Результаты теоретического определения конструктивных и кинематических параметров рабочих органов шелушительной машины / А. В. Анисимов, Ф. Я. Рудик. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202004.594-608 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 594–608.

© Анисимов А. В., Рудик Ф. Я., 2020



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

## Results of Theoretical Definition of Structural and Kinematic Parameters of Peeling Machine Working Elements

A. V. Anisimov\*, F. Ya. Rudik

Saratov State Agrarian University (Saratov, Russian Federation)

\*anisimovaleksan@mail.ru

**Introduction.** Peeling the moistened grains before grinding allows removing most of the outer shells with impurities on them from the grain surface. At the present time, the most commonly used machines for peeling are devices operating on the principle of “compression and friction”, in which the grains move along the friction surfaces of the working bodies. The aim of this study is to define and select structural and kinematic parameters of the machine working bodies, which would most effectively perform the process of peeling, and to make energy assessment of grain peeling.

**Materials and Methods.** To identify the dependence of the machine design and operating parameters on the inclination angle and punching angle of the sieve cylinder, a diagram of the movement of the grain along the inclined cylinder was drawn up using elements of the theory of the motion of material point on rough surfaces. The motion of grains on the cylinder surface is analyzed by the methods of analytical dynamics.

**Results.** The values of the geometric parameters of the particle position at point  $A$  are expressed as a function of the cylinder inclination angle  $\alpha$  and the angle characterizing the shape of the inclined line of stamping of the cylinder  $\beta$ . Energy assessment of grain peeling process was made. With the radius of the sieve cylinder  $R_0 = 0.135$  m, the width of the working annular gap  $\kappa = 0.01$  m, the length of the cylinder  $L = 0.4$  m, the horizontal arrangement of the cylinder, the angular velocity of the shaft  $\omega = 90$  rad/s, the angle of inclination of the stamping  $\beta = 22^\circ$ , the calculated power was  $P = 4.5$  kW.

**Discussion and Conclusion.** As a result of analyzing the motion trajectory of the grain located on the cylinder surface, there have been proposed the formulas relating the shape of the inclined punching line of the cylinder, characterized by the angle  $\beta$ , to the inclination angle  $\alpha$ , the radius  $R_0$  of the cylinder, the shaft angular velocity and the grain frictional properties. The obtained analytical dependencies can be used for the approximate definition of the peeling machine design and kinematic parameters.

**Keywords:** grain surface cleaning, peeling, friction surface, sieve cylinder, process energy evaluation

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

**For citation:** Anisimov A.V., Rudik F.Ya. Results of Theoretical Definition of Structural and Kinematic Parameters of Peeling Machine Working Elements. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(4):594-608. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.594-608>

### Введение

Основной задачей сортового помола пшеницы является максимальное разделение на отдельные фракции частей внешних оболочек, зародыша и эндосперма. На разрезе зерновки пшеницы четко отслеживается углубление, проходящее по всей его продольной оси, где внешние оболочки заворачиваются внутрь и образуют так называемую бороздку, имеющую различную фор-

му у разных сортов и типов пшеницы. Присутствие такого сложного по форме и труднодоступного для рабочих органов обрабатывающих машин объекта значительно усложняет технологический процесс отделения эндосперма от внешних оболочек зерновки и существенно затрудняет процесс предварительного шелушения зерна перед помолом. Возможность полного удаления внешних оболочек зерна (вместе с при-

сутствующими на них загрязнениями) перед помолом позволила бы значительно упростить технологию переработки зерна в муку. Наличие семенных оболочек, сросшихся с пигментной полосой и плотно соединенных с эндоспермом в зоне бороздки, делает практически невозможным полное удаление оболочек с поверхности зерновки, а следовательно, нельзя направить на размол полностью очищенные от оболочек зерновки<sup>1</sup>. Многочисленные исследования в области очистки поверхности зерна перед помолом как важной технологической операции подготовки зерна к переработке не привели к однозначному решению проблемы удаления внешних оболочек [1–4].

Операция шелушения увлажненного зерна в шелушительной машине с подвижными абразивными дисками осуществляется за счет факторов внешнего и преобладающего внутреннего трения при его транспортировании в ограниченном кольцевом объеме рабочей зоны [5–8]. Интенсивность взаимодействия зерновок в стесненных условиях обуславливается значением коэффициента заполнения рабочей зоны машины, определяющего плотность укладки зерновой массы, временем нахождения зерна в рабочей зоне и непрерывным интенсивным перемешиванием зерновой смеси, что создает предпосылки для эффективного и равномерного удаления внешних оболочек зерновок [9–11]. Значительно повысить эффективность шелушения за счет лучшего перемешивания зерна, движущегося в кольцевом рабочем зазоре между ситовым цилиндром и абразивными дисками, можно, сделав направляющие выштамповки на ситовом цилиндре [12].

Одним из составных элементов технологического процесса шелушения зерна в машинах такого типа (работающих по принципу «сжатие и трение»)

является перемещение обрабатываемого зерна по фрикционным поверхностям рабочих органов этих машин. При этом количественные и качественные показатели этого технологического процесса в значительной степени обуславливаются конструктивными параметрами и кинематическими элементами движения самих рабочих органов и кинематическими элементами движения зерновок по ним. Эти конструктивные параметры и кинематические элементы являются объектом данного исследования.

### Обзор литературы

Научной проблемой отделения оболочек зерна пшеницы перед помолом в разное время занимались Г. А. Глобенко, И. Р. Дударев, И. В. Настагунин, Э. Г. Нуруллин и др. Зерно, обработанное в обоечной машине, подвергалось гидротермическому воздействию в течение получаса с дальнейшим шелушением в машине типа ЗШН с абразивными дисками. В процессе обработки были удалены наружные оболочки в количестве 2–4 % от массы зерновки, при этом зольность обработанного зерна снижалась на 0,015–0,065 %. Зольность сортовой муки из шелушенного зерна на 0,010–0,035 % ниже, чем из зерна, обработанного по обычной технологии. В исследованиях И. Р. Дударева и И. В. Настагунина рассмотрена эффективность применения для шелушения роторно-лопастной фрикционной шелушительной машины. Полученные результаты показали, что для максимального удаления внешних оболочек, зерно необходимо подвергнуть гидротермической обработке с отволаживанием в течение 3–6 часов. При обойном помолу шелушение зерна позволяет получить чистую муку [13–15]. Минимальные энергозатраты на шелушение наблюдаются у максимально увлажненного зерна, но

<sup>1</sup> Галимзянов Д. А. Интенсификация подготовки зерна для мельниц малой производительности: дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 146 с.



это происходит лишь до определенного значения влажности. При влажности выше 17 % зерновка становится пластичной, при этом энергоемкость процесса отделения оболочек растет, в том числе и за счет залипания рабочих поверхностей машин (абразивных дисков, ситового цилиндра). Уменьшается производительность шелушильной машины, а следовательно, и всей поточно-технологической линии. Кроме того, конечная продукция повышенной влажности хуже хранится [16].

Анализируя исследования по данной тематике, можно сделать вывод, что достичь практически полного удаления внешних оболочек зерна в настоящее время никому из исследователей не удалось [17–20]. Сложное анатомическое строение зерновки не позволяет этого достичь, используя существующее оборудование. Поэтому современные исследования направлены в первую очередь на поиск оптимальной степени шелушения зерна перед переработкой в муку и определение оптимальных конструктивных и режимных параметров существующих машин для шелушения.

Анализ процесса движения зерна в шелушильных машинах с подвижными абразивными дисками и неподвижным цилиндром позволил установить, что на зерновую массу, транспортируемую в ограниченном кольцевом объеме рабочей зоны шелушильной машины, действует целый комплекс сил, которые можно разделить на следующие группы: 1) диссипативные силы между движущимися зернами, включающие касательные и нормальные движущиеся и тормозящие силы внутреннего сопротивления зерна; 2) силы внешнего механического воздействия рабочих органов на контактирующие с ними зерна: нормальная реакция ситового

цилиндра, касательная к цилиндру сила сопротивления сдвигу зерен по его перфорированной поверхности (сила внешнего трения), перпендикулярная сила воздействия на зерновки со стороны рабочих фрикционных поверхностей вращающихся абразивных дисков при их относительном перемещении в зерновой массе, касательная сила сопротивления сдвигу зерновок по рабочим фрикционным поверхностям подвижных абразивных дисков; 3) силы, обусловленные инерциальностью системы координат, в которой рассматривается траектория перемещения зерен: сила тяжести, радиально направленная центробежная сила, обуславливающая появление нормальных ускорений зерновок и перемещение их по разветвляющейся траектории, касательно направленная сила инерции, вызывающая появление тангенциальных ускорений зерновок, кориолисова сила, возникающая в результате наложения относительных перемещений зерновок, движущихся по прямолинейным и круговым траекториям<sup>2</sup>.

Для большинства рассматриваемых сил оказывается неизвестным ни направление вектора, ни величина. Однако однородность условий, вызывающих появление отдельных групп сил, позволяет комплексно рассматривать каждую из них, заменяя равнодействующей, приложенной к центру масс элементарного зернового объема.

### **Материалы и методы**

Анализ сил позволил установить, что их совместное действие создает условия для направленного радиально-осевого перемещения зерен. Известно, что если частица в установившемся движении будет вращаться вокруг некоторой оси и одновременно совершать поступательное движение вокруг нее, то траектория такой частицы будет

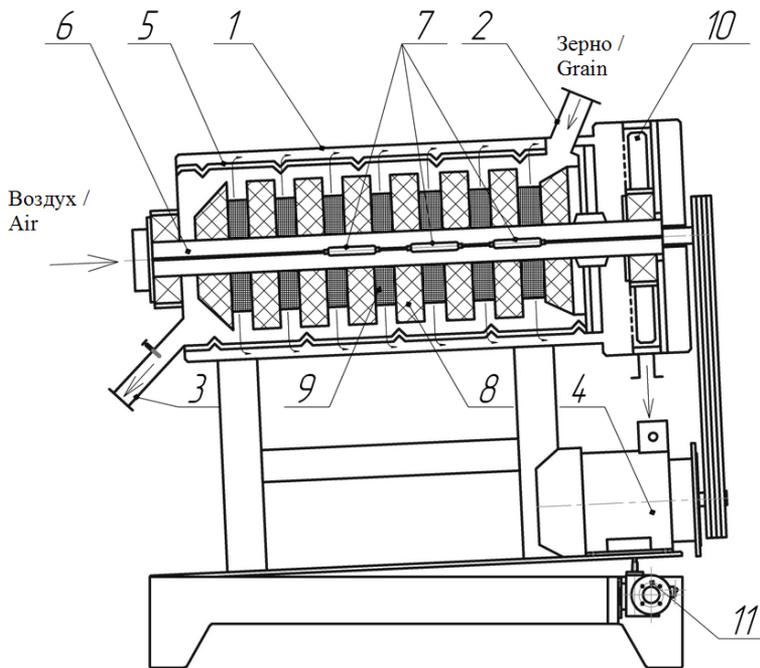
<sup>2</sup> Левенсон Л. Б. Барабанные грохота, их теория, расчет и проектирование. М.: Науч. технич. упр-ние В.С.Н.Х., 1927. 49 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009211509> (дата обращения: 22.10.2020).

винтовой линией [13]. Виды траекторий определяются конструктивными особенностями рабочей зоны, коэффициентом ее заполнения, а также коэффициентом ее заполнения, а также коэффициентом ее заполнения. В разрабатываемой шелушильно-сушильной машине (рис. 1) удаление наружных поверхностных слоев зерновок пшеницы происходит в результате их контакта с фрикционными поверхностями рабочих органов: вращающихся абразивных дисков и ситового перфорированного цилиндра, по всей длине которого выполнена направляющая высштамповка (рис. 2) [12; 21].

Степень шелушения, количество битых зерен и удельный расход энергии на процесс шелушения напрямую зависят от конструктивных параметров

ситового цилиндра: размеров и угла наклона выполненной на нем высштамповки. Обрабатываемый материал через впускной патрубок 2 самотеком поступает в рабочую зону машины (кольцевой зазор между абразивными дисками 8 и ситовым перфорированным цилиндром 5), где, двигаясь по высштамповкам цилиндра, меняет траекторию движения на направление внутрь машины, в результате чего зерно активно перемешивается, а отделенные оболочки эффективнее удаляются из рабочей зоны машины в аспирационную систему [12].

Изменение траекторий, скоростей, модулей движущих сил и сил сопротивления, развиваемых в рабочей зоне при радиально-осевом перемещении

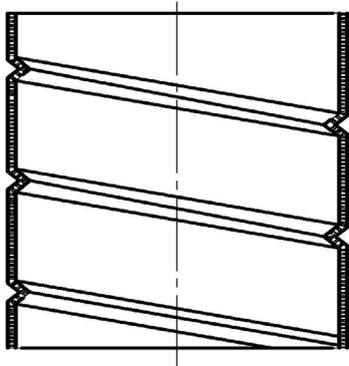


Р и с. 1. Горизонтальная шелушильно-сушильная машина: 1 – корпус; 2 – впускной патрубок; 3 – выпускной патрубок; 4 – привод; 5 – ситовый перфорированный цилиндр; 6 – полый вал; 7 – ИК-излучатели; 8 – абразивные круги; 9 – сетчатые обечайки; 10 – аспирационная система; 11 – механизм регулирования угла наклона машины

Fig. 1. Horizontal peeling-drying machine: 1 – case; 2 – inlet; 3 – final branch pipe; 4 – drive; 5 – sieve perforated cylinder; 6 – hollow shaft; 7 – IR radiators; 8 – abrasive wheels; 9 – mesh feedwells; 10 – aspiration system; 11 – machine tilt adjustment mechanism

зерна и обеспечивающих различную интенсивность и продолжительность обработки зерна, достигается путем варьирования угловой скорости вращения вала с абразивными дисками  $\omega$ , величиной межзернового давления  $\sigma$ , регулируемого заслонками на входе и на выходе из машины.

Отклонение траектории движения зерна от первоначальной напрямую зависит от геометрических размеров выштамповки и угла ее наклона к нормали поверхности цилиндра [12]. Продолжительность нахождения зерновок в рабочей зоне машины будет также зависеть от угла ее наклона к оси цилиндра и формы, обосновать которую можно, проанализировав траекторию движения зерна в рабочей зоне машины.



Р и с. 2. Ситовый цилиндр с выштамповками  
F i g. 2. Sieve cylinder with stamping

### Результаты исследования

Для определения зависимости конструктивных и режимных параметров машины от угла наклона машины и угла выштамповки рассмотрим зерновку, находящуюся на поверхности наклонного ситового цилиндра (рис. 3).

Введем обозначения:  $AB$  – линия, проходящая через точку  $A$  положения частицы на выштамповке ситового цилиндра, определяемая углом наклона выштамповки  $\beta$ ;  $BCE$  – горизонтальная плоскость;  $AD \perp BE$ ,  $ABE$  – вертикальная плоскость;  $AOVV$  – плоскость

вращения цилиндра;  $AC$  – касательная к окружности цилиндра;  $AE$  – перпендикуляр к линии  $AB$ ;  $BC$  – след касательной плоскости на основание;  $\delta$  – угол следа касательной плоскости со следом  $BE$  вертикальной плоскости;  $\gamma$  – угол наибольшего ската в точке, то есть двухгранный угол между касательной плоскостью  $ABC$  и плоскостью основания  $BCE$ ;  $AD$  – перпендикуляр, опущенный из точки  $A$  на линию  $BE$ ;  $GA$  – проекция линии наибольшего ската на вертикальную плоскость;  $L$  – длина цилиндра от его начала до плоскости сечения, мм;  $\alpha$  – угол наклона цилиндра.

В соответствии со схемой (рис. 3) можно записать:

$$AB = OO' = L, \quad (1)$$

$$BD = L \cdot \cos \alpha, \quad (2)$$

$$BE = \frac{L}{\cos \alpha}, \quad (3)$$

$$AE = L \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (4)$$

$$EC = BE \cdot \operatorname{tg} \delta = L \frac{\operatorname{tg} \delta}{\cos \alpha}, \quad (5)$$

$$EC = \frac{AE}{\operatorname{tg} \beta} = L \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta}, \quad (6)$$

$$FD = BD \cdot \sin \delta = L \cdot \cos \alpha \cdot \sin \delta, \quad (7)$$

$$FD = \frac{AD}{\operatorname{tg} \gamma} = \frac{L \cdot \sin \alpha}{\operatorname{tg} \gamma}. \quad (8)$$

Из формул (5) и (6) получим:

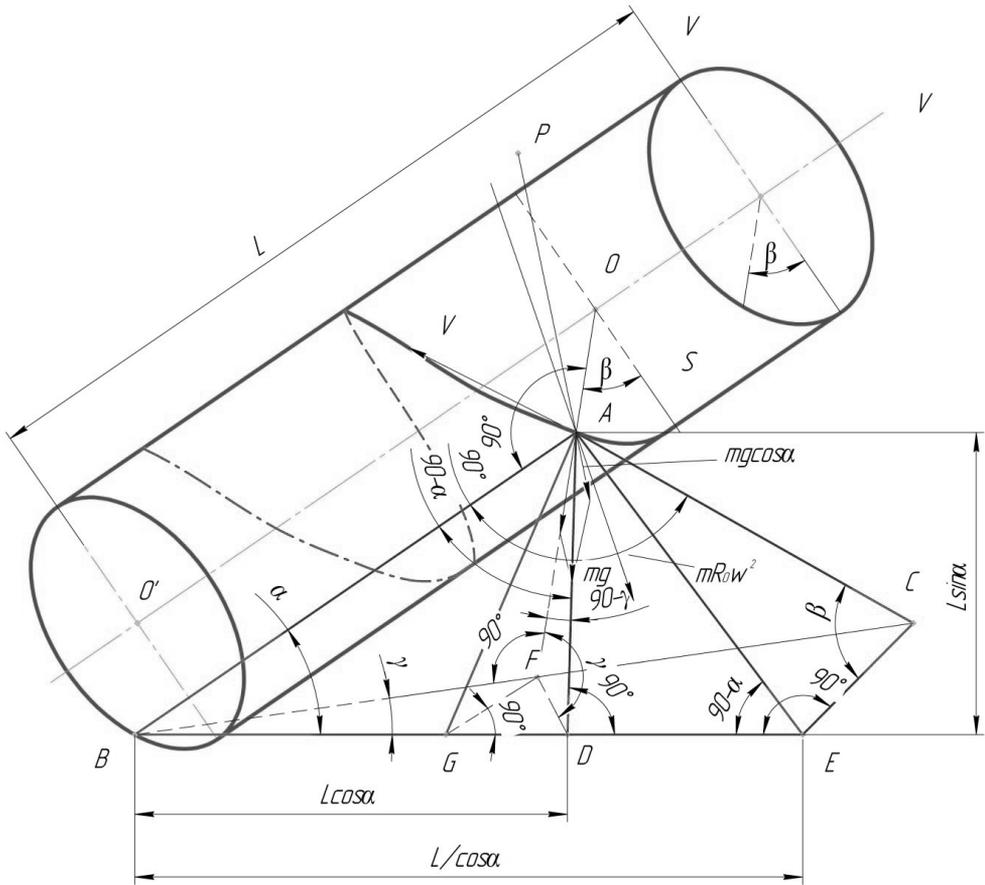
$$EC = L \frac{\operatorname{tg} \delta}{\cos \alpha} = L \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta},$$

откуда:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\sin \alpha}{\operatorname{tg} \beta}. \quad (9)$$

Из формул (7) и (8) получим:

$$FD = L \cdot \cos \alpha \cdot \sin \delta = \frac{L \cdot \sin \alpha}{\operatorname{tg} \gamma},$$



Р и с. 3. Схема к определению зависимости конструктивных и режимных параметров машины от угла наклона цилиндра и угла высштаковки

Fig. 3. Scheme to determine the dependence of machine design and mode parameters on cylinder inclination angle and stamping angle

откуда:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha \cdot \sin \delta} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sin \delta}. \quad (10)$$

или

$$\sin \delta = \frac{\sin \alpha}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \beta + \sin^2 \alpha}}. \quad (11)$$

На основании уравнения (9) можем записать:

$$\sin \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}} = \frac{\sin \alpha}{\operatorname{tg} \beta \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\sin \alpha}{\operatorname{tg} \beta}\right)^2}},$$

Согласно уравнению (10) получим:

$$\cos \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sin \delta}\right)^2}},$$

откуда на основании выражения (11) получим<sup>3</sup>:

$$\cos \gamma = \frac{\sin \alpha}{\sqrt{\sin^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \alpha (\operatorname{tg}^2 \beta + \sin^2 \alpha)}} = \cos \alpha \cdot \cos \beta. \quad (12)$$

Далее имеем:

$$DG = FD \cdot \sin \delta = \frac{L \cdot \sin \alpha \cdot \sin \delta}{\operatorname{tg} \gamma},$$

или на основании выражения (7):

$$DG = \frac{L \cdot \sin \alpha \cdot \sin \delta \cdot \sin \delta}{\operatorname{tg} \alpha} = L \cdot \cos \alpha \cdot \sin^2 \delta. \quad (13)$$

С другой стороны:

$$DG = AD \cdot \operatorname{tg} \varepsilon = L \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \varepsilon, \quad (14)$$

где  $\varepsilon$  – угол между линиями  $AD$  и  $AG$ .

Учитывая последние два выражения, получим:

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{\cos \alpha \cdot \sin^2 \delta}{\sin \alpha},$$

или согласно уравнению (11) [22]:

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{\sin 2\alpha}{2(\operatorname{tg}^2 \beta + \sin^2 \alpha)}. \quad (15)$$

Таким образом, значения геометрических параметров положения зерновки в точке  $A$  выражены в функции от угла наклона перфорированного цилиндра  $\alpha$  и угла, характеризующего форму наклонной линии высштамповки цилиндра  $\beta$ .

Для определения зависимости режущих и конструктивных параметров

машины от угла наклона высштамповки ситового цилиндра, рассмотрим силы, действующие на зерновку:

1) сила тяжести  $mg$  направлена вертикально вниз и совпадает с линией  $AD$ ;

2) центробежная сила  $m \cdot R_0 \cdot \omega^2$ , где  $R_0$  – радиус ситового барабана, м;  $\omega$  – угловая скорость вала с абразивными кругами, рад/с;  $m$  – масса элементарного зернового объема, кг;

3) нормальная реакция поверхности ситового цилиндра  $N$ , величина которой определяется как алгебраическая сумма составляющих силы тяжести, действующей на частицу,  $mg \cos \gamma$  и центробежной силы:

$$m \cdot R_0 \cdot \omega^2 \cdot \cos(n^{\wedge} \chi), \quad (16)$$

где  $n^{\wedge} \chi$  – угол между направлением нормали к поверхности и нормали к траектории;

4) сила трения  $fN$ , где  $f$  – коэффициент трения зерновки о ситовый цилиндр, направлена противоположно относительно скорости движения зерновки по поверхности ситового цилиндра.

В начальный момент времени можно сказать, что зерновка не имеет относительной скорости, а вращается вместе с абразивными дисками.

Начало движения зерновки по поверхности ситового цилиндра определится из условия равенства нулю проекций всех сил на касательную к траектории ее движения. В начальный момент движения такая касательная будет совпадать с направлением составляющей силы тяжести, действующей на зерновку, направленной по линии высштамповки ситового цилиндра:

$$f \cdot N - m \cdot g \cdot \sin \gamma = 0, \quad (17)$$

или

$$f \cdot g \cdot \cos \gamma + f \cdot R_0 \cdot \omega^2 - g \cdot \sin \gamma = 0, \quad (18)$$

<sup>3</sup> Прошкин С. С. Математика для решения физических задач: учебное пособие. СПб: Лань, 2014. 384 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/53689> (дата обращения: 22.10.2020).

откуда, учитывая, что  $f = \operatorname{tg} \varphi$ , где  $\varphi$  – угол трения, и выполняя тригонометрические преобразования, получим:

$$\frac{\sin(\gamma - \phi)}{\sin \phi} = \frac{R_0}{g} \omega^2.$$

Принимая во внимание уравнение (12), получим:

$$\beta = \arccos \left( \frac{1}{\cos \alpha} \cos \left( \phi + \arcsin \left( \frac{R_0 \cdot \omega^2}{g} \right) \cdot \sin \phi \right) \right). \quad (19)$$

При  $\alpha = 0$  (горизонтальное положение цилиндра) уравнение (19) примет вид:

$$\beta = \phi + \arcsin \left( \frac{R_0 \cdot \omega^2}{g} \sin \phi \right). \quad (20)$$

Второе конечное значение угла  $\beta$  – угол отрыва зерновки от поверхности перфорированного цилиндра – определится, как и раньше, из равенства 0 нормальной реакции  $N$ .

В этом случае имеет место относительное движение зерновки по поверхности цилиндра (относительно абразивных дисков), поэтому второй составляющей нормальной реакции будет выражение (16).

Поэтому для момента отрыва можно записать:

$$N = m \cdot g \cdot \cos \gamma + m \cdot R_0 \cdot \omega^2 \cos(n^{\wedge} \lambda) = 0, \quad (21)$$

откуда:

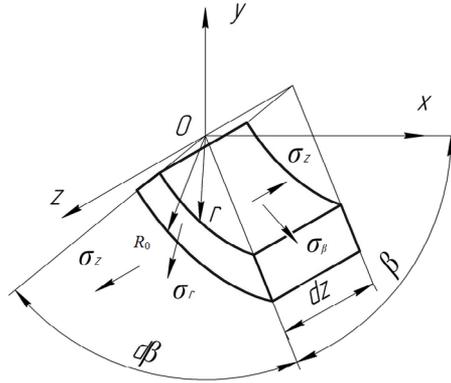
$$\cos \gamma = - \frac{R_0 \cdot \omega^2}{g} \cos(n^{\wedge} \lambda),$$

или, принимая во внимание выражение (12):

$$\beta = \pi - \arccos \left( \frac{R_0 \cdot \omega^2}{g \cdot \cos \alpha} \cos(n^{\wedge} \lambda) \right). \quad (22)$$

Для установившегося режима действующей шелушильно-сушильной машины угол наклона машины  $\alpha$  и выштамповки ситового цилиндра  $\beta$  существенно влияют на расход электрической энергии на процесс обработки зерна. Интенсивность шелушения зерна в рабочем кольцевом зазоре машины зависит в большей степени от модулей нормальных и касательных сил, приложенных к зерновкам в результате их трения о рабочие органы машины (абразивные диски и ситовой цилиндр), при этом зерновки подвергаются действию тангенциальных  $\sigma_{\beta}$ , радиальных  $\sigma_r$  и осевых напряжений  $\sigma_z$ , обеспечивающих эффективное шелушение зерна (рис 4). При этом следует также иметь в виду, что существуют факторы, влияющие на эффективность шелушения, учитывая которые создает затруднения для комплексного описания исследуемого процесса. К ним относятся такие факторы, как увеличивающееся в функции времени количество отделенных оболочек, создающих условия для изменения коэффициентов внутреннего и внешнего трения смеси зерна с продуктами шелушения; коэффициент заполнения рабочей зоны машины, определяющий плотность укладки зерновой массы; количество аспирируемого воздуха и его относительная влажность и т. д.

Аналитическое обоснование траекторий и скоростей зерновок внутри машины, находящихся под действием комплекса сил (движения и сопротивления), представляют значительную сложность в связи со стесненным перемещением зерновок в рабочей зоне машины. Поэтому энергетическую оценку процесса шелушения зерна необходимо рассматривать с упрощающими допущениями применительно к зонам его непосредственного контакта с абразивными дисками и ситовым цилиндром: размеры частиц исследуемой зерновой массы незначительны, по сравнению с рассматриваемой об-



Р и с. 4. Схема элементарного зернового объема к определению мощности для преодоления сил трения зернового слоя о поверхность ситового цилиндра

F i g. 4. Elementary grain volume scheme to determine power to overcome grain layer friction forces against sieve cylinder surface

ластью, и ее можно представить как сплошное тело с плотностью  $\rho$ ; коэффициент сопротивления внутреннему сдвигу слоев постояен (при осредненном коэффициенте плотности укладки).

Для достижения равномерного съема оболочек с поверхности всех обрабатываемых зерен важным является установление закономерности статистически преобладающей ориентации их продольных осей относительно рабочих органов, что позволяет обоснованно выбирать размеры элементов рабочей зоны машины, в частности радиального кольцевого зазора между абразивными дисками и ситовым барабаном, в котором происходит интенсивный сдвиговый процесс.

Для принятой осесимметричной естественной цилиндрической системы координат  $r; z; \beta$  выражение для определения мощности для преодоления сил трения зернового слоя о поверхность ситового барабана площадью  $S$  представим в виде:

$$P = \iint_S \left| \bar{\tau}_0 \left( \bar{\mathcal{G}}_{\beta_{R_0}} + \bar{\mathcal{G}}_{z_{R_0}} \right) \right| dS = f \iint_S \left| \bar{\sigma}_{r_{R_0}} \left( \bar{\mathcal{G}}_{\beta_{R_0}} + \bar{\mathcal{G}}_{z_{R_0}} \right) \right| dS, \quad (23)$$

где  $\bar{\tau}_0$  – касательное напряжение, Па;  $\left( \bar{\mathcal{G}}_{\beta_{R_0}} + \bar{\mathcal{G}}_{z_{R_0}} \right)$  – вектор результирующей скорости зерен в плоскости, касательной к ситовому барабану;  $\sigma_{r_{R_0}}$  – радиальное давление зерна на поверхность ситового барабана, Па.

Так как касательное напряжение  $\bar{\tau}_0$  противоположно скорости сдвига зерна по винтовой траектории, можно записать:

$$\begin{aligned} \left| \bar{\tau}_0 \left( \bar{\mathcal{G}}_{\beta_{R_0}} + \bar{\mathcal{G}}_{z_{R_0}} \right) \right| &= \\ &= \left| f \sigma_{r_{R_0}} \sqrt{\mathcal{G}_{\beta_{R_0}}^2 + \mathcal{G}_{z_{R_0}}^2} \cos \pi \right| = \\ &= f \sigma_{r_{R_0}} \sqrt{\mathcal{G}_{\beta_{R_0}}^2 + \mathcal{G}_{z_{R_0}}^2}. \end{aligned} \quad (24)$$

Подставив выражение (24) в (23) и учитывая, что  $dS = 2\pi R_0 dz$ , получим:

$$P = 2\pi R_0 dz f \int_0^L \sigma_{r_{R_0}} \sqrt{\mathcal{G}_{\beta_{R_0}}^2 + \mathcal{G}_{z_{R_0}}^2}, \quad (25)$$

где

$$\mathcal{G}_{z_{R_0}} = \omega \cdot l \cdot \left( 2 \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} + \beta\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)}{\cos \phi} - \cos \beta \right). \quad (26)$$

Анализ выражения (26) показывает, что осевая скорость зерна является функцией нескольких переменных и зависит от геометрических параметров фрикционных рабочих органов: угла наклона высштамповки ситового цилиндра  $\beta$  и ее длины  $l$ , коэффициента внутреннего трения зерновой массы  $f = \operatorname{tg} \varphi$  и угловой скорости вала  $\omega$ .

В выражение (26) не входят размеры кольцевого сечения рабочей зоны, однако его влияние определяется угловой скоростью вала, а вследствие малой величины радиального зазора между ситовым цилиндром и поверхностью абразивного диска оно обусловлено и угловой скоростью зерновой массы, вычисляемой по формуле:

$$\omega = \frac{v_{\beta R_0}}{r + k},$$

где  $v_{\beta R_0}$  – окружная скорость зерновой массы, описывающей окружность радиуса  $r + k$ ;  $r$  – радиус абразивных дисков, м;  $k$  – ширина кольцевого зазора между абразивными дисками и ситовым цилиндром, м.

### Обсуждение и заключение

Проанализировав траекторию движения зерна, находящегося на поверхности наклонного ситового цилиндра, получили выражения (20), (22), связывающие форму наклонной линии высштамповки цилиндра, характеризующую углом  $\beta$ , с углом наклона цилиндра  $\alpha$ , его радиусом  $R_0$ , угловой скоростью вала с абразивными дисками, фрикционными свойствами зер-

на. При радиусе ситового цилиндра  $R_0 = 0,135$  м, горизонтальном расположении цилиндра  $\alpha = 0$  и угловой скорости вала  $\omega = 90$  рад/с минимальный угол наклона высштамповки цилиндра составляет  $\beta = 22^\circ$ .

Получено аналитическое выражение для расчета мощности (25), необходимой для преодоления сил внешнего трения зернового слоя о элементы поверхности ситового цилиндра, в зависимости от угловой скорости вала с абразивными дисками и связанного с ней угла наклона машины  $\alpha$  и угла наклона высштамповки ситового цилиндра  $\beta$  (22). При радиусе ситового цилиндра  $R_0 = 0,135$  м, ширине рабочего кольцевого зазора  $k = 0,01$  м, длине цилиндра  $L = 0,4$  м, горизонтальном расположении цилиндра ( $\alpha = 0$ ), угловой скорости вала  $\omega = 90$  рад/с,  $\beta = 22^\circ$  расчетная мощность составила  $P = 4,5$  кВт.

Необходимо отметить, что поскольку реальные зерновки пшеницы значительно отличаются от материальных точек и значений сил трений, и сопротивления среды, являющихся членами уравнений движения, во многих случаях изменяющих свой характер во время движения, то и значения кинематических элементов движения, полученные в результате аналитического решения этих уравнений, также будут отличаться от реальных значений. Поэтому полученные параметры следует считать приближенными и требующими уточнения на основании экспериментальных исследований.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Анисимов, А. В. Усовершенствованная система для автоматического управления температурой и влажностью зерна при подготовке к помолу / А. В. Анисимов // Аграрный научный журнал. – 2015. – № 6. – С. 53–56. – URL: [http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/37/2015\\_6](http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/37/2015_6) (дата обращения: 22.10.2020). – Рез. англ.
2. Кондрок, Р. Х. Роль шелушения зерна в технологии переработки твердой пшеницы / Р. Х. Кондрок, Г. Н. Панкратов // Хлебопродукты. – 2013. – № 3. – С. 44–45. – URL: <https://khlebprod.ru/74-texts/журналы-13-года/03-13/657-2013-04-01-08-45-51> (дата обращения: 22.10.2020). – Рез. англ.

3. **Журба, О. С.** Влияние шелушения зерна на параметры процесса его измельчения / О. С. Журба, А. В. Карамзин, Л. Н. Крикунова // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2012. – № 8. – С. 18–23. – URL: <http://www.foodprom.ru/journals/khranenie-i-pererabotka-selkhozsyrya/131-khraneniei-pererabotka-selkhozsyrya-8-2012> (дата обращения: 22.10.2020). – Рез. англ.
4. Adherence within Biological Multilayered Systems: Development and Application of a Peel Test on Wheat Grain Peripheral Tissues / M. R. Martelli, C. Barron, F. Mabilie [et al.]. – DOI 10.1016/j.jcs.2010.03.007 // Journal of Cereal Science. – 2010. – Vol. 52, Issue 1. – Pp. 83–89. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0733521010000561?via%3Dihub> (дата обращения: 22.10.2020).
5. **Анисимов, А. В.** Экспериментальное определение оптимальных параметров оборудования для обработки зерна при подготовке к помолу / А. В. Анисимов, Ф. Я. Рудик. – DOI 10.15507/2658-4123.029.201904.594-613 // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 4. – С. 594–613. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/86-19-4/743-10-15507-0236-2910-029-201904-8> (дата обращения: 22.10.2020). – Рез. англ.
6. Опыт подготовки зерна пшеницы к помолу с предварительным отделением оболочек / Ж. С. Алимкулов, Г. А. Егоров, Б. М. Максимчук [и др.] // Экспресс-информация. – 1979. – Т. 1, Вып. 7. – С. 22.
7. **Анисимов, А. В.** Совершенствование технологии подготовки зерна к помолу на малых предприятиях / А. В. Анисимов, Ф. Я. Рудик, Б. П. Загородских. – DOI 10.15507/0236-2910.028.201804.603-623 // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 4. – С. 603–623. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/75-18-4/577-10-15507-0236-2910-028-201804-9> (дата обращения: 22.10.2020). – Рез. англ.
8. **Верещинский, А.** Подготовка зерна шелушением на мельницах сортовых помолов пшеницы большой производительности / А. Верещинский // Хлебопродукты. – 2010. – № 1. – С. 32–33. – Рез. англ.
9. Влияние способов увлажнения зерна овса при гидротермической обработке на эффективность его шелушения / В. В. Беляев, Д. Е. Овчаров, Л. В. Анисимова, О. И. А. Ахмед // Горизонты образования. – 2017. – № 19. – С. 1–4. – URL: <https://docplayer.ru/79223470-Vliyanie-sposobov-uvlazhneniya-zerna-ovsa-pri-gidrotermicheskoy-obrabotke-na-effektivnost-ego-shelusheniya-im-i-i-polzuvnaya-g.html> (дата обращения: 22.10.2020). – Рез. англ.
10. **Перов, А. А.** Способы шелушения зерна / А. А. Перов // Комбикорма. – 2010. – № 3. – С. 45–46. – Рез. англ.
11. **Верещинский, А. П.** Эффективность шелушильно-шлифовальных машин «Каскад» при подготовке зерна пшеницы в сортовых помолах / А. П. Верещинский // Хлебопродукты. – 2012. – № 11. – С. 40–41. – Рез. англ.
12. **Анисимов, А. В.** Моделирование основных конструктивно-технологических параметров шелушильно-сушильной машины / А. В. Анисимов // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2014. – № 4. – С. 40–43. – URL: [http://agroj.ru/index.php/asj/issue/view/23/2014\\_4](http://agroj.ru/index.php/asj/issue/view/23/2014_4) (дата обращения: 22.10.2020). – Рез. англ.
13. **Дударев, И. Р.** Шелушение увлажненной пшеницы / И. Р. Дударев // Хранение и переработка зерна. – 1973. – № 2. – С. 34–35.
14. Энергетическая оценка процесса шелушения увлажненного зерна в роторно-лопастной машине / Г. А. Глобенко, Б. Отмани, И. В. Настагуни, И. Р. Дударев // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 1991. – № 1–3. – С. 106–108. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/energeticheskaya-otsenka-protsessha-shelusheniya-uvlazhennogo-zerna-v-rotornolopastnoy-mashine> (дата обращения: 22.10.2020).
15. **Маланичев, И. В.** Компьютерная модель процесса пневмомеханического шелушения зерна гречихи / И. В. Маланичев // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2008. – Т. 1, № 7. – С. 169–171.
16. **Анисимов, А. В.** Пути повышения эффективности процесса переработки зерна на малых предприятиях / А. В. Анисимов // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2012. – № 8. – С. 38–42. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10035-005-0211-4> (дата обращения: 22.10.2020). – Рез. англ.

17. Effects of End Wall Friction in Rotating Cylinder Granular Flow Experiments / J. E. Maneval, K. M. Hill, B. E. Smith [et al.]. – DOI [10.1007/s10035-005-0211-4](https://doi.org/10.1007/s10035-005-0211-4) // Granular Matter. – 2005. – Vol. 7, Issue 4. – Pp. 199–202. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10035-005-0211-4> (дата обращения: 22.10.2020).

18. Lu, G. The Parameters Governing the Coefficient of Dispersion of Cubes in Rotating Cylinders / G. Lu, J. R. Third, C. R. Müller. – DOI [10.1007/s10035-016-0693-2](https://doi.org/10.1007/s10035-016-0693-2) // Journal of Granular Matter. – 2017. – Vol. 19, Issue 12. – Pp. 1–6. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10035-016-0693-2> (дата обращения: 22.10.2020).

19. Radial Mixing and Segregation of Granular Bed Bi-Dispersed Both in Particle Size and Density within Horizontal Rotating Drum / H. Chen, X. Zhao, Y. Xiao [et al.]. – DOI [10.1016/S1003-6326\(16\)64110-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64110-9) // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2016. – Vol. 26, Issue 2. – Pp. 527–535. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1003632616641109?via%3Dihub> (дата обращения: 22.10.2020).

20. Forced Axial Segregation in Axially Inhomogeneous Rotating Systems / S. González, C. R. K. Windows-Yule, S. Luding [et al.]. – DOI [10.1103/PhysRevE.92.022202](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.92.022202) // Physical Review E. – 2015. – Vol. 92, Issue 2. – URL: <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.92.022202> (дата обращения: 22.10.2020).

21. Патент № 147608 Российская Федерация, МПК В02В 3/02. Горизонтальная шелушильно-сушильная машина : № 2014123561/13 : заявл. 09.06.2014 : опубл. 10.11.2014 / Анисимов А. В., Анисимова М. С. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ. – 7 с.

*Поступила 01.06.2020; принята к публикации 10.08.2020; опубликована онлайн 30.12.2020*

*Об авторах:*

**Анисимов Александр Владимирович**, доцент кафедры технологии производства и переработки продукции животноводства ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (410012, Российская Федерация, г. Саратов, Театральная пл., д. 1), кандидат технических наук, Researcher ID: E-7817-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5313-6329>, [anisimovaleksan@mail.ru](mailto:anisimovaleksan@mail.ru)

**Рудик Феликс Яковлевич**, профессор кафедры технологий продуктов питания ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (410012, Российская Федерация, г. Саратов, Театральная пл., д. 1), доктор технических наук, Researcher ID: E-8546-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0115>, [k-pappsgau@rambler.ru](mailto:k-pappsgau@rambler.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

А. В. Анисимов – подготовка начального текста с последующей доработкой, проведение исследований, анализ исследований, визуализация; Ф. Я. Рудик – научное руководство, анализ и доработка текста.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Anisimov A.V. An Improved System for Automatic Control of Grain Temperature and Moisture Content in Preparation for Grinding. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2015; (6):53-56. Available at: [http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/37/2015\\_6](http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/37/2015_6) (accessed 22.10.2020). (In Russ.)

2. Kondrokov R.Kh., Pankratov G.N. The Role of Grain Peeling in Durum Wheat Processing. *Khlebo-produkty = Bakery Products*. 2013; (3):44-45. Available at: <https://khlebprod.ru/74-texts/журналы-13-года/03-13/657-2013-04-01-08-45-51> (accessed 22.10.2020). (In Russ.)

3. Zhurba O.S., Karamzin A.V., Krikunova L.N., et al. Influence of a Peeling of Grain on Parameters of Process of Its Crushing. *Khranenie i pererabotka selkhozsyrya* = Storage and Processing of Farm Products. 2012; (8):18-23. Available at: <http://www.foodprom.ru/journals/khranenie-i-pererabotka-selkhozsyrya/131-khraneniei-pererabotka-selkhozsyrya-8-2012> (accessed 22.10.2020). (In Russ.)
4. Martelli M.R., Barron C., Mabile F., et al. Adherence within Biological Multilayered Systems: Development and Application of a Peel Test on Wheat Grain Peripheral Tissues. *Journal of Cereal Science*. 2010; 52(1):83-89. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.03.007>
5. Anisimov A.V., Rudik F.Ya. The Experimental Determination of Optimum Parameters of the Equipment for Processing Grain in Preparation for Grinding. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(4):594-613. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.594-613>
6. Alimkulov Zh.S., Egorov G.A., Maksimchuk B.M., et al. [Experience of Preparation of Seed of Wheat for a Grinding with Preliminary Office of Envelopes]. *Ekspress-informatsiya* = Express Information. 1979; 1(7):22. (In Russ.)
7. Anisimov A.V., Rudik F.Ya., Zagorodskih B.P. Technological Improvements of Grain Preparation for Milling in Small Enterprises. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(4):603-623. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.603-623>
8. Vereshchinsky A. Grain Preparation by Peeling on Mills High-Quality Grindings of Wheat of Big Efficiency. *Khleboпродукты* = Bakery Products. 2010; (1):32-33. (In Russ.)
9. Belyaev V.V., Ovcharov D.E., Anisimova L.V., et al. Influence of Methods of Oat Grain Moistening at Hydrothermal Treatment on Its Peeling Efficiency. *Gorizonty obrazovaniya* = Horizons of Education. 2017; 19:1-4 Available at: <https://docplayer.ru/79223470-Vliyanie-sposobov-uvlazhneniya-zerna-ovsa-pri-gidrotermicheskoy-obrabotke-na-effektivnost-ego-shelusheniya-im-i-i-polzunova-g.html> (accessed 22.10.2020). (In Russ.)
10. Perov A.A. Ways of Peeling Grain. *Kombikorma* = Compound Feeds. 2010; (3):45-46. (In Russ.)
11. Vereshchinsky A.P. Effectiveness Peeling-Rubbing Machines “Cascade” by Wheat Seed Preparation in High-Quality Grindings. *Khleboпродукты* = Bakery Products. 2012; (11):40-41. (In Russ.)
12. Anisimov A.V. Modeling of the Main Constructive and Technological Parameters for Peeling and Drying Machine. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova* = Vavilov Saratov State Agrarian University Bulletin. 2014; (4):40-43. Available at: [http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/23/2014\\_4](http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/23/2014_4) (accessed 22.10.2020). (In Russ.)
13. Dudarev I.R. [Pilling of Moistened Wheat]. *Khranenie i pererabotka zerna* = Storage and Processing of Grain. 1973; (2):34-35. (In Russ.)
14. Globenko G.A., Otmani B., Nastagunin I.V., et al. [Energy Assessment of Wetted Grain Peeling Process in Rotary Blade Machine]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya* = News of Higher Education Institutions Food Technology. 1991; 1(3):106-108. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/energeticheskaya-otsenka-protssessa-shelusheniya-uvlazhnnogo-zerna-v-rotornolopastnoy-mashine> (accessed 22.10.2020). (In Russ.)
15. Malanichev I.V. [Computer Model of Pneumatic-Mechanical Buckwheat Grain Peeling Process]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Kazan State Agrarian University Bulletin. 2008; 1(7):169-171. (In Russ.)
16. Anisimov A.V. Ways of Improving the Efficiency of Grain Processing at Small-Scale Enterprises. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova* = Vavilov Saratov State Agrarian University Bulletin. 2012; (8):38-42. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10035-005-0211-4> (accessed 22.10.2020). (In Russ.)
17. Maneval J.E., Hill K.M., Smith B.E., et al. Effects of End Wall Friction in Rotating Cylinder Granular Flow Experiments. *Granular Matter*. 2005; 7(4):199-202. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10035-005-0211-4>
18. Lu G., Third J.R., Müller C.R. The Parameters Governing the Coefficient of Dispersion of Cubes in Rotating Cylinders. *Journal of Granular Matter*. 2017; 19(12):1-6. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10035-016-0693-2>

19. Chen H., Zhao X., Xiao Y., et al. Radial Mixing and Segregation of Granular Bed Bi-Dispersed Both in Particle Size and Density within Horizontal Rotating Drum. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2016; 26(2):527-535. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64110-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64110-9)
20. González S., Windows-Yule C.R.K., Luding S., et al. Forced Axial Segregation in Axially Inhomogeneous Rotating Systems. *Physical Review E*. 2015; 92(2). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.92.022202>
21. [Horizontal Flaking Dryer]: Patent 147608 Russian Federation. No. 2014123561/13; appl. 09.06.2014; publ. 10.11.2014. 7 p. (accessed 22.10.2020). (In Russ.)

*Received 01.06.2020; revised 10.08.2020; published online 30.12.2020*

*About the authors:*

**Alexander V. Anisimov**, Associate Professor of Chair of Technology of Production and Processing of Livestock Products, Saratov State Agrarian University (1 Theatre Sq., Saratov 410012, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: E-7817-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5313-6329>, [anisimovaleksan@mail.ru](mailto:anisimovaleksan@mail.ru)

**Feliks Ya. Rudik**, Professor of Chair of Technologies of Food Products, Saratov State Agrarian University (1 Theatre Sq., Saratov 410012, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: E-8546-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0115>, [k-pappsgau@rambler.ru](mailto:k-pappsgau@rambler.ru)

*Contribution of the authors:*

A. V. Anisimov – preparation of the initial text with further refinement, conducting research, analysis of research, visualization; F. Ya. Rudik – scientific guidance, analysis and text refinement.

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



## Обеспечение устойчивости транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения при торможении на шинах сверхнизкого давления

У. Ш. Вахидов, А. А. Куркин, Л. С. Левшунов,  
Ю. И. Молев\*, Д. Н. Прошин, А. В. Согин  
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический  
университет им. Р. Е. Алексеева» (г. Нижний Новгород,  
Российская Федерация)

\*moleff@yandex.ru

*Введение.* Повышение эффективности сельскохозяйственных работ, перемещение людей и грузов в условиях бездорожья невозможно без создания новой, высокоэффективной внедорожной техники, обладающей низким давлением на опорную поверхность. Универсальность применения данной техники накладывает на ее конструкцию дополнительные ограничения, связанные с обеспечением безопасности движения на дорогах общего пользования. Так, для обеспечения необходимой эффективности торможения при применении колес увеличенного диаметра требуются изменения в конструкции тормозных механизмов, так как для развития стандартного тормозного усилия, в соответствии с техническим регламентом о безопасности колесных транспортных средств, на колесах увеличенного диаметра нужно развитие большего тормозного момента.

*Материалы и методы.* В статье предложена модель расчета параметров торможения транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения, оснащенных колесами сверхнизкого давления. Модель отличается от применяемых ранее тем, что выходным параметром в ней является не эффективность торможения, а разница во времени возникновения блокировки передней и задней осей.

*Результаты исследования.* Выполнение условия опережающей блокировки передней оси обеспечивает устойчивость движения трактора при экстренном торможении, что положительным образом сказывается на безопасности дорожного движения. Полученные результаты позволяют утверждать, что для обеспечения безопасности движения данной техники, оснащенной шинами сверхнизкого давления по дорогам общего пользования, необходимо, чтобы соотношение расстояния от центра масс до передней оси было как минимум не меньше, чем расстояние от центра масс до опорной поверхности движения.

*Обсуждение и заключение.* Предложенная математическая модель показала свою адекватность. Полученные зависимости позволяют обосновать разные технические решения для обеспечения безопасности дорожного движения транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения, оснащенных шинами сверхнизкого давления. Так, предельно допустимая величина высоты центра масс может быть принята равной 90 % от расстояния от расположения центра масс транспортно-технологической машины сельскохозяйственного назначения до его передней (управляемой) оси.



**Ключевые слова:** безопасность движения, торможение, устойчивость, центр масс, занос, транспортно-технологические машины сельскохозяйственного назначения, колеса сверхнизкого давления

**Финансирование:** исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда автомобилей ГАЗель Next с новой электронной архитектурой электронных систем» по Соглашению № 075-11-2019-027 от 29.11.2019 (постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года № 218).

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

**Для цитирования:** Обеспечение устойчивости транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения при торможении на шинах сверхнизкого давления / У. Ш. Вахидов, А. А. Куркин, Л. С. Левшунов [и др.]. – DOI [10.15507/2658-4123.030.202004.609-623](https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.609-623) // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 609–623.

*Original article*

## Ensuring the Stability of Agricultural Transport and Technological Machines Equipped with Ultra-Low Pressure Tires during Braking

U. Sh. Vakhidov, A. A. Kurkin, L. S. Levshunov,

Iu. I. Molev\*, D. N. Proshin, A. V. Sogin

*Nizhny Novgorod State Technical University*

*(Nizhny Novgorod, Russian Federation)*

\**moleff@yandex.ru*

**Introduction.** Improving the efficiency of agricultural operations and off-road logistics require new highly efficient non-road machinery with low pressure on road surface. The versatility of the use of this machinery imposes additional requirements on its design, including those related to road traffic safety on public roads. Changes in brake design are required to ensure safe braking performance when larger diameter wheels are used for the reason that to produce standard braking force according to the technical regulations for the safety of wheeled vehicles, requires more braking torque when using larger diameter wheels.

**Materials and Methods.** The article proposes a model for calculating the braking parameters of transport and technological agricultural machines equipped with ultra-low pressure wheels. The model differs from those used earlier in that its output parameter is not the braking efficiency, but the time difference between the front and rear axle locks.

**Results.** Fulfilling the condition of the front axle advance locking ensures the stability of the tractor motion during emergency braking that has a positive effect on road traffic safety. The results of the study suggest that to ensure the safe motion of the machines equipped with ultra-low pressure tires on public roads, it is necessary that the ratio of the distance from the center of mass to the front axle is at least not less than the distance from the center of mass to the road surface.

**Discussion and Conclusion.** The proposed mathematical model has shown its adequacy. The obtained mathematical dependencies allow us to justify different technical solutions for ensuring safe road movement of transport and technological agricultural machines equipped with ultra-low pressure tires. Thus, the maximum permissible height of the center of mass can be assumed to be equal to 90% of the distance from the location of the center of mass of an agricultural transport and technological machine to its front (controlled) axis.

**Keywords:** traffic safety, braking, stability, center of mass, skid, agricultural transport and technological machines, ultra-low pressure wheels

**Funding:** The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation: Project “Creation of high-tech production of GAZelle Next vehicles with new electronic architecture of electronic systems” under Agreement No. 075-11-2019-027 of 29 November 2019 (Resolution of the Government of the Russian Federation No. 218 of 9 April 2010).

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

**For citation:** Vakhidov U.Sh., Kurkin A.A., Levshunov L.S., et al. Ensuring the Stability of Agricultural Transport and Technological Machines Equipped with Ultra-Low Pressure Tires during Braking. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(4):609-623. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.609-623>

## Введение

В настоящее время автомобили и тракторы на шинах сверхнизкого давления с увеличенными диаметрами колес находят широкое применение в агропромышленном комплексе на всей территории Российской Федерации. Указанная техника, согласно требованиям руководства по эксплуатации, может применяться и на дорогах общего пользования (при условии движения со скоростью не более 70 км/ч), то есть с точки зрения безопасности дорожного движения должна соответствовать требованиям Технического регламента о безопасности колесных транспортных средств, в том числе требованиям по обеспечению устойчивости движения транспортного средства при торможении (условиям отсутствия заноса)<sup>1</sup>. Также транспортно-технологические машины сельскохозяйственного назначения должны соответствовать требованиям ГОСТа 12.2.019-86, согласно которым тормозные системы данной техники должны обеспечивать удельную тормозную силу на сухом асфальте не меньшую чем 0,46<sup>2</sup>.

Следует отметить, что в транспортном потоке автомобильных дорог общего пользования доля рассматриваемой

техники невелика и не превышает 0,01 %. В таких условиях составить репрезентативную выборку причин возникновения различных аварий не представляется возможным. Исходя из открытых источников информации, можно утверждать, что ДТП с указанной техникой имеют место быть (рис. 1 и 2), причем часть из них связана с недостаточной эффективностью торможения, в том числе и на обледенелой дороге, а часть – с потерей устойчивости при экстренном торможении [1; 2].

Таким образом, научные исследования, связанные с обеспечением устойчивости сельскохозяйственных машин при движении по дорогам общего пользования, являются актуальной научной задачей, особенно в свете того, что навесное оборудование, устанавливаемое на них, вследствие большей габаритной ширины приводит к выезду на встречную полосу при малейшем отклонении от прямолинейного движения.

## Обзор литературы

В настоящее время проводятся многочисленные исследования по оценке влияния различных конструкционных факторов транспортно-технологических машин на безопасность дорожного дви-

<sup>1</sup> ТР ТС 018/2011. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств» (с изменениями на 21 июня 2019 года); ГОСТ Р 41.13-99 (Правила ЕЭК ООН № 13). Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения механических транспортных средств категорий М, N и O в отношении торможения.

<sup>2</sup> ГОСТ 12.2.019-86. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Тракторы и машины самоходные сельскохозяйственные. Общие требования безопасности (с Изменениями № 1-8).



Р и с. 1. ДТП с транспортным средством на колесах со сверхнизким давлением, обусловленное недостаточной эффективностью торможения<sup>3</sup>

F i g. 1. Road accident with a vehicle equipped with ultra-low pressure, due to low braking efficiency



Р и с. 2. Типичное ДТП, связанное с потерей управляемости комбайна при экстренном торможении на автомобильной дороге<sup>4</sup>

F i g. 2. Road accident caused by the combine harvester control loss during emergency braking on the highway

<sup>3</sup> Авария дня. Водитель вездехода «Трэкол» устроил ДТП [Электронный ресурс]. URL: <https://fishki.net/auto/2449168-avarija-dnja-voditely-vezdehoda-trjekol-ustroil-v-dtp.html> (дата обращения: 26.10.2020).

<sup>4</sup> Комбайн – горячие посты [Электронный ресурс]. URL: <https://fishki.net/tag/kombajn/hot/> (дата обращения: 26.10.2020).

жения. При этом сложилась устойчивая методика проведения исследования – сначала статистическими методами определяется степень влияния того или иного параметра транспортного средства на безопасность дорожного движения, а потом с использованием методов математического моделирования демонстрируется возможность изменения параметров движения и изменения аварийности на дорогах [3]. Наиболее полно статистические методы оценки влияния изменения технического состояния транспортных средств на безопасность дорожного движения показаны в работах иностранных авторов [4; 5]. Также дана статистическая оценка аварийности именно внедорожных машин [6–8]. В другом исследовании приведены результаты статистического исследования, связанного с движением транспортных и технологических средств именно по сельским дорогам, где вероятность попадания в ДТП сельскохозяйственной техники особенно велика [9]. Авторами установлено, что более 30 % ДТП связано именно с недостаточной эффективностью торможения: выезд за габариты полосы движения (недостаток устойчивости) имел место в 5 % ДТП, а на скользких покрытиях до 15 % [3].

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в настоящее время достаточно полно изучена и широко применяется теория математической статистики для определения степени влияния того или иного параметра транспортных и технологических средств на безопасность дорожного движения. При этом установлено, что одним из основополагающих факторов, влияющих на аварийность колесных тракторов, является эффективность торможения и устойчивость машины при данном режиме движения. В настоящее время основным направлением научных исследований, направленным на обеспечение безопасности дорожного движения, является

широкое применение электронных систем, таких как ABS, ESP и пр. [10–13]. Отсутствие технической возможности установки электронных систем на транспортно-технологические машины сельскохозяйственного назначения на шинах сверхнизкого давления диктует необходимость проведения исследования работы тормозной системы без каких-либо электронных систем помощи водителю [14]. При этом данная система должна обеспечивать как необходимую эффективность торможения, так и устойчивость движения машины в режиме проскальзывания колес по поверхности дороги. Следует учитывать, что внедорожные шины (даже в условиях создания более высокого давления при движении по дорогам общего пользования) обладают повышенным износом, приводящим к неравномерности взаимодействия колес с дорогой, а также, кроме обеспечения значительного клиренса, приводят к увеличению высоты центра масс машины [15; 16]. При этом вопросам возникновения заноса транспортных и технологических машин в указанных специфических условиях взаимодействия не уделяется должного внимания [17]. Наиболее близкой к описываемому процессу является работа В. Ванцевича, однако в ней изменение траектории движения на шинах низкого давления изучается с точки зрения бортового поворота, а не экстренного торможения [18–20].

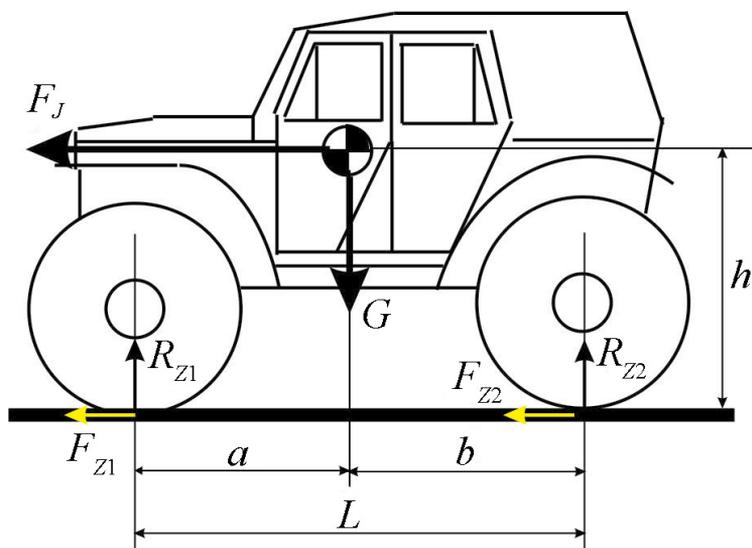
### **Материалы и методы**

Согласно теории движения колесных транспортных средств они будут устойчивыми на дороге, если блокировка колес задней оси будет происходить позже, чем на передней [10; 21]. В современных конструкциях таких машин данный порядок изменения тормозных схем при экстренном торможении реализуется либо с использованием регулятора тормозных схем, либо программно при помощи блока управления ABS [11; 12; 21]. Следует отметить, что применение штатных узлов и деталей серийно

выпускаемых автомобилей для производства транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения на шинах сверхнизкого давления кроме положительного эффекта, выраженного в снижении себестоимости продукции, имеет и отрицательную сторону, к которой относится отсутствие технической возможности внести изменения как в конструкцию регулятора тормозных сил, так и в блок управления ABS. Поэтому все конструкции тормозной системы современных машин с шинами сверхнизкого давления подразумевают отсутствие механизмов, регулирующих изменение тормозного усилия по осям, что отрицательно ска-

зывается на эффективности торможения и устойчивости таких автомобилей [10; 17; 21]. Схема сил, действующих на транспортно-технологическую машину сельскохозяйственного назначения на колесах сверхнизкого давления при экстренном торможении, проиллюстрирована на рисунке 3.

Величина сцепного веса для разных типов транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения и условий загрузки различна. Так, для нерегулируемой тормозной системы, характерной для применения на технике, оснащенной колесами сверхнизкого давления, ее значение может быть найдено из условия<sup>5</sup>:



Р и с. 3. Силы, действующие на транспортно-технологическую машину сельскохозяйственного назначения при торможении:  $G$  – вес автомобиля;  $R_{z1}$  – нормальная реакция дороги на передней оси;  $R_{z2}$  – нормальная реакция дороги на задней оси;  $F_{z1}$  – тормозная сила, действующая на переднюю ось;  $F_{z2}$  – тормозная сила, действующая на заднюю ось;  $F_J$  – сила инерции трактора;  $L$  – колесная база трактора;  $h$  – высота центра тяжести трактора;  $a$  – расстояние от центра масс до передней оси;  $b$  – расстояние от центра масс до задней оси

Fig. 3. Forces acting on the vehicle when braking:  $G$  – vehicle weight;  $R_{z1}$  – normal road response on the front axle;  $R_{z2}$  – normal reaction of the road on the rear axle;  $F_{z1}$  – braking force acting on the front axle;  $F_{z2}$  – braking force acting on the rear axle;  $F_J$  – inertial force of the vehicle;  $L$  – wheelbase of the vehicle;  $h$  – height of the tractor’s center of gravity;  $a$  – distance from the center of mass to the front axle;  $b$  – distance from the center of mass to the rear axle

<sup>5</sup> Соцков Д. А. Повышение активной безопасности автотранспортных средств при торможении: дисс. ... д-ра техн. наук. Владимир, 1988. 547 с.

$$m(\phi) = \begin{cases} \frac{1}{1 + \frac{h}{b}(\phi_0 - \phi)}, & \text{где } \phi < \phi_0 \\ \frac{1}{1 + \frac{h}{a}(\phi_0 + \phi)}, & \text{где } \phi > \phi_0 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\phi_0$  – коэффициент сцепления, при котором происходит одновременная блокировка колес передней и задней осей, определяемый из уравнения:

$$\phi_0 = \frac{\frac{a}{L}(1+k) - k}{\frac{h}{L}(1+k)} = \frac{a(1+k) - k}{h(1+k)} = \frac{a}{h} - \frac{k}{1+k}, \quad (2)$$

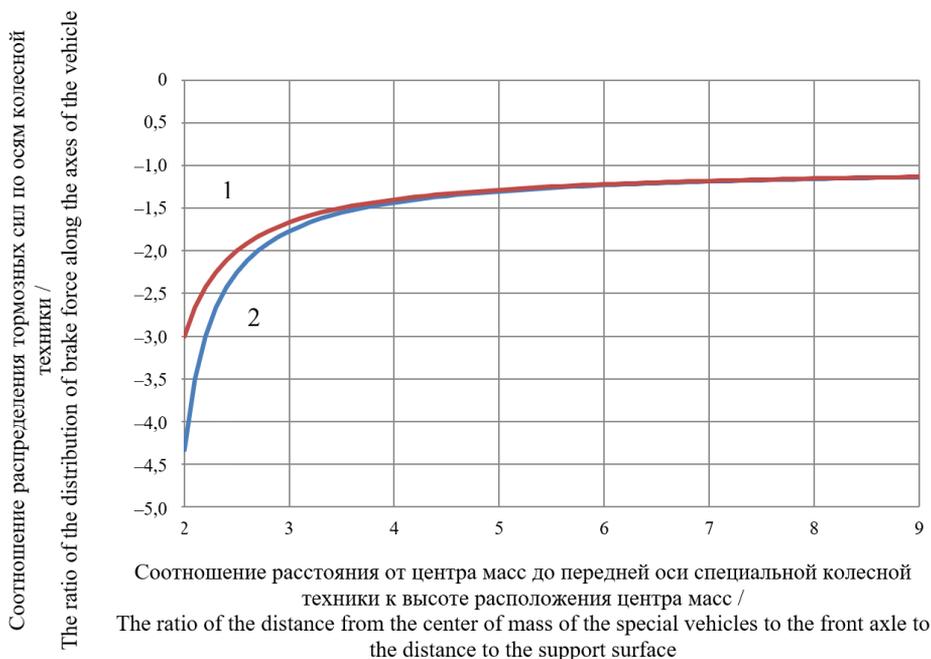
откуда:

$$\begin{aligned} \frac{k}{1+k} &= \frac{a}{h} - \phi_0 \rightarrow k = \frac{a}{h} - \phi_0 + \frac{a}{h}k - \phi_0k \rightarrow \\ \rightarrow k(1 + \phi_0 - \frac{a}{h}) &= \frac{a}{h} - \phi_0 \rightarrow k = \frac{\frac{a}{h} - \phi_0}{1 - (\frac{a}{h} - \phi_0)}, \quad (4) \end{aligned}$$

где  $k$  – соотношение тормозных сил по осям автомобиля. Решение уравнения (4) показано на рисунке 4.

Тогда максимальная эффективность торможения на дороге с сухим асфальтовым покрытием определяется как:

$$\begin{aligned} F_{\Sigma} &= F_{Z1} + F_{Z2} = 0,46mg = \\ &= 0,46(R_{Z1} + R_{Z2}) = R_{Z1}\phi + R_{Z2}k\phi, \end{aligned}$$



Р и с. 4. Необходимое соотношение тормозных сил по осям транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения, обеспечивающих его устойчивое движение во время торможения в условиях отсутствия регулятора тормозных сил: 1 – для коэффициента сцепления, при котором происходит блокировка задних колес, равного 0,7; 2 – для коэффициента сцепления, при котором происходит блокировка задних колес, равного 0,5

Fig. 4. The required ratio of braking forces along the vehicle wheel axes, ensuring its steady movement during braking in the absence of a brake force controller: 1 – for the coefficient of adhesion at which the rear wheels are locked equal to 0.7; 2 – for the coefficient of adhesion at which the rear wheels are locked equal to 0.5

откуда:

$$\begin{aligned} F_{\Sigma} &= F_{Z1} + F_{Z2} = 0,46mg = \\ &= 0,46(R_{Z1} + R_{Z2}) = R_{Z1}\phi + R_{Z2}k\phi = \\ &= mg\phi\left(\frac{a}{L} + \left(1 - \frac{a}{L}\right)k\right), \end{aligned}$$

то есть:

$$\frac{\frac{a}{h} - \phi_0}{1 - (\frac{a}{h} - \phi_0)} > \frac{0,66L - a}{L - a},$$

где  $\phi$  – коэффициент сцепления на сухом асфальте, равный 0,7 [3]. Решение полученных зависимостей показано на рисунке 4.

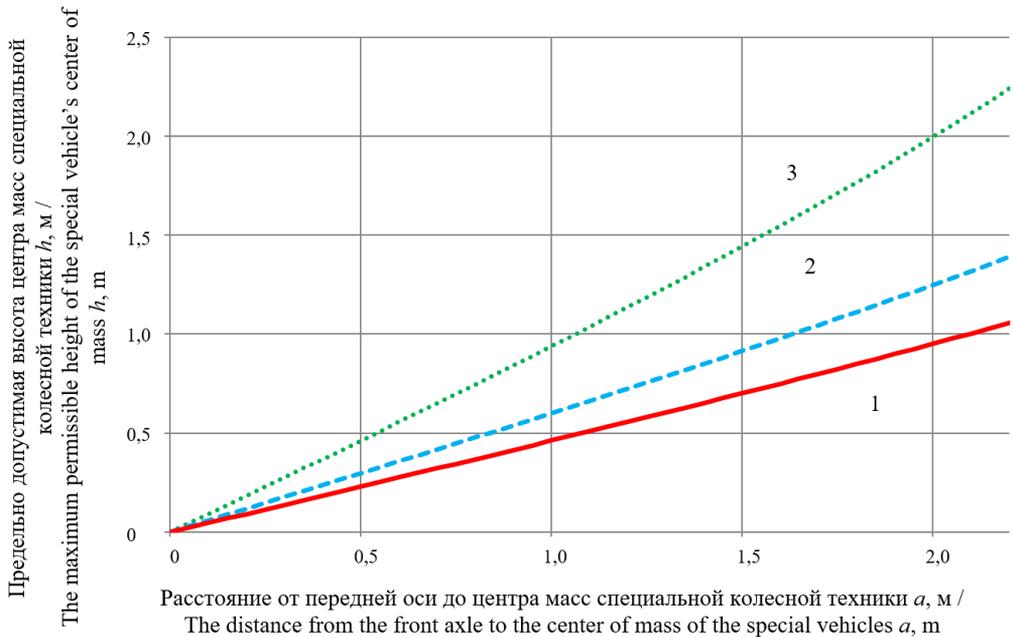
Тогда:

$$h < \frac{a}{\frac{0,66L - a}{1,66L - 2a} + \phi_0}.$$

Решение данной зависимости показано на рисунке 5.

### Результаты исследования

Полученные зависимости были проверены на специальной технике «Кержак» завода ООО «Трансмаш» (г. Нижний Новгород). Изменение центра тяжести достигалось загрузкой балластом грузовой платформы. Изменение его положения фиксировалось с использованием напольных автомо-



Р и с. 5. Предельно допустимая высота центра масс транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения на шинах сверхнизкого давления, обеспечивающая устойчивость машины и эффективность торможения на дорогах общего пользования:

1 – для опережающей блокировки задней оси при коэффициенте сцепления колеса с дорогой, равном 0,7; 2 – для опережающей блокировки задней оси при коэффициенте сцепления колеса с дорогой, равном 0,6; 3 – для опережающей блокировки задней оси при коэффициенте сцепления колеса с дорогой, равном 0,5

Fig. 5. Maximum permissible height of the agricultural machine mass center, ensuring the stability of the machine and the effectiveness of braking on public roads: 1 – for the coefficient of adhesion at which the rear wheels are locked equal to 0.7; 2 – for the coefficient of adhesion at which the rear wheels are locked equal to 0.6; 3 – for the coefficient of adhesion at which the rear wheels are locked equal to 0.5

бильных весов. Фиксация блокировки одной из осей проводилась визуально и с использованием высокоскоростной видеозаписи, исключающей возможность возникновения стробоскопического эффекта. Суммарная величина эффективного замедления трактора фиксировалась при помощи прибора «Эффект-2М».

Изменение соотношения тормозных сил по осям специальной техники достигалось уменьшением проходного сечения в тормозном контуре задней оси. Проведенные исследования показали высокую сходимость экспериментальных и теоретических данных. Максимальная погрешность получаемых результатов, необусловленная неравномерным износом шин, отклонением в прямолинейности установки управляемых колес, динамическими колебаниями трактора и обусловленная работой подвески и продольным градиентом величины сцепления колес с дорогой, превышала 10 %.

Экстраполируя полученные данные на сельскохозяйственную технику «Трэкол-Агро», можно утверждать, что смещение центра масс трактора назад за счет рабочего оборудования положительно сказывается на эффективности и устойчивости указанной техники. При этом опережающее влияние расстояния до центра масс от передней оси, по сравнению с высотой расположения центра масс, позволяет повысить эффективность торможения не только при комплектации трактора штанговым опрыскивателем, но и при комплектации разбрасывателем минеральных удобрений.

Полученные данные однозначно свидетельствуют о том, что для обеспечения эффективности торможения транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения, оснащенных шинами сверхнизкого давления на дорогах общего пользования, требования по состоянию которых определяются нормативными документами, необхо-

димо, чтобы соотношение расстояния от центра масс до передней оси было как минимум больше, чем расстояние от центра масс до опорной поверхности. Для специализированных машин «Трэкол-Агро», центр масс которых расположен на высоте 1,0–1,5 метра, данное требование означает, что во время движения по трассе баки с технологическими жидкостями должны быть заполнены, а его тормозную систему следует отрегулировать таким образом, чтобы тормозное усилие на задней оси составляло 45 % от тормозного усилия на передней оси. Вопросы управляемости трактора при данных параметрах будут рассмотрены в дальнейших исследованиях.

### **Обсуждение и заключение**

Установлено, что основными техническими причинами возникновения ДТП транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения, оснащенных шинами низкого давления на дорогах общего пользования, являются недостаточная эффективность торможения, потеря устойчивости движения и слабая управляемость исследуемой техники, обусловленная высоким расположением центра масс. Проведенный анализ нормативных требований к указанной технике, а также результатов теоретических и экспериментальных исследований позволил решить вопрос об обеспечении требований к безопасности путем определения соотношения между величинами тормозных усилий на передней и задней осях машин, оснащенных шинами со сверхнизким давлением. Установлено, что для обеспечения устойчивости исследуемой техники при экстренном торможении расстояние от центра масс до передней оси должно быть больше высоты расположения центра масс. Экспериментально подтверждено, что с учетом неравномерного износа шин, отклонения в прямолинейности установки управляемых колес, динамических колебаний трактора, обуслов-

ленных работой подвески, а также продольным градиентом величины сцепления колес с дорогой, предельно допустимая величина высоты центра масс может быть принята равной 90 % от расстояния от расположения центра масс транспортно-технологической машины сельскохозяйственного назначения до его передней (управляемой) оси.

Полученные зависимости могут быть использованы как при разработке новых конструкций транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения на шинах

с низким давлением (анализ существующей сельскохозяйственной техники на шинах сверхнизкого давления типа «Трэкол-Агро» показывает необходимость увеличения колесной базы с 3 до 4 метров со смещением центра тяжести к задней оси), так и при эксплуатации указанной техники, в том числе путем корректировки заполнения объемов технологическими материалами (минеральными удобрениями) для обеспечения безопасности движения указанных тракторов по автомобильным дорогам общего пользования [22–24].

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Injuries Related to Off-Road Vehicles in Canada / W. Vanlaar, H. McAteer, S. Brown [et al.]. – DOI 10.1016/j.aap.2014.12.006 // Accident Analysis and Prevention. – 2016. – Vol. 75. – Pp. 264–271. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457514003856?via%3Dihub> (дата обращения: 26.10.2020).

2. Denning, G. All-Terrain Vehicle Fatalities on Paved Roads, Unpaved Roads, and Off-Road: Evidence for Informed Roadway Safety Warnings and Legislation / G. Denning, C. Jennissen. – DOI 10.1080/15389588.2015.1057280 // Traffic Injury Prevention. – 2016. – Vol. 17, Issue 4. – Pp. 406–412. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15389588.2015.1057280> (дата обращения: 26.10.2020).

3. Методика определения степени влияния дорожных условий и конструкционных особенностей автомобилей на безопасность дорожного движения / И. А. Ерасов, Н. А. Колесниченко, Ю. И. Молев [и др.] // Мир транспорта и технологических машин. – 2015. – № 4 (51). – С. 82–88. – URL: <http://rel-univer.ru/science/journal/mtitm/archive> (дата обращения: 26.10.2020). – Рез. англ.

4. Acar, E. Increasing Automobile Crash Response Metamodel Accuracy through Adjusted Cross Validation Error Based on Outlier Analysis / E. Acar. – DOI 10.1080/13588265.2014.977839 // International Journal of Crashworthiness. – 2015. – № 2. – Pp. 107–122 – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13588265.2014.977839> (дата обращения: 26.10.2020).

5. Ahmed, A. Errors in Accident Data, Its Types, Causes and Methods of Rectification-Analysis of the Literature / A. Ahmed, A. F. M. Sadullah, A. S. Yahya. – DOI 10.1016/j.aap.2017.07.018 // Accident Analysis and Prevention. – 2019. – Vol. 130. – Pp. 3–21. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457517302531?via%3Dihub> (дата обращения: 26.10.2020).

6. All-Terrain Vehicle Safety Knowledge, Riding Behaviors and Crash Experience of Farm Progress Show Attendees / Ch. Jennissen, K. K. Harland, K. Wetjen [et al.]. – DOI 10.1016/j.jsr.2016.12.001 // Journal of Safety Research. – 2017. – Vol. 60. – Pp. 71–78. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022437516305023?via%3Dihub> (дата обращения: 26.10.2020).

7. Denning, G. All-Terrain Vehicles (ATVs) on the Road: A Serious Traffic Safety and Public Health Concern / G. Denning, C. Jennissen, K. Harland [et al.]. – DOI 10.1080/15389588.2012.675110 // Traffic Injury Prevention. – 2013. – Vol. 14, Issue 1. – Pp 78–85. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15389588.2012.675110> (дата обращения: 26.10.2020).

8. More Fatal All-Terrain Vehicle Crashes Occur on the Roadway Than Off: Increased Risk-Taking Characterises Roadway Fatalities / G. Denning, K. Harland, D. Ellis, Ch. A. Jennissen. – DOI 10.1136/injuryprev-2012-040548 // Injury Prevention. – 2013. – Vol. 19, Issue 4. – Pp. 250–256. – URL: <https://injuryprevention.bmj.com/content/19/4/250> (дата обращения: 26.10.2020).

9. The Application of Reliability Reallocation Model in Traffic Safety Analysis on Rural Roads / S. Bačkalić, D. Jovanović, T. Vačkalić [et al.]. – DOI [10.21307/tp.2019.14.1.11](https://doi.org/10.21307/tp.2019.14.1.11) // *Transport Problems*. – 2019. – Vol. 14, Issue 1. – Pp. 115–125. – URL: [https://www.exeley.com/transport\\_problems/doi/10.21307/tp.2019.14.1.11](https://www.exeley.com/transport_problems/doi/10.21307/tp.2019.14.1.11) (дата обращения: 26.10.2020).
10. Dynamic Simulation of Brake Pedal Force Effect on Heavy Vehicle Braking Distance under Wet Road Conditions / M. Zamzamzadeh, A. A. Saifizul, R. Ramli, M. F. Soong. – DOI [10.15282/IJAME.13.3.2016.2.0292](https://doi.org/10.15282/IJAME.13.3.2016.2.0292) // *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. – 2016. – Vol. 13, Issue 3. – Pp. 3555–3563. – URL: [http://ijame.ump.edu.my/images/Volume\\_13\\_Issue\\_3\\_2016/2\\_Zamzamzadeh%20et%20al.pdf](http://ijame.ump.edu.my/images/Volume_13_Issue_3_2016/2_Zamzamzadeh%20et%20al.pdf) (дата обращения: 26.10.2020).
11. **Aksjonov, A.** Design and Simulation of the Robust ABS and ESP Fuzzy Logic Controller on the Complex Braking Maneuvers / A. Aksjonov, K. Augsburg, V. Vodovozov. – DOI [10.3390/app6120382](https://doi.org/10.3390/app6120382) // *Applied Sciences*. – 2016. – Vol. 6, Issue 12. – Pp. 382. – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/6/12/382> (дата обращения: 26.10.2020).
12. **Wang, J.-Ch.** Hydraulic Anti-Lock Braking Control Strategy of a Vehicle Based on a Modified Optimal Sliding Mode Control Method / J.-Ch. Wang, R. He. – DOI [10.1177/0954407018820445](https://doi.org/10.1177/0954407018820445) // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. – 2019. – Vol. 233, Issue 12. – Pp. 3185–3198. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954407018820445> (дата обращения: 26.10.2020).
13. **Liu, P.-F.** Dynamic Performance of Heavy-Haul Combined Train Applying Emergency Braking on Straight Line / P.-F. Liu, K.-Y. Wang. – DOI [10.1007/s11771-017-3597-3](https://doi.org/10.1007/s11771-017-3597-3) // *Journal of Central South University*. – 2017. – Vol. 24. – Pp. 1898–1903. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11771-017-3597-3> (дата обращения: 26.10.2020).
14. **Fowler, G. F.** All-Terrain Vehicle (ATV) Handling and Control, Analysis of Objective Data / G. F. Fowler, R. Larson. – DOI [10.4271/2017-01-1557](https://doi.org/10.4271/2017-01-1557) // *SAE International Journal of Vehicle Dynamics Stability and NVH*. – 2017. – Vol. 1, Issue 2. – Pp. 204–219. – URL: <https://saemobilus.sae.org/content/2017-01-1557> (дата обращения: 26.10.2020).
15. Evaluation of Vehicle Braking Performance on Wet Pavement Surface Using an Integrated Tire-Vehicle Modeling Approach / X. Liu, Q. Cao, H. Wang [et al.]. – DOI [10.1177/0361198119832886](https://doi.org/10.1177/0361198119832886) // *Transportation Research Record*. – 2019. – Vol. 2673, Issue 3. – Pp. 295–307. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0361198119832886> (дата обращения: 26.10.2020).
16. **Mirzaeinejad, H.** Enhancement of Vehicle Braking Performance on Split-M Roads Using Optimal Integrated Control of Steering and Braking Systems / H. Mirzaeinejad, M. Mirzael, R. Kazemi. – DOI [10.1177/1464419315617332](https://doi.org/10.1177/1464419315617332) // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-Body Dynamics*. – 2016. – Vol. 230, Issue 4. – Pp. 401–415. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1464419315617332> (дата обращения: 26.10.2020).
17. **Ni, J.** Dynamic Modelling and Experimental Validation of a Skid-Steered Vehicle in the Pivotal Steering Condition / J. Ni, J. Hu. – DOI [10.1177/0954407016652760](https://doi.org/10.1177/0954407016652760) // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. – 2017. – Vol. 231, Issue 2. – Pp. 225–240. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954407016652760> (дата обращения: 26.10.2020).
18. **Gray, J. P.** Agile Tire Slippage Dynamics for Radical Enhancement of Vehicle Mobility / J. P. Gray, V. Vantsevich, J. Paldan. – DOI [10.1016/j.jterra.2016.01.002](https://doi.org/10.1016/j.jterra.2016.01.002) // *Journal of Terramechanics*. – 2016. – Vol. 65. – Pp. 14–37. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022489816000045?via%3Dihub> (дата обращения: 26.10.2020).
19. **Vlakhova, A. V.** The Skidding Modelling of an Apparatus with Turned Front Wheels / A. V. Vlakhova, A. P. Novoderov. – DOI [10.3103/S0025654419010023](https://doi.org/10.3103/S0025654419010023) // *Mechanics of Solids*. – 2019. – Vol. 54. – Pp. 19–38. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103%2FS0025654419010023> (дата обращения: 26.10.2020).
20. Dynamic Modeling and Experimental Validation of Skid-Steered Wheeled Vehicles with Low-Pressure Pneumatic Tires on Soft Terrain / Sh. Tang, Sh. Yuan, X. Li, J. Zhou. – DOI [10.1177/0954407019847302](https://doi.org/10.1177/0954407019847302) // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of*

Automobile Engineering. – 2019. – Vol. 234, Issue 2–3. – Pp 840–856. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954407019847302> (дата обращения: 26.10.2020).

21. **Vantsevich, V. V.** Road and Off-Road Vehicle System Dynamics. Understanding the Future From the Past / V. V. Vantsevich. – DOI 10.1080/00423114.2014.984726 // Vehicle System Dynamics. – 2015. – № 2. – Pp. 137–153. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00423114.2014.984726> (дата обращения: 26.10.2020).

22. **Кузнецов, Ю. П.** К вопросу о влиянии величины колесной базы автомобиля на его управляемость / Ю. П. Кузнецов, Ю. И. Молев, М. Г. Черевастов // Мир транспорта и технологических машин. – 2019. – № 3 (66). – С. 9–11. – URL: <http://oreluniver.ru/public/file/archive/MT32019.pdf> (дата обращения: 26.10.2020). – Рез. англ.

23. Indirect Quality Estimates of the Vehicle Movement Response to the Control Step Input / Y. Molev, M. Cherevastov, I. Erasov, L. S. Levshunov. – DOI 10.1088/1742-6596/1177/1/012029 // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – 6 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1177/1/012029> (дата обращения: 26.10.2020).

24. The Impact of Changing the Type of Understeer on Vehicle Handling / Y. Molev, M. Cherevastov, A. Sogin [et al.]. – DOI 10.1088/1757-899X/386/1/012026 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 386. – 7 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/386/1/012026> (дата обращения: 26.10.2020).

*Поступила 11.05.2020; принята к публикации 10.07.2020; опубликована онлайн 30.12.2020*

*Об авторах:*

**Вахидов Умар Шахидович**, заведующий кафедрой строительных и дорожных машин ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева» (603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: AAG-8584-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4109-8406>, Scopus ID: 55794612500, umar-vahidov@mail.ru

**Куркин Андрей Александрович**, проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева» (603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), доктор физико-математических наук, профессор, Researcher ID: A-1972-2014, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3828-6406>, Scopus ID: 70034466660, aakurkin@gmail.com

**Левшунов Лев Сергеевич**, доцент кафедры строительных и дорожных машин ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева» (603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), кандидат технических наук, Scopus ID: 57208467666, wlev.lev@yandex.ru

**Молев Юрий Игоревич**, профессор кафедры строительных и дорожных машин ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева» (603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), доктор технических наук, доцент, Researcher ID: AAG-8501-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0429-4590>, Scopus ID: 57203352368, moleff@yandex.ru

**Прошин Димитрий Николаевич**, старший преподаватель кафедры автомобильного транспорта ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева» (603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8620-157X>, Scopus ID: 57214464141, proshdn@mail.ru

**Согин Александр Васильевич**, профессор кафедры строительных и дорожных машин ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева» (603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), доктор технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4384-1136>, Scopus ID: 57203352293, sapropel-nn@mail.ru

*Заявленный вклад соавторов:*

У. Ш. Вахидов – анализ математических моделей, проведение теоретических расчетов, формирование выводов; А. А. Куркин – научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов; Л. С. Левшунов – корректировка литературного анализа, доработка текста, корректировка выводов; Ю. И. Молев – формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов; Д. Н. Прошин – проведение экспериментальной части исследований, корректировка текста, корректировка выводов; А. В. Согин – анализ научных источников, доработка текста, обсуждение результатов.

**Благодарности:** экспериментальные исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования НГТУ «Транспортные системы».

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Vanlaar W., McAteer H., Brown S., et al. Injuries Related to Off-Road Vehicles in Canada. *Accident Analysis and Prevention*. 2016; 75:264-271. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.12.006>
2. Denning G., Jennissen C. All-Terrain Vehicle Fatalities on Paved Roads, Unpaved Roads, and Off-Road: Evidence for Informed Roadway Safety Warnings and Legislation. *Traffic Injury Prevention*. 2016; 17(4):406-412. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/15389588.2015.1057280>
3. Yerasov I.A., Kolesnichenko N.A., Molev Yu.I., et al. Method for Determining the Degree of Influence of Road Terms and Conditions Design Features Car on Road Safety. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin* = World Transport and Technological Machinery. 2015; (4):82-88. Available at: <http://oreluniver.ru/science/journal/mtitm/archive> (accessed 26.10.2020). (In Russ.)
4. Acar E. Increasing Automobile Crash Response Metamodel Accuracy through Adjusted Cross Validation Error Based on Outlier Analysis. *International Journal of Crashworthiness*. 2015; (2):107-122. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/13588265.2014.977839>
5. Ahmed A., Sadullah A.F.M., Yahya A.S. Errors in Accident Data, Its Types, Causes and Methods of Rectification-Analysis of the Literature. *Accident Analysis and Prevention*. 2019; 130:3-21. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.07.018>
6. Jennissen Ch., Harland K.K., Wetjen K., et al. All-Terrain Vehicle Safety Knowledge, Riding Behaviors and Crash Experience of Farm Progress Show Attendees. *Journal of Safety Research*. 2017; 60:71-78. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2016.12.001>
7. Denning G., Jennissen C., Harland K., et al. All-Terrain Vehicles (ATVs) on the Road: A Serious Traffic Safety and Public Health Concern. *Traffic Injury Prevention*. 2013; 14(1):78-85. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/15389588.2012.675110>
8. Denning G., Harland K., Ellis D., et al. More Fatal All-Terrain Vehicle Crashes Occur on the Roadway Than Off: Increased Risk-Taking Characterises Roadway Fatalities. *Injury Prevention*. 2013; 19(4):250-256. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1136/injuryprev-2012-040548>
9. Bačkalić S., Jovanović D., Bačkalić T., et al. The Application of Reliability Reallocation Model in Traffic Safety Analysis on Rural Roads. *Transport Problems*. 2019; 14(1):115-125. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.21307/tp.2019.14.1.11>
10. Zamzamzadeh M., Saifzul A.A., Ramli R., et al. Dynamic Simulation of Brake Pedal Force Effect on Heavy Vehicle Braking Distance under Wet Road Conditions. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2016; 13(3):3555-3563. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15282/IJAME.13.3.2016.2.0292>
11. Aksjonov A., Augsburg K., Vodovozov V. Design and Simulation of the Robust ABS and ESP Fuzzy Logic Controller on the Complex Braking Maneuvers. *Applied Sciences*. 2016; 6(12):382. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/app6120382>

12. Wang J.-Ch., He R. Hydraulic Anti-Lock Braking Control Strategy of a Vehicle Based on a Modified Optimal Sliding Mode Control Method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2019; 233(12):3185-3198. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/0954407018820445>
13. Liu P.-F., Wang K.-Y. Dynamic Performance of Heavy-Haul Combined Train Applying Emergency Braking on Straight Line. *Journal of Central South University*. 2017; 24:1898-1903. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-017-3597-3>
14. Fowler G.F., Larson R. All-Terrain Vehicle (ATV) Handling and Control, Analysis of Objective Data. *SAE International Journal of Vehicle Dynamics Stability and NVH*. 2017; 1(2):204-219. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4271/2017-01-1557>
15. Liu X., Cao Q., Wang H., et al. Evaluation of Vehicle Braking Performance on Wet Pavement Surface Using an Integrated Tire-Vehicle Modeling Approach. *Transportation Research Record*. 2019; 2673(3):295-307. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198119832886>
16. Mirzaeinejad H., Mirzael M., Kazemi R. Enhancement of Vehicle Braking Performance on Split-M Roads Using Optimal Integrated Control of Steering and Braking Systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-Body Dynamics*. 2016; 230(4):401-415. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/1464419315617332>
17. Ni J., Hu J. Dynamic Modelling and Experimental Validation of a Skid-Steered Vehicle in the Pivotal Steering Condition. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2017; 231(2):225-240. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/0954407016652760>
18. Gray J.P., Vantsevich V., Paldan J. Agile Tire Slippage Dynamics for Radical Enhancement of Vehicle Mobility. *Journal of Terramechanics*. 2016; 65:14-37. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2016.01.002>
19. Vlahkova A.V., Novoderov A.P. The Skidding Modelling of an Apparatus with Turned Front Wheels. *Mechanics of Solids*. 2019; 54:19-38. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S0025654419010023>
20. Tang Sh., Yuan Sh., Li X., et al. Dynamic Modeling and Experimental Validation of Skid-Steered Wheeled Vehicles with Low-Pressure Pneumatic Tires on Soft Terrain. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2019; 234(2-3):840-856. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/0954407019847302>
21. Vantsevich V.V. Road and Off-Road Vehicle System Dynamics. Understanding the Future From the Past. *Vehicle System Dynamics*. 2015; (2):137-153. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.984726>
22. Kuznetsov Yu.P., Molev Yu.I., Cherevastov M.G. To the Question about the Influence of the Size of Wheelbase of the Car on Its Handling. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin* = World of Transport and Technological Machines. 2019; (3):9-11. Available at: <http://oreluniver.ru/public/file/archive/MT32019.pdf> (accessed 26.10.2020). (In Russ.)
23. Molev Y., Cherevastov M., Erasov I., et al. Indirect Quality Estimates of the Vehicle Movement Response to the Control Step Input. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 6 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1177/1/012029>
24. Molev Y., Cherevastov M., Sogin A., et al. The Impact of Changing the Type of Understeer on Vehicle Handling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 386. 7 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/386/1/012026>

Received 11.05.2020; revised 10.07.2020; published online 30.12.2020

About the authors:

**Umar Sh. Vakhidov**, Head of the Chair of Construction and Road Machinery, Nizhny Novgorod State Technical University (24 Minin St., Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: AAG-8584-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4109-8406>, Scopus ID: 55794612500, [umar-vahidov@mail.ru](mailto:umar-vahidov@mail.ru)

**Andrey A. Kurkin**, Vice-Rector for Science and Research, Nizhny Novgorod State Technical University (24 Minin St., Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation), D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, Researcher ID: A-1972-2014, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3828-6406>, Scopus ID: 7003446660, [aakurkin@gmail.com](mailto:aakurkin@gmail.com)

**Lev S. Levshunov**, Associate Professor of Chair of Construction and Road Machinery, Nizhny Novgorod State Technical University (24 Minin St., Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Scopus ID: 57208467666, [wlev.lev@yandex.ru](mailto:wlev.lev@yandex.ru)

**Iuri I. Molev**, Professor of Chair of Construction and Road Machinery, Nizhny Novgorod State Technical University (24 Minin St., Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Researcher ID: AAG-8501-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0429-4590>, Scopus ID: 57203352368, [moleff@yandex.ru](mailto:moleff@yandex.ru)

**Dmitriy N. Proshin**, Senior Lecturer of Chair of Construction and Road Machinery, Nizhny Novgorod State Technical University (24 Minin St., Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8620-157X>, Scopus ID: 57214464141, [proshdn@mail.ru](mailto:proshdn@mail.ru)

**Aleksandr V. Sogin**, Professor of Chair of Construction and Road Machinery, Nizhny Novgorod State Technical University (24 Minin St., Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4384-1136>, Scopus ID: 57203352293, [sapropel-nn@mail.ru](mailto:sapropel-nn@mail.ru)

*Contribution of the authors:*

U. Sh. Vakhidov – analysis of mathematical models, theoretical calculations, drawing the conclusions; A. A. Kurkin – scientific guidance, analysis of research results, improvement of text, correction of conclusions; L. S. Levshunov – correction of literary analysis, improvement of text, correction of conclusions; Iu. I. Molev – formation of the main concept, goals and objectives of the research, making calculations, preparation of the text, formation of conclusions; D. N. Proshin – conducting the experimental part of the research, text correction, correction of conclusions; A. V. Sogin – analysis of scientific sources, improvement of the text, discussion of results.

**Acknowledgments:** Experimental studies were carried out using the equipment of the Transport Systems Center for Collective Use of the Nizhny Novgorod State Technical University.

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



## Изготовление деталей гидросистем сельскохозяйственных машин в условиях ультразвукового резания

**В. А. Скрябин**

*ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»*

*(г. Пенза, Российская Федерация)*

*vs\_51@list.ru*

*Введение.* В статье решены проблемные вопросы по снижению силовых параметров при обработке тонкостенных втулок гидросистем сельскохозяйственных машин путем наложения ультразвуковых колебаний на режущий инструмент для достижения заданной точности обработки и шероховатости поверхности деталей.

*Материалы и методы.* В работе использованы положения технологии ультразвукового резания. Для оценки изменения силы резания в тангенциальном направлении было разработано специальное приспособление для сообщения режущему инструменту ультразвуковых колебаний в тангенциальном направлении и проведены соответствующие эксперименты.

*Результаты исследования.* Готовится к реализации модернизация токарно-винторезного станка со специальным устройством для осуществления процесса ультразвукового резания тонкостенных деталей невысокой жесткости. Модернизированный станок состоит из блоков обработки и измерения данных экспериментальных исследований, соединенных с персональным компьютером. Модернизированный станок позволяет дать оценку изменению сил резания при традиционном точении и ультразвуковом резании для реализации заданной точности и шероховатости процесса обработки поверхности детали.

*Обсуждение и заключение.* Обработка деталей невысокой жесткости в рамках рассматриваемой технологической системы на модернизированном оборудовании показала, что при эффективных условиях изготовления тонкостенных втулок сельскохозяйственных машин (глубине резания и скорости резания) снижается радиальная и тангенциальная составляющие силы резания, что позволяет уменьшить энергозатраты процесса резания и стабилизировать качество обработки.

**Ключевые слова:** точение, ультразвук, глубина резания, подача, скорость резания, модернизация, станок

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

**Для цитирования:** Скрябин, В. А. Изготовление деталей гидросистем сельскохозяйственных машин в условиях ультразвукового резания / В. А. Скрябин. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202004.624-636 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 624–636.



# Manufacturing Parts for Hydraulic Systems of Agricultural Machinery under Conditions of Ultrasonic Cutting

V. A. Skryabin

*Penza State University (Penza, Russian Federation)*

*vs\_51@list.ru*

*Introduction.* The article deals with the problem of reducing the efforts when processing thin-walled bushings for hydraulic systems of agricultural machines with the ultrasonically activated cutting tool to achieve the specified processing accuracy and surface roughness of parts. *Materials and Methods.* The article describes the technological standards for ultrasonic cutting. To assess the change in the tangential cutting force, a special device was developed to activate ultrasonically the tool for tangential cutting and corresponding experiments were carried out.

*Results.* An upgrading of a screw-cutting lathe equipped with a special device for ultrasonic cutting of low rigidity thin-walled parts is currently being carried out. The upgraded lathe consists of blocks for processing and measuring experimental research data connected to a personal computer. The upgraded lathe allows evaluating the change in cutting forces under traditional turning and ultrasonic cutting to achieve the specified accuracy and roughness of the part surface during the processing process.

*Discussion and Conclusion.* Processing low rigidity parts on the modernized equipment has shown that providing the effective conditions of manufacturing thin-walled bushings for agricultural machinery (cutting depth and cutting speed) decreases radial and tangential components of the cutting force that helped to reduce the energy consumption of the cutting process and to stabilize quality of the processing.

**Keywords:** turning, ultrasound, cutting depth, feed, cutting speed, modernization, machine

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

**For citation:** Skryabin V.A. Manufacturing Parts for Hydraulic Systems of Agricultural Machinery under Conditions of Ultrasonic Cutting. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(4):624-636. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.624-636>

## Введение

Снижение тангенциальной составляющей силы резания при обработке тонкостенных деталей типа втулок при ультразвуковом резании является актуальной задачей машиностроения, решение которой позволит стабильно обеспечивать качество процесса обработки.

При использовании обычных технологий довольно часто не удается получить заданную размерную точность и шероховатость поверхности.

Это приводит к разработке совмещенных технологических процессов изготовления вышеуказанных деталей, например, к резанию с применением ультразвуковых колебаний, которое

уменьшает влияние составляющих силы резания при обработке деталей с невысокой жесткостью.

Целью экспериментальных исследований в данной статье является измерение составляющих силы резания при обработке поверхности детали режущим инструментом с наложением ультразвуковых колебаний и сравнение результатов с обычным (традиционным) точением.

## Обзор литературы

Резание с применением ультразвука является одним из перспективных методов обработки поверхностей тонкостенных деталей типа втулок, при котором создаются условия, уменьша-

ющие влияние составляющих силы резания для достижения стабильного обеспечения качества и производительности процесса<sup>1</sup> [1–3]. Значительный вклад в разработку теоретических и экспериментальных исследований процесса резания с применением ультразвуковых колебаний внесли А. И. Марков, Г. Г. Иноземцев, М. Л. Хейфец, А. А. Горбунов, О. В. Захаров, Б. М. Бржозовский, В. К. Асташев, М. П. Козочкин, Ч. Либби и др. Однако необходимо отметить, что в работах вышеперечисленных ученых и специалистов далеко не полностью раскрыты вопросы теоретических и экспериментальных исследований по определению составляющих сил резания в условиях наложения ультразвуковых колебаний на режущий инструмент. В связи с этим на предприятии «Гакс-Рем-Арм» (г. Пенза) совместно с кафедрой технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» были проведены экспериментальные исследования обработки тонкостенных деталей типа втулок на модернизированном токарном станке, оснащенный ультразвуковой установкой и способном реализовать процесс ультразвукового резания для достижения заданной точности и шероховатости поверхности деталей гидросистем сельскохозяйственных машин.

### Материалы и методы

Токарная обработка цилиндрических тонкостенных втулок гидросистем сельскохозяйственных машин осуществлялась на токарно-винторезном станке модели 1М63, оснащенный ультразвуковой колебательной системой

для тангенциального воздействия колебаний на режущий инструмент<sup>2</sup> [3–5].

Для проведения экспериментальных исследований было спроектировано устройство для воздействия на режущий инструмент ультразвуковых колебаний в тангенциальном направлении (рис. 1).

Высокочастотные ультразвуковые колебания инициировал магнитострикционный преобразователь (МСП) модели ПМС-1-1 с помощью источника питания – ультразвукового генератора УЗГ-1-1 мощностью 63 Вт.

На рисунке 2 показан модернизированный токарно-винторезный станок модели 1М63 с устройством для ультразвукового резания в направлении действия тангенциальной составляющей силы резания.

Структурная схема колебательной системы приведена на рисунке 3.

Источник тока  $I$  создает в магнитопроводе МСП переменное магнитное поле ультразвуковой частоты, под действием которого магнитопровод изменяет свой линейный размер на величину  $\Delta l_1$ .

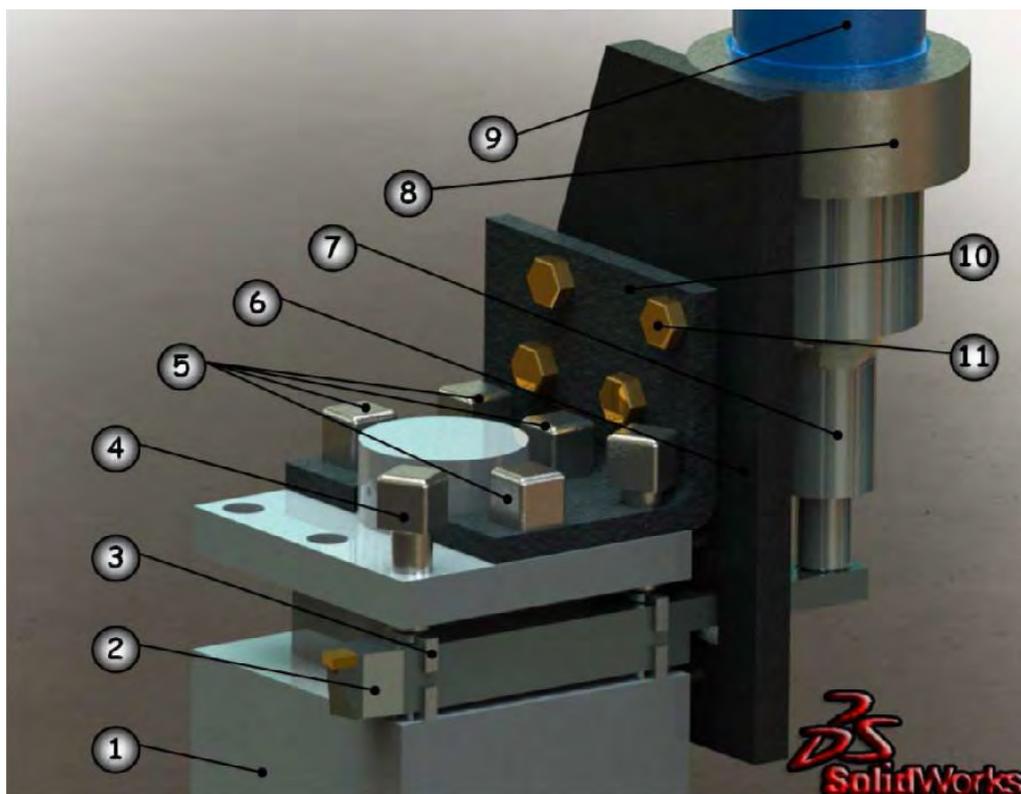
Упругие колебания, излучаемые магнитопроводом, воспринимаются присоединенным к нему ступенчатым акустическим трансформатором (САТ), усиливающим колебания до амплитуды  $\Delta l_2$ , которые передаются к волноводу В, обеспечивающему на выходе колебания с амплитудой  $\Delta l_3$ .

### Результаты исследования

При проведении экспериментальных исследований в качестве заготовки использовалась тонкостенная цилиндрическая втулка диаметром 50 мм,

<sup>1</sup> Марков А. И. Ультразвуковая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1980. 237 с.; Иноземцев Г. Г., Захаров В. В., Горбунов А. А. Повышение качества резьбы, образованной выдавливающими метчиками при воздействии ультразвука // Опыт промышленного применения ультразвуковой техники и технологии. М.: 1976. С. 72–77; Хейфец М. Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. М.: Машиностроение, 2005. 272 с.; Агапов С. И. Определение истинной скорости резания при ультразвуковом зубофрезеровании // Прогрессивные технологии в машиностроении: Материалы межвузовского сборника научных трудов. Волгоград, 2002. С. 3–7.

<sup>2</sup> Агапов С. И. Определение истинной скорости резания при ультразвуковом зубофрезеровании; Козочкин М. П. Виброакустическая диагностика технологических процессов. М.: Каталог, 2005. С. 125–130.



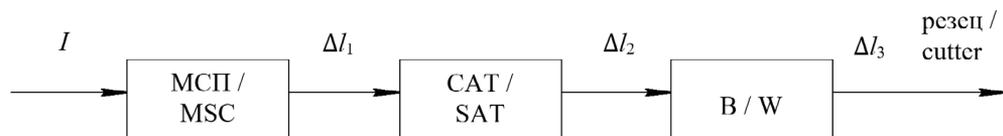
Р и с. 1. Вертикальное устройство для воздействия на режущий инструмент ультразвуковых колебаний в тангенциальном направлении: 1 – резцедержатель; 2 – токарный резец с удлиненной державкой, прикрепленный через шпильку к концентратору 7; 3 – опоры для установки между ними инструмента в рабочее положение; 4 – винты для закрепления инструмента; 5 – винты для закрепления резцедержателя; 6 – вертикальный стальной лист; 7 – ступенчатый преобразователь упругих колебаний (концентратор), установленный вертикально; 8 – кольцо, приваренное к стальному листу, на котором закреплен по наружной резьбе магнитострикционный преобразователь 9; 10 – стальной уголок, прикрепленный к резцедержателю 1 с помощью винтов 5; 11 – винты для закрепления в вертикальном положении к стальному уголку 10 магнитострикционного преобразователя 9, кольца 8, ступенчатого преобразователя упругих колебаний 7 и стального листа 6

Fig. 1. Vertical device for influencing the cutting tool ultrasonic vibrations in the tangential direction: 1 – tool holder; 2 – longitudinal turning tool attached through a stud to the concentrator 7; 3 – supports for installing the tool between them in the working position; 4 – screws for fixing the tool; 5 – screws for fixing the tool holder; 6 – vertical steel sheet; 7 – step converter of elastic vibrations (concentrator), mounted vertically; 8 – ring welded to the steel sheet, which is fixed on the external thread magnetostrictive converter 9; 10 – steel angle, attached to the tool holder 1 with screws 5; 11 – screws for fixing in a vertical position to the steel angle 10 of the magnetostrictive transducer 9, the ring 8, the step transducer of elastic vibrations 7 and the steel sheet 6



Р и с. 2. Экспериментальное устройство на базе токарно-винторезного станка

F i g. 2. Experimental device based on a screw-cutting lathe



Р и с. 3. Структурная схема колебательной системы: МСП – магнитострикционный преобразователь; САТ – ступенчатый акустический трансформатор; В – волновод

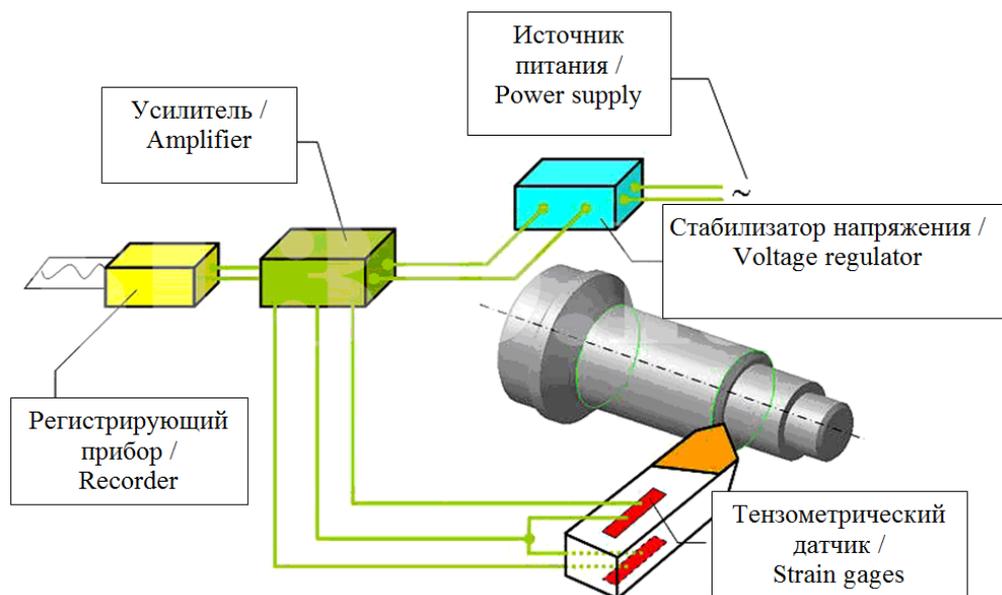
F i g. 3. Block diagram of the oscillating system: MSC – magnetostrictive converter; SAT – step acoustic transformer; W – waveguide

длиной 100–200 мм, толщиной стенки 3–4 мм, изготовленная из улучшенной стали 40Х с  $\sigma_b = 650$  МПа. В качестве режущего инструмента применялся токарный проходной отогнутый правый резец с режущей частью в виде четырехгранной неперетачиваемой пластинки из твердого сплава Т15К6 и главным углом в плане  $\varphi = 45^\circ$ .

Задавались следующие параметры режимов в ходе экспериментов при черновом наружном точении: глубина резания  $t = 1,8; 1,2; 0,6$  мм; скорость резания соответствовала значениям  $V = 40; 60; 75$  м/мин; подача  $s = 0,6$  мм/об; ча-

стота колебаний  $f = 20$  кГц. Амплитуда колебаний  $a = 10$  мкм на холостом ходу, так как в рабочем режиме амплитуда колебаний уменьшается в зависимости от параметров режима.

Измерение тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$  осуществлялось с помощью тензорезисторных датчиков, размещенных на державке резца и соединенных с блоками обработки и измерения данных экспериментальных исследований, взаимодействующих с персональным компьютером. Схема измерения составляющей силы резания  $P_z$  показана на рисунке 4.



Р и с. 4. Схема измерения тангенциальной составляющей силы резания с использованием тензорезисторных датчиков

Fig. 4. Diagram of measuring the tangential component of the cutting force using strain gages

Результаты измеряемых параметров, транслируемые на монитор компьютера, обрабатывались при помощи специального лицензионного программного продукта PicoLog Recorder (США) и были получены в милливольтгах. Интервал соответствовал одной миллисекунде при многократных повторениях значений выходных параметров.

Для оценки полученных результатов экспериментальных исследований значения измеряемых параметров выбирались таким образом, чтобы серединой была зона перехода от традиционного резания к ультразвуковому.

Для повышения точности измерений выходных параметров использовались мостовые схемы с нормирующими резисторами. По ГОСТу 28836-90 выбрана категория точности датчиков 0,1 с фольговыми тензорезисторами<sup>3</sup>.

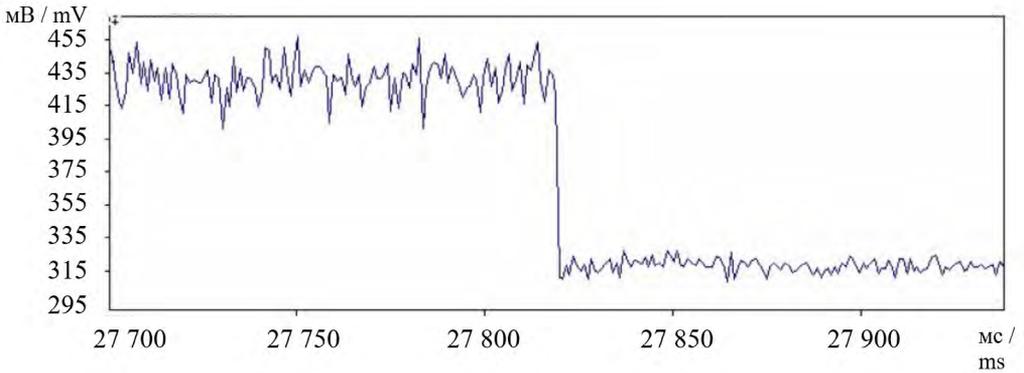
При этом погрешность измерения снижается до 0,1 %.

На рисунках 5–7 приведены графические зависимости значений выходного сигнала во времени при заданных параметрах режимов резания.

На рисунках 8–10 приведены зависимости изменения среднего значения силы  $P_z$  как главной составляющей результирующей силы резания  $R$  при точении от скорости резания  $V$  для традиционного точения и ультразвукового резания  $t$  в вышеуказанном диапазоне и при заданном значении подачи режущего инструмента<sup>4</sup> [6]. Необходимо отметить, что при построении графических зависимостей (рис. 8–10) по осям координат для интервалов среднего значения сил резания и скоростей была принята равномерная сетка для

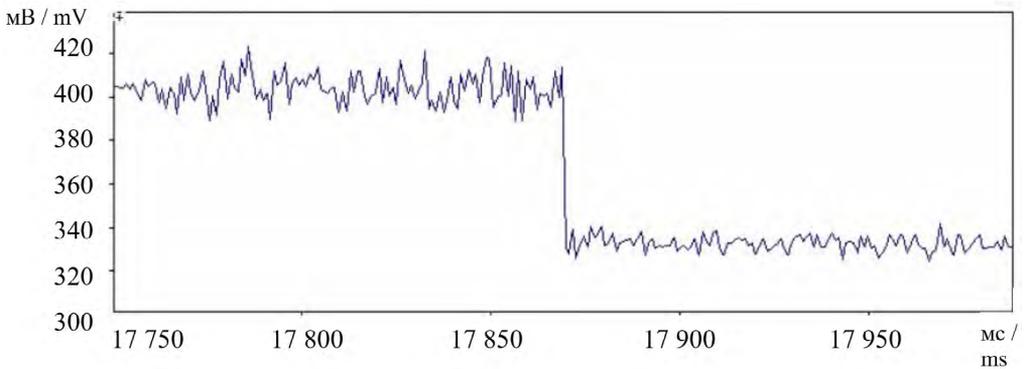
<sup>3</sup> ГОСТ 28836-90. Датчики силоизмерительные тензорезисторные. Общие технические требования и методы испытаний.

<sup>4</sup> Козочкин М. П. Виброакустическая диагностика технологических процессов.



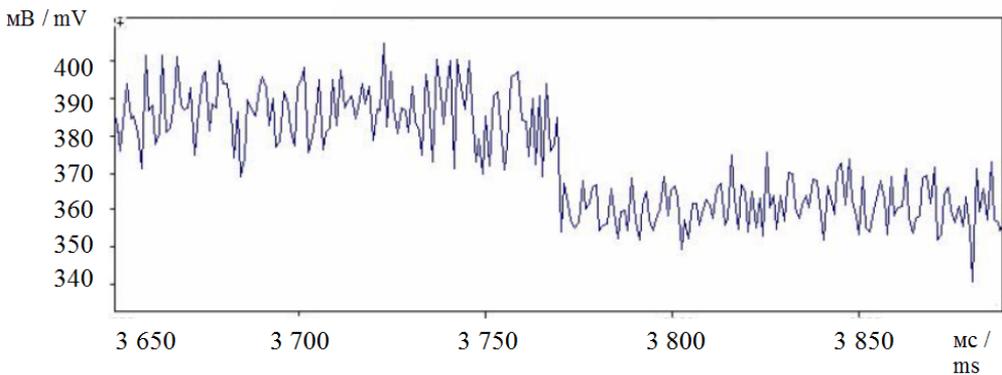
Р и с. 5. Зависимость изменения значений выходного сигнала по времени при получистовом ультразвуковом резании ( $t = 1,8$  мм,  $V = 40$  м/мин,  $Ra = 3,2$  мкм)

F i g. 5. Dependence of the change in the output signal values over time during semi-continuous ultrasonic cutting ( $t = 1.8$  mm,  $V = 40$  m/min,  $Ra = 3.2$  mkm)



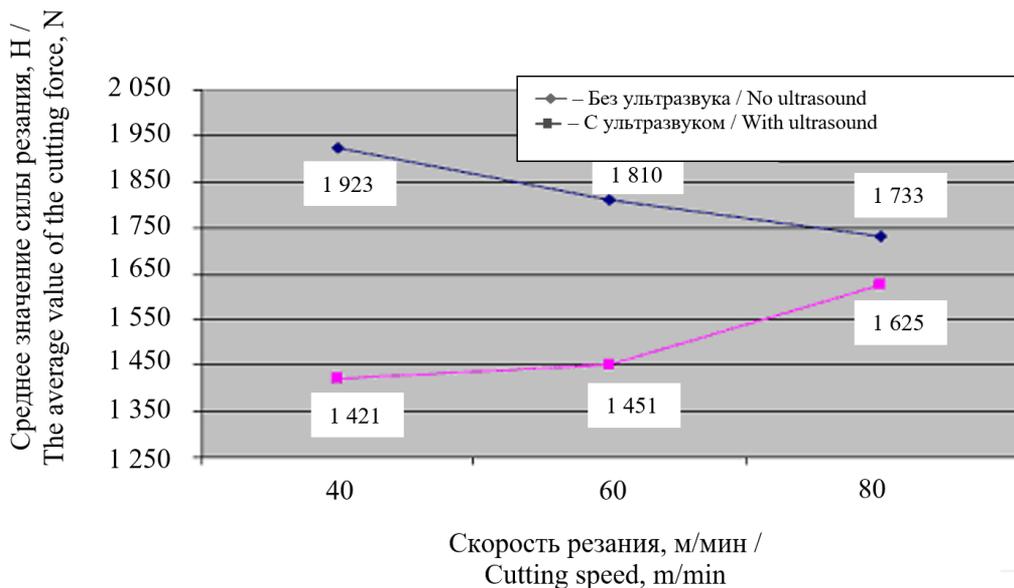
Р и с. 6. Зависимость изменения значений выходного сигнала по времени при получистовом ультразвуковом резании ( $t = 1,2$  мм,  $V = 60$  м/мин,  $Ra = 3,2$  мкм)

F i g. 6. Dependence of the change in the output signal values over time during semi-continuous ultrasonic cutting ( $t = 1.2$  mm,  $V = 60$  m/min,  $Ra = 12.5$  mkm)

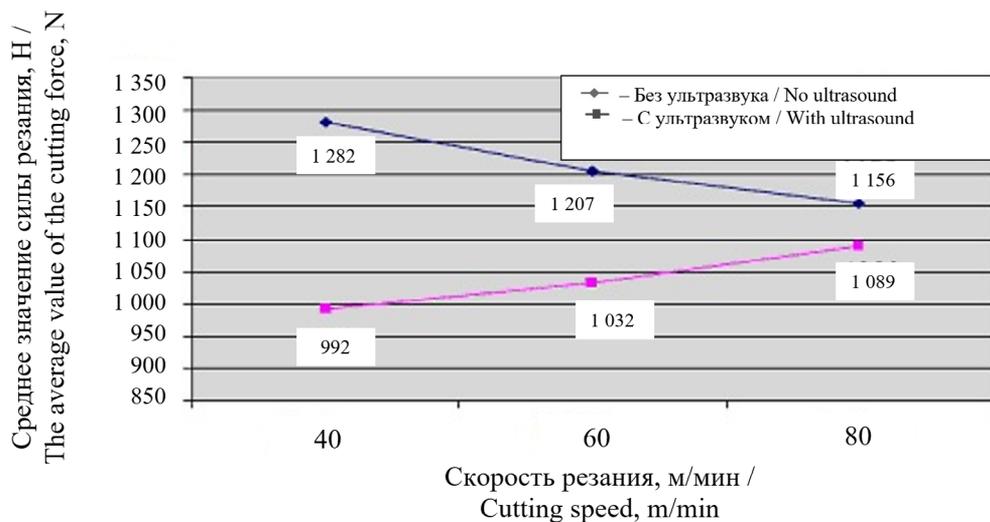


Р и с. 7. Зависимость изменения значений выходного сигнала по времени при получистовом ультразвуковом резании ( $t = 0,6$  мм,  $V = 75$  м/мин,  $Ra = 1,6$  мкм)

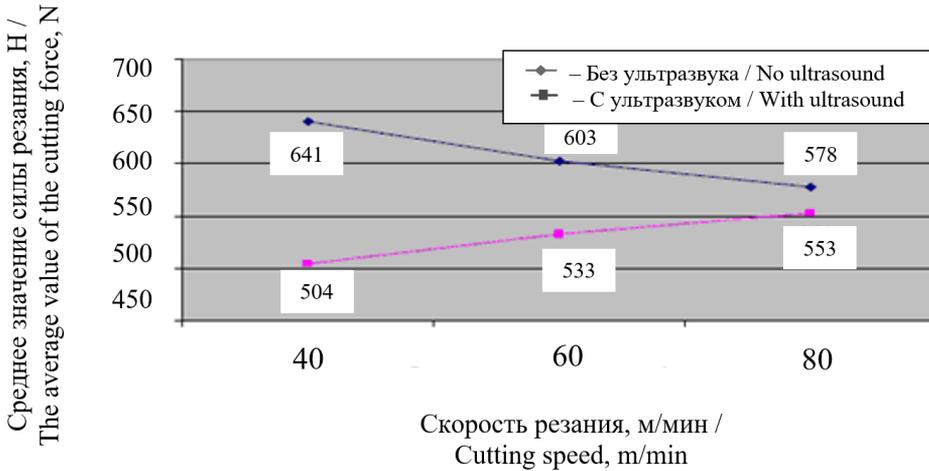
F i g. 7. Dependence of the change in the output signal values over time during semi-continuous ultrasonic cutting ( $t = 0.6$  mm,  $V = 75$  m/min,  $Ra = 6,3$  mkm)



Р и с. 8. Зависимость среднего значения тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$  от скорости при традиционном точении и точении с наложением ультразвука для  $t = 1,8$  мм  
 F i g. 8. Dependence of the average value of the tangential component of the cutting force  $P_z$  on the speed for traditional turning and ultrasonic cutting for  $t = 1.8$  mm



Р и с. 9. Зависимость среднего значения тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$  от скорости при традиционном точении и точении с наложением ультразвука для  $t = 1,2$  мм  
 F i g. 9. Dependence of the average value of the tangential component of the cutting force  $P_z$  on the speed for traditional turning and ultrasound-applied turning for  $t = 1.2$  mm



Р и с. 10. Зависимость среднего значения тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$  от скорости резания  $V$  при традиционном точении и точении с наложением ультразвука для  $t = 0,6$  мм  
 Fig. 10. Dependence of the average value of the tangential component of the cutting force  $P_z$  on the cutting speed  $V$  for traditional turning and ultrasound-applied turning for  $t = 0.6$  mm

наглядности и более легкого чтения графических зависимостей.

Анализируя зависимости на рисунках 8–10, можно отметить, что при обработке деталей точением без наложения ультразвуковых колебаний среднее значение составляющей силы резания принимает меньшие значения с увеличением скорости резания, а для ультразвукового резания повышение скорости резания увеличивает значение силы резания, которая при этом для всех построенных графиков остается меньше по величине по сравнению с применением обычного точения. Это, по-видимому, связано с уменьшением силы резания при наложении ультразвуковых колебаний [7]. Это происходит за счет более быстрого расклинивания микротрещин поверхностного слоя материала и снижения теплонапряженности процесса стружкообразования [8–11].

Экспериментальные исследования показали, что наиболее эффективной в плане снижения силы резания оказалась обработка с наложением ультра-

звуковых колебаний при обработке тонкостенных деталей со скоростью резания  $V = 40$  м/мин и при глубине резания  $t = 1,8$  мм. В таком случае уменьшение величины силы резания оказалось в диапазоне 19,78–22,62 %. При скорости  $V = 60$  м/мин и глубине  $t = 1,2$  мм диапазон изменения силы резания составил 12,87–18,75 %. Наименьший эффект дало резание с наложением ультразвуковых колебаний при  $V = 75$  м/мин и глубине  $t = 0,6$  мм с диапазоном изменения силы резания от 4,45 до 7,25 %.

Для оценки эмпирической формулы главной составляющей результирующей силы резания  $P_z$  при ультразвуковом резании можно использовать коэффициент  $v_m^5$ :

$$v_m = \frac{V(t)}{V},$$

где  $V(t)$  – значение колебательной скорости;  $V$  – значение скорости резания при традиционном точении.

<sup>5</sup> Марков А. И. Ультразвуковая обработка материалов.

Эффект от ультразвукового резания достигается, когда  $V(t) > V$ . В этом случае коэффициент для учета влияния ультразвукового точения  $v_1 = 1 / v_m$ .

В первом приближении при  $f = 20$  кГц  $V(t) = 75$  м/мин,  $v_m = 75 / 40 = 1,875$ ,  $v_1 = 1 / 1,875 = 0,53$ .

Таким образом, эмпирическая зависимость для определения тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$  в условиях вибрационного резания может быть получена следующим способом:

$$P_z = 10C_{P_z} t^{x_{P_z}} s^{y_{P_z}} V^{n_{P_z}} K_{P_z} \cdot v_1,$$

где  $C_{P_z}$  – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств и структуры обрабатываемого материала детали и материала режущей части инструмента и определяемый по таблицам технологических справочников в зависимости от условий обработки;  $x_{P_z}$ ,  $y_{P_z}$ ,  $n_{P_z}$  – показатели степени, определяемые по таблицам технологических справочников в зависимости от условий обработки;  $K_{P_z}$  – поправочный коэффициент, зависящий от физико-механических свойств и структуры обрабатываемого материала детали и материала режущей части инструмента и определяемый по таблицам технологических справочников в зависимости от условий обработки.

$$K_{P_z} = K_{MP_z} \cdot K_{\varphi P_z} \cdot K_{\gamma P_z} \cdot K_{\lambda P_z} \cdot K_{r P_z},$$

где  $K_{MP_z}$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние материала заготовки на  $P_z$ ;  $K_{\varphi P_z}$  – учитывает влияние угла  $\varphi$  на  $P_z$ ;  $K_{\gamma P_z}$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние переднего угла в плане режущего инструмента на тангенциальную составляющую силы резания;  $K_{\lambda P_z}$  – учитывает зависимость  $P_z$  от наклона главной режущей кромки резца;  $K_{r P_z}$  – характеризует зависимость  $P_z$  от радиуса округления вершины инструмента.

Проведем расчет тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$  в условиях ультразвукового резания при обработке тонкостенной втулки из стали 40Х:

$$\begin{aligned} C_{P_z} &= 250; x_{P_z} = 1,0; y_{P_z} = 0,75; \\ n_{P_z} &= -0,15; K_{P_z} = 1,08; t = 1,8 \text{ мм}; \\ s &= 0,6 \text{ мм/об}; V = 40 \text{ м/мин}; v_{m. \text{cp.}} = 0,1; \\ P_z &= 10 \cdot 250 \cdot 18^{1,0} \cdot 0,6^{0,75} \cdot 40^{-0,15} \cdot 1,08 \cdot 0,53 = \\ &= 1051 \text{ Н}. \end{aligned}$$

Сравнивая значение  $P_z = 1470$  Н с величиной  $P_z$  по зависимости (рис. 8) для ультразвукового точения, получаем  $P_z = 1421$  Н.

### Обсуждение и заключение

Проведенные экспериментальные исследования на предприятии «Гакс-Рем-Арм» (г. Пенза) позволили установить эффективные параметры режимов резания тонкостенных цилиндрических втулок гидросистем сельскохозяйственных машин ( $V = 40$  м/мин,  $t = 1,8$  м/мин,  $s = 0,6$  мм/об). При обработке вышеуказанной детали из стали 40Х получистовым точением с заданными технологическими режимами стабильно обеспечиваются необходимые параметры шероховатости поверхностного слоя детали в диапазоне  $Ra = 1,6\text{--}3,2$  мкм и точности обработки в пределах IT9–IT11 за счет снижения тангенциальной составляющей силы резания на 19,78–22,62%. Получена эмпирическая зависимость для расчета тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$  в условиях ультразвукового резания. Расчеты показали, что относительная погрешность между величиной тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$  по эмпирической формуле в условиях ультразвукового резания и значением  $\hat{P}_z$ , полученным в результате проведения экспериментальных исследований, составляет около 3%, что указывает на достаточную точность предложенной эмпирической формулы для расчета тангенциальной

составляющей силы резания  $P_z$  при наложении ультразвуковых колебаний.

В заключение стоит отметить, что данная работа является продолжением

серии исследований, посвященных актуальной проблеме качественной обработки деталей, которая требует дальнейшего изучения [12–15].

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Libby, Ch. C.** Sonic Riveting of Aircraft Aluminum Alloys / Ch. C. Libby. – DOI 10.1109/T-SU.1969.29513 // IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. – 1969. – Vol. 16, Issue 3. – Pp. 117–125. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1538510> (дата обращения: 29.10.2020).

2. **Козочкин, М. П.** Особенности стружкообразования при лезвийной обработке с ультразвуковыми вибрациями / М. П. Козочкин, Н. В. Солис-Пинарготе // Машиностроитель. – 2011. – № 2. – С. 29–35.

3. К реализации авторезонансной ультразвуковой технологии / В. К. Асташев, Н. А. Андрианов, М. П. Козочкин [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2009. – № 6. – С. 52–58. – URL: <http://naukarus.com/k-realizatsii-avtozonansnoy-ultrazvukovoy-tehnologii> (дата обращения: 29.10.2020). – Рез. англ.

4. **Солис, Н. В.** Определение угла сдвига стружки при ультразвуковом точении с помощью высокоскоростной видеосъемки // Н. В. Солис, М. П. Козочкин // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2010. – № 3. – С. 60–65. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-ugla-sdviga-struzhki-pri-ultrazvukovom-tochenii-s-pomoschuy-vysokoskorostnoy-videosemki> (дата обращения: 29.10.2020). – Рез. англ.

5. **Асташев, В. К.** О нелинейной динамике ультразвуковых технологических процессов и систем / В. К. Асташев // Вестник научно-технического развития. – 2007. – № 2. – С. 18–25. – URL: <http://www.vntr.ru/ftpgetfile.php?id=29> (дата обращения: 29.10.2020). – Рез. англ.

6. On the Implementation of Ultrasonic Technology / V. K. Astashev, N. A. Andrianov, M. P. Kozochkin [et al.]. – DOI 10.3103/S1052618809060089 // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2009. – Vol. 38, Issue 6. – Pp. 566–571. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103%2FS1052618809060089> (дата обращения: 29.10.2020).

7. **Astashev, V. K.** Ultrasonic Processes and Machines. Dynamics, Control and Applications / V. K. Astashev, V. I. Babitsky. – DOI 10.1007/978-3-540-72061-4. – Berlin : Springer, 2007. – 332 p. – URL: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-540-72061-4> (дата обращения: 29.10.2020).

8. **Gubbels, G. P. H.** Diamond Turning Of Glassy Polymers / G. P. H. Gubbels. – DOI 10.6100/IR613637. – Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2006. – 222 p. – URL: <https://research.tue.nl/en/publications/diamond-turning-of-glassy-polymers> (дата обращения: 29.10.2020).

9. **Shamoto, E.** Analysis of 3D Elliptical Vibration Cutting with Thin Shear Plane Model / E. Shamoto, N. Suzuki, R. Hino. – DOI 10.1016/j.cirp.2008.03.073 // CIRP Annals. – 2008. – Vol. 57, Issue 1. – Pp. 57–60. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850608001327> (дата обращения: 29.10.2020).

10. Ultraprecision Cutting of Molybdenum by Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting / T. Moriwaiki, H. Suzuki, J. Mizugaki [et al.] // Proceedings of 19<sup>th</sup> Annual Meeting, American Society for Precision Engineering (ASPE, 2004). – Orlando, 2004. – Pp. 82–92. – URL: <https://www.tib.eu/en/search/id/BLCP%3ACN055387370/Ultraprecision-Cutting-of-Molybdenum-by-Ultrasonic/> (дата обращения: 29.10.2020).

11. Ultraprecision Micromachining of Hardened Steel by Applying Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting / N. Suzuki, A. Nakamura, E. Shamoto [et al.]. – DOI 10.1109/MHS.2003.1249936 // MHS2003. Proceedings of 2003 International Symposium on Micromechatronics and Human Science (19–22 Oct. 2003). – Nagoya : IEEE, 2003. – Pp. 125–135. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1249936> (дата обращения: 29.10.2020).

12. **Скрябин, В. А.** Работоспособность конструкции установки для финишной обработки незакрепленным абразивом среднегабаритных деталей сложного профиля / В. А. Скрябин, И. К. Крамченинов. – DOI 10.15507/0236-2910.027.201704.607-619 // Вестник Мордовского университета. – 2017. – Т. 27, № 4. – С. 607–619. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/56-17-4/370-10-15507-0236-2910-027-201704-10> (дата обращения: 29.10.2020). – Рез. англ.

13. **Скрябин, В. А.** Установка для обработки деталей со сложным профилем рабочей поверхности / В. А. Скрябин. – DOI 10.15507/0236-2910.028.201804.552-561 // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 4. – С. 552–561. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/75-18-4/571-10-15507-0236-2910-028-201804-6> (дата обращения: 29.10.2020). – Рез. англ.

14. **Скрябин, В. А.** Особенности расчета кинематических параметров и величины шероховатости при абразивной доводке запорных поверхностей корпусов задвижек, соединяющих трубы / В. А. Скрябин. – DOI 10.15507/2658-4123.029.201904.546-559 // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 4. – С. 546–559. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/86-19-4/737-10-15507-0236-2910-029-201904-5> (дата обращения: 29.10.2020). – Рез. англ.

15. **Скрябин, В. А.** Камерная обработка деталей типа дисков и кулачков / В. А. Скрябин. – DOI 10.15507/0236-2910.026.201604.475-489 // Вестник Мордовского университета. – 2016. – Т. 26, № 4. – С. 475–489. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles-en/65-16-5/454-10-15507-0236-2910-026-201604-05> (дата обращения: 29.10.2020). – Рез. англ.

*Поступила 11.06.2020; принята к публикации 20.09.2020; опубликована онлайн 30.12.2020*

*Об авторе:*

**Скрябин Владимир Александрович**, профессор кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» (440000, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), доктор технических наук, Researcher ID: R-2385-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-9198>, vs\_51@list.ru

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Libby Ch.C. Sonic Riveting of Aircraft Aluminum Alloys. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*. 1969; 16(3):117-125. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/T-SU.1969.29513>
2. Kozochkin M.P., Solis-Pinargote N.V. [Ultrasonic Blade Vibration Chip Forming Features]. *Mashinostroitel* = Mechanical Engineer. 2011; (2):29-35. (In Russ.)
3. Astashev V.K., Andrianov N.A., Kozochkin M.P., et al. On the Implementation of Ultrasonic Technology. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* = Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2009; (6):52-58. Available at: <http://naukarus.com/k-realizatsii-avtozonansnoy-ultrazvukovoy-tehnologii> (accessed 29.10.2020). (In Russ.)
4. Solis N.W., Kozochkin M.P. Definition of the Shear Angle of Chip at Ultrasonic Vibration Turning by Means of High Speed Video Camera. *Vestnik Rossiyskogo universiteta družby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya* = RUDN Journal of Engineering Researches. 2010; (3):60-65. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-ugla-sdviga-struzhki-pri-ultrazvukovom-tochenii-s-pomoschyu-vysokoskorostnoy-videoseмки> (accessed 29.10.2020). (In Russ.)
5. Astashev V.K. [About Nonlinear Dynamics of Ultrasonic Technological Processes and Systems]. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya* = Science and Technology Development Bulletin. 2007; (2):18-25. Available at: <http://www.vnt.rur.ru/ftpgetfile.php?id=29> (accessed 29.10.2020). (In Russ.)
6. Astashev V.K., Andrianov N.A., Kozochkin M.P., et al. On the Implementation of Ultrasonic Technology. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2009; 38(6):566-571. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1052618809060089>

7. Astashev V.K., Babitsky V.I. Ultrasonic Processes and Machines. Dynamics, Control and Applications. Berlin: Springer; 2007. 332 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72061-4>
8. Gubbels G.P.H. Diamond Turning of Glassy Polymers. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven; 2006. 222 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.6100/IR613637>
9. Shamoto E., Suzuki N., Hino R. Analysis of 3D Elliptical Vibration Cutting with Thin Shear Plane Model. *CIRP Annals*. 2008; 57(1):57-60. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.073>
10. Moriwaki T., Suzuki H., Mizugaki J., et al. Ultraprecision Cutting of Molybdenum by Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting. In: Proceedings of 19<sup>th</sup> Annual Meeting, American Society for Precision Engineering (ASPE, 2004). Orlando; 2004. Pp. 82-92. Available at: <https://www.tib.eu/en/search/id/BLCP%3ACN055387370/Ultrprecision-Cutting-of-Molybdenum-by-Ultrasonic/> (accessed 29.10.2020). (In Eng.)
11. Suzuki N., Nakamura A., Shamoto E., et al. Ultraprecision Micromachining of Hardened Steel by Applying Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting. In: MHS2003. Proceedings of 2003 International Symposium on Micromechatronics and Human Science (19-22 Oct. 2003). Nagoya: IEEE; 2003. Pp. 125-135. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/MHS.2003.1249936>
12. Skryabin V.A., Kramcheninov I.K. Installation Design Capacity for Finish Treatment of Complex Profile Medium Size Parts by Unsupported Abrasive. *Vestnik Mordovskogo universiteta = Mordovia University Bulletin*. 2017; 27(4):607-619. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.027.201704.607-619>
13. Skryabin V.A. The Installation for Processing of Parts with a Complex Profile of Working Surface. *Vestnik Mordovskogo universiteta = Mordovia University Bulletin*. 2018; 28(4):552-561. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.552-561>
14. Skryabin V.A. Features of Calculating Kinematic and Roughness Parameters at Abrasive Finishing of Shut-Off Surfaces of Gate Valve Bodies Connecting Pipes. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems*. 2019; 29(4):546-559. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.546-559>
15. Skryabin V.A. Chamber Treatment Process of Disks and Fists. *Vestnik Mordovskogo universiteta = Mordovia University Bulletin*. 2016; 26(4):475-489. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.026.201604.475-489>

*Received 11.06.2020; revised 20.09.2020; published online 30.12.2020*

*About the author:*

**Vladimir A. Skryabin**, Professor of the Engineering Technology Chair, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440000, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: R-2385-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-9198>, vs\_51@list.ru

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

# МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING

УДК 629.463.64:004.93

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202004.637-658

Оригинальная статья



## Унификация расчетов производительности транспортных и транспортно-технологических средств

Н. А. Майстренко<sup>1</sup>, В. П. Уваров<sup>1</sup>, А. Г. Левшин<sup>1</sup>,  
Д. О. Хорт<sup>2\*</sup>, О. С. Воротникова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный  
университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»  
(г. Москва, Российская Федерация)

<sup>2</sup>ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр  
ВИМ» (г. Москва, Российская Федерация)

\*[dmitriyhort@mail.ru](mailto:dmitriyhort@mail.ru)

**Введение.** Транспортный процесс – это изменение места положения материалов. При этом, если перемещение груза между пунктами осуществляется напрямую, исключая технологические (полевые) операции, данный процесс можно рассматривать как чисто транспортный в виде частного случая транспортно-производственного процесса. В связи с этим предлагается этот процесс считать компонентом транспортно-технологического процесса, что в свою очередь требует корректирования применяемых методов нормирования работ. Целью исследования является разработка математической модели и алгоритма, позволяющих привести к единообразию расчет производительности разных видов, типов транспортных и технологических средств на основании формулирования зависимости составляющих производительности от мощности средства как их основного классификатора.

**Материалы и методы.** Определение норм выработки осуществлялось методами экстраполяции, интерполяции или аппроксимации по их расчетной производительности. Наряду с этим для определения экстремумов использовался классический метод дифференцирования функций.

**Результаты исследования.** При длине транспортировки удобрений по прямоточной технологии  $L_r = 9$  км и дозе внесения  $U = 0,06$  кг/м<sup>2</sup> получены следующие значения производительности (выработки) технических средств: а) для транспортных средств при доставке удобрений в хранилище автомобилем Урал-432065 (кузов)  $W = 9,1$  т/ч,  $W = 6,3$  т/ч для трактора с прицепом МТЗ-82.1+2ПТС-6; б) для транспортно-технологических средств при транспортировании и распределении удобрений автомобилем Урал-432065 (разбрасыватель Amazone)  $W = 5,5$  т/ч,  $W = 3,9$  т/ч для трактора с разбрасывателем МТЗ-82.1+РУМ-6.

**Обсуждение и заключение.** На основании анализа методов обоснована необходимость унификации, расчета нормированных объемов работ, выбора состава, сравнения эффективности использования мобильных средств в случае их функционирования в качестве как транспортного, так и транспортно-технологического назначения. В основе

© Майстренко Н. А., Уваров В. П., Левшин А. Г., Хорт Д. О., Воротникова О. С., 2020



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

способа определения норм выработки лежит вывод зависимости вне- и внутрицикловых составляющих баланса времени смены от мощности двигателя мобильного средства. Иллюстрируется блок-схема алгоритма расчета эксплуатационных показателей мобильных средств. Реализация алгоритма приводится на примере использования специализированного автомобиля на транспортных и транспортно-технологических операциях.

**Ключевые слова:** единичный цикл работ, вне- и внутрицикловые элементы времени смены, производительность, норма выработки, унификация, математическая модель, алгоритм, блок-схема

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

**Для цитирования:** Унификация расчетов производительности транспортных и транспортно-технологических средств / Н. А. Майстренко, В. П. Уваров, А. Г. Левшин [и др.]. – DOI [10.15507/2658-4123.030.202004.637-658](https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.637-658) // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 637–658.

Original article

## Unification of Calculating the Performance of Vehicles and Transport-Technological Facilities

N. A. Maistrenko<sup>a</sup>, V. P. Uvarov<sup>a</sup>, A. G. Levshin<sup>a</sup>,  
D. O. Khort<sup>b\*</sup>, O. S. Vorotnikova<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Russian Timiryazev State Agrarian University  
(Moscow, Russian Federation)

<sup>b</sup>Federal Scientific Agroengineering Center VIM  
(Moscow, Russian Federation)

\*[dmitriyhort@mail.ru](mailto:dmitriyhort@mail.ru)

**Introduction.** In agricultural production during transportation of goods it is accepted to allocate transport and transport-technological processes with the corresponding methods of rationing works. The peculiarity of the processes is the sequential execution of cyclic operations, providing transportation of technological material to the destination directly or with preliminary collection (subsequent distribution) on the field. At the same time, if the goods are moved directly between points, excluding technological (field) operations, this process can be considered a purely transport one, a special case of the transport and technological process. In this regard, it is proposed to consider this process as a component of the transport and technological process, which in turn requires correcting the applied methods for setting performance standards. The aim of the study is to develop a mathematical model and algorithm for standardizing the calculation of the performance of different vehicles and transport and technological facilities through formulating the dependence of the performance components on the power of the said facilities as their main classifier.

**Materials and Methods.** The performance standards were identified by the extrapolation, interpolation or approximation methods based on their estimated performance. The classical method of differentiating functions was used to find the extrema.

**Results.** At length of fertilizer transportation by direct-flow technology  $L_T = 9$  km and application dose  $U = 0.06$  kg/m<sup>2</sup>, the following values of transport and technological facilities performance have been obtained: a) for vehicles to deliver fertilizers to fertilizer storehouses by Ural-432065 truck (body)  $W = 9.1$  t/h,  $W = 6.3$  t/h for tractor with MTZ-82 trailer. 1+2PTS-6; b) for transport and technological facilities to transport and distribute fertilizers by Ural-432065 (Amazone spreader)  $W = 5.5$  t/h,  $W = 3.9$  t/h for tractor with MTZ-82.1+RUM-6 trailer.

**Discussion and Conclusion.** Based on the analysis of methods, the authors have made the case for the unification of calculating the standardized volumes of works, choice of composition, and comparison of the effectiveness of using vehicles, if they are used as transport and transport-technological facilities. A mathematical model and algorithm for

a uniform calculation of the performance of different transport and technological facilities are presented. The way to determine the approximate rate of generation of funds that do not have standard indicators of work. The explanation of the innovations is accompanied by a formula device, which is based on the conclusion of the dependencies of out- and in-cycle components of the shift time balance on the engine power of the mobile device. The block diagram of the algorithm to calculate performance standards for vehicles is illustrated. The implementation of the algorithm is given by the example of using a specialized vehicle for transport and transport-technological operations.

**Keywords:** single cycle of works, out- and in-cycle elements of shift time, performance, performance standards, unification, mathematical model, algorithm, block diagram

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

**For citation:** Maistrenko N.A., Uvarov V.P., Levshin A.G., et al. Unification of Calculating the Performance of Vehicles and Transport-Technological Facilities. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(4):637-658. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.637-658>

## Введение

В сельскохозяйственном производстве при перевозке грузов принято выделять транспортные и транспортно-технологические процессы с соответствующими методами нормирования работ. Особенность процессов заключается в последовательном выполнении цикловых операций, обеспечивающих перевозку технологического материала к пункту назначения напрямую или с предварительным сбором (последующим распределением) его на поле.

Изначально исследованию предшествовал анализ источников по определению нормативной выработки и расхода топлива при выполнении механизированных работ в сельскохозяйственном производстве [1].

Повышение эффективности транспортно-технологических и транспортных процессов возможно достичь благодаря определению оптимальных параметров мобильных энергетических средств.

Транспортно-технологические операции являются неотъемлемой частью технологических карт для растениеводства, которые составляются на основе многолетних научных исследований и являются синтезом опыта, испытаний и наблюдений при выполнении производственных процессов.

В транспортно-производственных процессах перемещение технологи-

ческого материала между пунктами осуществляется напрямую с предварительным сбором (или последующим распределением) его на участке рабочего пути. В этом процессе сочетаются транспортные и технологические (полевые) операции.

Принятый в нормировании подход разделения перевозок грузов в сельскохозяйственном производстве на транспортные и транспортно-производственные уместно скорректировать, а именно, оба процесса следовало бы объединить и выделить частный случай транспортно-производственного процесса, в котором не предусмотрено выполнение технологической операции. Это даст возможность рассчитывать и сравнивать по единой методике состав и эффективность использования мобильных технических средств с равной или разной мощностью в транспортных и технологических операциях. Например, вывоз удобрений к хранилищам, агрегатам на поле или транспортирование удобрений с прямоточным распределением их по поверхности поля. Для выполнения этих работ используются в первом случае тракторы с прицепами и грузовые автомобили, а во втором случае – тракторы с разбрасывателем и специализированные автомобили. К последним относятся и перспективные средства на шасси УРАЛ-432065, агрегируемые сменными технологи-

скими адаптерами [2]. Для таких средств актуально нормирование объемов выработки и расхода топлива в случае их функционирования в качестве как транспортного (ТС) так, и транспортно-технологического (ТТС) средства.

Унификация расчетов эксплуатационной производительности ТС и ТТС при реализации «чистой» транспортной работы, а также собирательных и распределительных операций основана на классических методах математического моделирования и оптимизации подобных процессов.

Приведенные алгоритмы оптимизации реализованы в виде компьютерных программ, способствующих определению экстремумов целевых функций – критериев оптимизации.

Полученные значения потребительских свойств ТС и ТТС при выполнении сельскохозяйственных операций позволят производителям с достаточной точностью осуществлять оптимальное планирование механизированных работ, а также получить ориентир при выборе основных параметров перспективных мобильных энергетических средств на этапе их проектирования.

Цели исследования – разработка математической модели и алгоритма, позволяющих привести к единообразию расчет производительности разных видов, типов ТС и ТТС на основании формулирования зависимости составляющих производительности от мощности средства как их основного классификатора; определение ориентировочной нормы выработки мобильных средств, для которых не установлены нормативные показатели работы.

### **Обзор литературы**

Для оптимального планирования механизированных работ, в том числе транспортных и транспортно-технологических, необходимы значения показателей, характеризующих производственные процессы, такие как эксплуатационная производительность, расход топлива, затраты труда и др.

Сегодняшнее состояние машинно-тракторного парка в агропромышленном комплексе отрицательно влияет на процесс повышения технологической организации отрасли. Из 0,350 млн ТС (грузовых автомобилей), используемых в сельскохозяйственных предприятиях, более 60 % превышают установленный срок эксплуатации, являются технически устаревшими и не выполняют задачи, поставленные перед автомобилями, работающими на сельскохозяйственных предприятиях [3–6]. Появление новых ТС и ТТС приведет к повышению требований к инженерно-технической службе и усложнит оптимальное использование мобильных энергетических средств.

Одним из нормообразующих факторов при планировании транспортных и транспортно-технологических работ являются следующие производственные условия: конфигурация и размер полей; длина транспортировки; доза внесения технологического материала и урожайность культур.

Учитывая сложившуюся ситуацию с отсутствием типовых норм выработки на современные ТС и ТТС, остается нерешенным вопрос о планировании механизированных работ, что затрудняет прогнозирование потребности в технике, живой силе, а также возможности повышения их резервов.

Анализ действующих нормативно-правовых актов показывает, что предприятия-изготовители освобождены от обязательного проведения испытаний.

Установленный Правительством Российской Федерации порядок определения критериев, функциональных характеристик (потребительских свойств), эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования подтверждает актуальность исследований в области оптимизации данных показателей и стимулируется поддержкой государства.

Важность определения оптимальных значений основных параметров машинно-тракторных агрегатов и их со-

отношения отражена в трудах В. П. Горячкина [7]. Инструментом для решения вопроса может послужить метод изучения динамических систем и процессов, происходящих в них [8].

Решение вопросов оперативного планирования, а также необходимости определения потребности в ТС невозможно без конкретных значений показателей потребительских свойств [9].

В работах автора В. А. Иванова оптимизированы параметры грузоподъемности в зависимости от мощности двигателя ТС и производственно-эксплуатационных условий.

Анализ зарубежных источников показал, что вопросы оптимизации в основном направлены на техническое и экономическое обеспечение с учетом размеров хозяйств [10]. Зачастую вопросы поиска оптимальных параметров технологических средств связаны с решением частных задач. Необходимость широкого спектра технических средств отражена в трудах Д. А. Загарина [11].

Изменение структуры товаропроизводителей, технологий, типажей энергетических средств актуализирует вопрос оптимальной организации транспортных и транспортно-технологических процессов. Данную задачу невозможно решить без определения эксплуатационных показателей с последующей их оптимизацией, что требует научного исследования в данной области.

### **Материалы и методы**

При сравнении результатов теоретического расчета по формулам с данными из типовых норм выработки отмечено их расхождение в основном из-за допущенных упрощений и искажений закономерностей, собственных рассматриваемым процессам. Например, не соблюдается характерная для таких процессов корреляция между мощностью и производительностью мобильных средств. Нормативная сменная выработка приводится в объемах, не кратных грузоподъемности средства,

то есть количество ездов с грузом при заданном коэффициенте использования грузоподъемности не равно целому числу. Производительность ТС установлена без учета возможного оптимального изменения ширины захвата в зависимости от производственных условий выполнения процесса [12].

Перечисленные и другие упущения в анализируемых методиках устранялись посредством их корректирования, что позволило унифицировать расчет производительности ТС и ТТС. Вначале выделялись из баланса времени смены вне- и внутрицикловые элементы, а затем устанавливалась их зависимость от мощности. Наряду с этим формулировались зависимости частных величин, входящих в формулу, от основной комплексной характеристики средств – мощности и нормообразующих показателей внешних условий производства: доз сбора (распределения) материала, расстояния перевозок. К частным величинам отнесены, например, скорости движения средств с грузом и без груза при поворотах на поле, продолжительность простоев, устранения неисправностей, отказов, длина холостого хода и др.

В действующих нормах выработки производительность обоих видов средств исчисляется в разных размерностях [1]. При унификации расчетов выбрана одинаковая для них размерность – тонн в час.

Математическая модель реальной системы является тем абстрактным формально описанным объектом, изучение которого возможно математическими методами, в том числе и с помощью математического моделирования. Формализации любого реального процесса предшествует изучение структуры составляющих его явлений. Содержательное описание – исходный материал для последующих этапов формализации: построения формализованной схемы процесса и математической модели для него [13].

Безусловно, оптимизация любого процесса немыслима без критерия или критериев оптимизации – целевой функции. В данной математической модели критерием оптимизации являлся эксплуатационный параметр – производительность. А значение целевой функции в нашем случае должно стремиться к максимуму.

В качестве основного массива значений и статистических данных, являющихся исходными при оптимизации, в соответствии с таблицей 1, и характеризующих транспортный, транспортно-технологический процессы, послужили результаты ранее проведенного научного исследования Н. А. Майс-

тренко и полевых приемочных испытаний сменного технологического адаптера для внесения твердых минеральных удобрений СТА-5ТМ на базе шасси грузового автомобиля сельскохозяйственного назначения Урал-432065.

Затем, используя предложенный алгоритм расчета, определены значения параметров, характеризующих процесс оптимизации в различных эксплуатационных вариациях, в соответствии с таблицей 2.

Ниже приводится аргументация поэлементного математического моделирования эксплуатационной производительности  $W$  – важного нормообразующего показателя, характеризующего

Таблица 1

Table 1

**Исходные данные для модели оптимизации**  
**Input data for optimization model**

Константы / Constants	Длина транспортировки $L_r$ , км / Transport length $L_r$ , km			
	3	9	27	54
$U$ , кг/м <sup>2</sup> / $U$ , kg/m <sup>2</sup>	0,06	0,06	0,06	0,06
$Q$ , кг / $Q$ , kg	5 500,00	5 500,00	5 500,00	5 500,00
$M_3$ , кг / $M_3$ , kg	7 500,00	7 500,00	7 500,00	7 500,00
$\xi_r$ – коэф. исп. мощн. / $\xi_r$ – capacity factor	0,90	0,90	0,90	0,90
$g$ , Н/кг / $g$ , N/kg	9,81	9,81	9,81	9,81
$f_r$ – коэф. перекаг. дор. / $f_r$ – rolling resistance coefficient on the road	0,03	0,03	0,03	0,03
$\alpha$ , град / $\alpha$ , gon	1,00	1,00	1,00	1,00
$\eta_m$ и $\eta_\sigma$ – КПД транс. / $\eta_m$ and $\eta_\sigma$ – transport efficiency	0,95	0,95	0,95	0,95
$\eta_{\delta p}$ – КПД букс. дорога / $\eta_{\delta p}$ – road towing efficiency	0,95	0,95	0,95	0,95
$\eta_{\delta r}$ – КПД букс. поле / $\eta_{\delta r}$ – field towing efficiency	0,80	0,80	0,80	0,80
$\omega$ , кг/м ( $Q = 6$ т; $B = 20$ м) / $\omega$ , kg/m ( $Q = 6$ t; $B = 20$ m)	275,00	275,00	275,00	275,00
$B$ , м / $B$ , m	20,00	20,00	20,00	20,00
$\omega_{var}$ , кг/м / $\omega_{var}$ , kg/m	72,00	124,71	216,00	305,47
$B_\omega$ , м / $B_\omega$ , m	76,40	44,10	25,50	18,00
$v_{кр}$	1,05	1,05	1,05	1,05
$E_{vx}$	1,15	1,15	1,15	1,15

**Параметры оптимизации**  
**Optimization parameters**

Параметры и их значения / Parameters and their values	Длина транспортировки $L_r$ , км / Transport length $L_r$ , km			
	3	9	27	54
$c$	0,760000000	0,760000000	0,760000000	0,7600000
$\mu$	0,204200000	0,353800000	0,586800000	0,7319000
$r$ , 1/кВт / $r$ , 1/kW	0,000440000	0,000250000	0,000150000	0,0001200
$e$	1,105700000	1,257500000	1,493900000	1,6410000
$\kappa$ , 1/кВт / $\kappa$ , 1/kW	0,000166000	0,000255000	0,000338000	0,0003560
$z$	1,309090000	3,927270000	11,781820000	23,5636400
$\mu_\omega$	0,400000000	0,517700000	0,640000000	0,7117000
$r_\omega$ , 1/кВт / $r_\omega$ , 1/kW	0,000230000	0,000170000	0,000140000	0,0001300
$e_\omega$	1,304300000	1,423700000	1,547800000	1,6205000
$\kappa_\omega$ , 1/кВт / $\kappa_\omega$ , 1/kW	0,000911000	0,000603000	0,000407000	0,0003360
$z_\omega$	5,000000000	8,660250000	15,000000000	21,2132000
$N_h$ , кВт / $N_h$ , kW	154,800000000	176,040000000	209,140000000	229,7400000
$H_d$ , кВт / $H_d$ , kW	318,390000000	840,540000000	1946,510000000	2756,1800000
$T_h$	0,611449724	0,549195630	0,465252514	0,4247307
$T_d$	0,534886128	0,371163556	0,214435244	0,1605352
$h$	0,687000000	0,604000000	0,509000000	0,4630000

полноту реализации потребительских свойств и использования мощности мобильных средств. Рассчитывается этот показатель по формуле:

$$W = (Q / t_0) \cdot \tau,$$

где  $Q$  – грузоподъемность средства, кг;  $t_0$  – основное («чистое») время перемещения груза (по дороге или по дороге и полю), с;  $\tau$  – коэффициент использования времени (часа) смены.

С целью исключения в последующих формулах коэффициентов перевода одной размерности в другую значения величин в них приводятся в системе СИ.

Тогда выражения для расчета значений производительности  $W_{TC}$  и  $W_{TTC}$

соответствующих средств могут быть представлены в виде:  $W_{TC} = Q \cdot V_r \cdot \tau / L_r$  и  $W_{TTC} = Q \cdot V_r \cdot \tau \cdot \mu / L_r$ . Из сравнения зависимостей следует, что для средств, используемых раздельно в качестве как ТС, так и TTC, уместно равенство:

$$W_{TTC} = W_{TC} \cdot \mu,$$

где  $\mu$  – коэффициент, корректирующий «чистую транспортную производительность» в связи с выполнением дополнительной «чистой работы на поле». При  $\xi_v = V_r / V_p$  применяется формула

$$\mu = \left( 1 + \frac{\xi_v \cdot \omega}{L_r \cdot U} \right)^{-1}. \text{ Если } \mu = 1 \text{ при } L_p = 0,$$

то TTC выполняет функции только ТС,

что дает основание вывести унифицированную формулу:

$$W = Q \cdot V_{\Gamma} \cdot \tau \cdot \mu / L_{\Gamma} \quad (1)$$

На изменения показателя  $W$  влияют параметры энергомашин ( $Q, V_{\Gamma}$ ), характеристики производства ( $L_{\Gamma}, U, c$ ) и организационно-технологические условия ( $\tau$ ). Первая и третья группы параметров зависят, а вторая не зависит от эксплуатационной мощности средства  $N$ . Доказано, что  $\omega$  также не зависит от  $N$  [12].

Последующие пояснения раскрывают влияние на  $N$  величин  $Q, V_{\Gamma}$  и  $\tau$ .

Установить раздельное влияние  $Q$  и  $V_{\Gamma}$  на  $N$  невозможно, так как они связаны между собой экспоненциально через баланс мощности. Предлагается выразить их произведение ( $Q \cdot V_{\Gamma}$ ) из баланса мощности для условий движения трактора или автомобиля по дороге в виде:

$$Q \cdot V_{\Gamma} = \frac{N \cdot \xi_N}{g \cdot f \cdot (1 + \delta_e + \delta_n + \delta_q) / (\eta_m \cdot \eta_{\sigma})}, \quad (2)$$

где  $\xi_N$  – коэффициент использования мощности;  $g = 9,81$  – сила тяготения, Н/кг;  $f$  – коэффициент сопротивления перемещению (в том числе на подъеме);  $\delta_e, \delta_n, \delta_q$  – отношение массы соответственно энергомашин  $M_e$ , прицепа  $M_n$  и груза в дополнительном прицепе  $Q_n$  к номинальной грузоподъемности  $Q$  основной емкости (кузова);  $\eta_m$  и  $\eta_{\sigma}$  – коэффициенты, учитывающие потери мощности в трансмиссии и на буксовании колес. В уравнение (2) вносятся следующие изменения. Так как ТТС не агрегатируют с дополнительными прицепами, то при расчете принимать  $\delta_n = 0$  и  $\delta_q = 0$ . Это относится и к ТС, укомплектованным только основным кузовом (емкостью) на шасси автомобиля или полуприцепом к трактору. Для внутри- и межхозяйственных перевозок не-

редко агрегатируют трактор одним дополнительным к основному прицепом, а автомобиль буксирует один прицеп.

Знаменатель в выражении (2) характеризует удельные (на единицу грузоперемещений) энергозатраты  $P_N$ , которые приблизительно одинаковы для однотипных средств разной мощности:

$$P_N = \frac{g \cdot f \cdot (1 + \delta_e + \delta_n + \delta_q)}{\eta_m \cdot \eta_{\sigma} \cdot \xi_N}. \quad (3)$$

С учетом (2) и (3) формула (1) для определения  $W$  преобразована в виде:

$$W = \frac{N \cdot \mu}{P_N \cdot L_{\Gamma}} \cdot \tau. \quad (4)$$

Следующие рассуждения связаны с исследованием зависимости  $\tau = f(N)$ , что включает вывод собственно формулы и разработку алгоритма расчета численных значений, составляющих  $\tau$ .

Определяется  $\tau$  как индекс организационно-технологической эффективности использования за час смены классическим способом – делением основного «чистого» времени  $T_{oc}$  за смену на продолжительность смены  $T_{cm}$ , иначе  $\tau = T_{oc} / T_{cm}$ .

Влияние  $N$  на составляющие  $T_{cm} = \sum T_i$  можно исследовать на основании прямолинейных зависимостей:  $T_i = a_i \pm K_i \cdot N$ , в том числе когда  $a_i = 0$  или  $N = 0$ . Установлено, что такими уравнениями описывается изменение  $T_i$  (с отклонением до  $\pm 0,5\%$ ) в диапазоне мощности от 50 до 200 кВт для тракторных ТС и ТТС [14; 15]. Для автомобильных ТС и ТТС эти границы меньше в два раза (от 60 до 180 кВт), что дает основание на применение для обоих видов средств этих формул и на получение результатов с достаточно явной корреляцией [14].

Начать исследование предлагается с выделения из баланса времени смены  $T_{cm} = T_{нц} + T_{вц}$  двух групп элементов:

внутрицикловых  $T_{\text{нц}}$  и внецикловых  $T_{\text{вц}}$ . Вторую группу составляют элементы, независимые  $T_{\text{пс}}$  и зависящие  $T_{\text{то}}$  от мощности, то есть  $T_{\text{вц}} = T_{\text{пс}} + T_{\text{то}}$ . Первую группу формирует сумма  $\sum t_i$  каждого элемента времени, входящего в единичный цикл работ  $t_{\text{ц}}$  и проявляющегося в каждом из всех циклов  $n_{\text{ц}}$  за смену. Тогда  $T_{\text{вц}} = \sum t_i \cdot n_{\text{ц}} = t_{\text{ц}} \cdot n_{\text{ц}}$ .

Основной компонент  $T_{\text{нц}}$  – это  $T_{\text{то}}$ , то есть затраты времени на ежесменное техническое обслуживание (ЕТО) энергомашины и технологического оборудования, а также проведение наладок и регулировок (настройки на заданную дозу внесения  $U$  и ширину  $B$  захвата). При этом снятие и установка рабочего оборудования на автомобиле или агрегатирование трактора с рабочими машинами проводятся вне смен, выделенных для транспортно-производственного процесса. ЕТО проводят тракторист (водитель) и слесарь. Время  $T_{\text{то}}$  включает постоянную  $t_{\text{тос}}$  и переменную  $t_{\text{тоV}}$  части времени проведения технического обслуживания трактора или шасси автомобиля соответственно независимые ( $t_{\text{тос}} = t_{\text{то}} \cdot v_{\text{то}}$ ) и зависящие ( $t_{\text{тоV}} = S_{\text{то}} \cdot v_{\text{то}} \cdot N$ ) от мощности. С учетом коэффициента пропорциональности  $S_{\text{тоV}}$ , с/Вт, время  $T_{\text{то}}$ , в зависимости от  $N$ , определяется по формуле  $T_{\text{то}} = (t_{\text{то}} + S_{\text{то}} \cdot N) \cdot v_{\text{то}}$ . Величины  $t_{\text{то}}$  и  $S_{\text{то}}$  разные для тракторных и автомобильных как ТС, так и ТТС. Коэффициент  $v_{\text{то}}$  характеризует превышения продолжительности технического обслуживания технологического оборудования и энергомашины.

Время  $T_{\text{пс}}$  выделяется на следующие действия: получение наряда (задания на работу), разъяснение нюансов организации и контроля  $t_{\text{сп}}$ ; движение от стоянки к месту погрузки груза, с поля на место стоянки или приема пищи и обратно; реализация контроля качества выполненных работ; отчет о выполнении наряда подготовка к межсменной стоянке  $t_{\text{св}}$ ; отдых и гигиена  $t_{\text{сл}}$ . Тогда  $T_{\text{пс}} = t_{\text{сп}} + t_{\text{св}} + t_{\text{сл}}$ .

Данные элементы времени  $T_{\text{пс}}$  принимаются постоянными независимо от типов и марок ТС и ТТС. Их значения регламентированы типовыми нормами выработки или договорными соглашениями на выполнение конкретного производственного процесса.

Итоговое выражение  $T_{\text{нц}} = t_{\text{сп}} + t_{\text{св}} + t_{\text{сл}} + v_{\text{то}}(t_{\text{то}} + S_{\text{то}} \cdot N)$  позволяет без детализации по единичным циклам в целом определить время  $T_{\text{вц}}$  за смену из уравнения  $T_{\text{вц}} = T_{\text{см}} + T_{\text{нц}}$ . Долю  $T_{\text{вц}}$ , затрачиваемого на выполнение каждого единичного цикла работ, можно установить из расчета времени  $t_{\text{ц}}$  для разных видов и типов средств и из сопоставления частных зависимостей для каждого из слагаемых баланса времени  $t_{\text{ц}}$  в функции мощности.

Время  $t_{\text{ц}}$  включает зависящие от  $N$  следующие элементы:  $t_{\text{зо}}$  – время технологического обслуживания с учетом ожидания погрузки и других вероятностно-возможных простоев;  $t_{\text{ос}}$  – время основной («чистой») транспортно-полевой (для ТТС) или транспортной (для ТС) работ;  $t_{\text{хг}}$  – время холостой (для ТТС и ТС) работы;  $t_{\text{кр}}$  – время холостых ходов при выполнении полевой (для ТТС) работы или время выгрузки технологического материала из кузова (для ТС);  $t_{\text{но}}$  – время устранения технологических неисправностей и технических отказов.

Время  $t_{\text{зо}}$  – определяются по формуле  $t_{\text{зо}} = 1,25 \cdot Q / W_n$ , а с учетом зависимости  $Q = \alpha_Q + K_Q \cdot N$  из уравнения:

$$t_{\text{зо}} = 1,25(\alpha_Q + K_Q \cdot N) / W_n,$$

где  $\alpha_Q$  и  $K_Q$  – коэффициенты пропорциональности, кг и кг/Вт соответственно;  $W_n$  – производительность погрузчика, кг/с. Коэффициент 1,25 учитывает вероятность простоев за время  $t_{\text{ц}}$ . Для последующих расчетов выделяется из  $t_{\text{зо}}$  постоянная  $t_{\text{зос}}$  и переменная  $t_{\text{зоV}}$  составляющие в виде  $t_{\text{зос}} = 1,25 \cdot \alpha_Q / W_n$  и  $t_{\text{зоV}} = 1,25 K_Q \cdot N / W_n$ .

В большей мере на  $t_{\text{зо}}$  влияет  $t_{\text{зоV}}$ . При упрощенных расчетах можно при-

нимать  $\alpha_Q = 0$ , а  $K_Q = 0,042$  для автомобильных и  $K_Q = 0,084$  для тракторных средств.

Время  $t_{OC}$  для ТТС рассчитывается из равенства  $t_{OC} = L_{\Gamma} / V_{\Gamma} + L_P / V_P$ . На основании зависимостей  $V_{\Gamma} = 1 / (\alpha_V - K_V \cdot N)$ ,  $V_P = V_{\Gamma} / \xi_V$ ,  $L_P = \omega / U$  выражение  $t_{OC}$  в функции мощности примет вид:

$$t_{OC} = [L_{\Gamma} + (\omega \cdot \xi_V / U)] \cdot (\alpha_V - K_V \cdot N),$$

где  $\alpha_V$  – постоянная составляющая уравнения,  $1/(м/с)$ ;  $K_V$  – темп изменения обратной величины скорости движения от мощности,  $1/[(м/с) \cdot (Вт)]$ . Для ТС время  $t_{OC}$  определяется из уравнения  $t_{OC} = L_P (\alpha_V - K_V \cdot N)$ . Значение  $N$  ограничивается дорожными условиями, поэтому расчеты допустимо проводить при  $K_V = 0$  и величинах  $\alpha_V = 0,015$   $1/(км/ч)$  для автомобильных,  $\alpha_V = 0,038$   $1/(км/ч)$  для тракторных средств.

Время  $t_{ХГ}$  при нормировании подобных работ принимается на 10 % меньше  $t_{\Gamma}$ , тогда  $t_{ХГ} = 0,9 \cdot L_{\Gamma} (\alpha_V - K_V \cdot N)$ , для которого  $t_{ХГ} = t_{ХГС} + t_{ХГВ}$ . Его составляющие – независимые  $t_{ХГС}$  и зависимые  $t_{ХГВ}$  от мощности, которые могут быть представлены в виде  $t_{ХГС} = 0,9 \cdot L_{\Gamma} (\alpha_V - 2K_V \cdot N_{CB})$ ,  $t_{ХГВ} = 0,9 \cdot L_{\Gamma} K_V N$  при средневзвешенном значении  $N_{CB}$  для одного из трех вариационных уровней, которому соответствует мощность исследуемого мобильного средства. По результатам обработки статистических данных получены мощностные вариации, наиболее часто реализуемые в транспортно-производственных процессах со средними значениями мощности и их отклонениями  $60 \pm 10$ ,  $90 \pm 20$ ,  $140 \pm 30$  кВт, которые принимаются при анализе частных величин  $t_{\Pi}$ .

Время  $t_{ХР}$  зависит от  $K_X$  – количества поворотов для ТТС или заездов на погрузку для ТС; от  $v_X$  – удельного (на единицу мощности) времени поворота или разгрузки, с/Вт; а также от  $\beta$  – коэффициента, учитывающего сложность маневрирования средств.

Эти величины связаны математическим выражением:  $t_{ХР} = K_X \cdot v_X \cdot \beta_X \cdot N$ . Для ТС  $K_X$ , а для ТТС:

$$K_X = \omega / (U \cdot L),$$

где  $L$  – длина гона поля, м. Величина  $v_X$  определяется из равенств: а) для ТС  $v_X = K_Q \cdot \gamma_B$  при константах  $K_Q = Q / N$ , кг/кВт,  $\gamma_B = t_B / Q$  с/кг (приблизительно  $\gamma_B = 0,01$  т/ч), где  $t_B$  – время выгрузки продукции из кузова, с; б) для ТТС  $v_X = \gamma_{\Pi} \cdot V_{\Pi}$  при постоянном  $\gamma_{\Pi} = l_{\Pi} / N$  м/Вт (приблизительно  $\gamma_{\Pi} = 28 \cdot 10^{-4}$  км/кВт), где  $l_{\Pi}$  и  $V_{\Pi}$  длина, м, и скорость поворота, м/с. Примем  $\beta_X = 1$  для автомобильных ТС и ТТС, а  $\beta_X = 3$  и  $\beta_X = 2$  для тракторных ТС и ТТС соответственно.

Время  $t_{НО}$  определяется с учетом следующих особенностей. В основном неисправности возникают только в ТТС при выполнении полевых работ, а отказы проявляются в ТС при рабочих ходах на дороге, а в ТТС на дороге и в поле. Вероятные периодичности наступления отказов  $A_{OT}$  и неисправностей  $A_{HT}$  рассчитываются на основании среднего пробега (м) на отказ  $L_{OT}$ , на неисправность  $L_{HT}$  и массы (кг) перемещаемого груза  $Q$  как  $A_{OT} = L_{OT} \cdot Q$  и  $A_{HT} = L_{HT} \cdot Q$ . С помощью средних продолжительностей устранения отказа  $t_{OT}$  и неисправности  $t_{HT}$ , а также числа отказов  $n_{OT}$  и неисправностей  $n_{HT}$  рассчитывается суммарная продолжительность восстановления работоспособного состояния техники из выражения  $t_{НО} = n_{OT} \cdot t_{OT} + n_{HT} \cdot t_{HT}$ . Так как силовое воздействие на узлы, механизмы, детали ТС и ТТС в большинстве случаев зависит от массы груза, то отказ однотипных средств следует относить к единичной массе ( $q = 1$ ) груза. Тогда средство предлагается рассматривать как систему из  $Q / q$  одинаковых элементов, для каждого из которых наработка (м) на отказ и неисправность составляют соответственно  $l_{OT}$  и  $l_{HT}$ . Согласно теории надежности величина средней про-

должительности отказа и неисправности составляет  $L_{OT} = 1 / [Q / (q \cdot l_{OT})]$  и  $L_{HT} = 1 / [Q / (q \cdot l_{HT})]$ . Значения  $n_{OT}$  вычисляются путем деления наработки за цикл  $A_{OC} = Q \cdot (L_{\Gamma} + 0,5 \cdot \omega / U)$  на наработку между соответственно отказами  $A_{OT}$  и неисправностями  $A_{HT}$ , а именно  $n_{OT} = \frac{Q \cdot (L_{\Gamma} + 0,5 \cdot \omega / U)}{q \cdot l_{OT}}$ ;

$$n_{HT} = \frac{Q \cdot (L_{\Gamma} + 0,5 \cdot \omega / U)}{q \cdot l_{HT}}$$

На основании развернутых выражений для определения  $n_{OT}$ ,  $L_{OT}$ ,  $n_{HT}$ ,  $L_{HT}$   $Q$  получена конечная формула:

$$t_{HO} = \frac{(\alpha_Q + K_Q \cdot N / (L_{\Gamma} + 0,5 \cdot \omega / U))}{q} \times \left( \frac{t_{OT}}{l_{OT}} + \frac{t_{HT}}{l_{HT}} \right).$$

Слагаемые этой формулы, которые не зависят от мощности  $t_{HOС} = \frac{\alpha_Q \cdot (L_{\Gamma} + 0,5 \cdot \omega / U)}{q} \cdot \left( \frac{t_{OT}}{l_{OT}} + \frac{t_{HT}}{l_{HT}} \right)$ ,

в расчетах могут не применяться, так как приблизительно  $\alpha_Q = 0$ . Переменное слагаемое, зависящее от мощности, выражается в виде  $t_{HOV} = \left[ \frac{K_Q \cdot (L_{\Gamma} + 0,5 \cdot \omega / U)}{q} \cdot \left( \frac{t_{OT}}{l_{OT}} + \frac{t_{HT}}{l_{HT}} \right) \right] \cdot N$ .

Данные формулы верны для ТТС, а для ТС принимать  $t_{HT} = 0$ ,  $\omega / U = 0$ .

После обобщения полученных закономерностей изменения элементов баланса времени смены единичного цикла работ для средств, входящих в один из трех вариационных мощностных уровней, получено выражение времени цикла в функции мощности:

$$t_{Ц} = a_1 + (b_1 - c_1) \cdot N,$$

где  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$  – частные коэффициенты.

$$a_1 = a_V \cdot (1,9 L_{\Gamma} + \omega \cdot \xi_V / U), \text{ с/Вт};$$

$$c_1 = K_V \cdot (1,9 \cdot L_{\Gamma} + \omega \cdot \xi_V / U), \text{ с/Вт};$$

$$b_1 = 1,25 \cdot (a_Q \cdot K_Q / N_{CB}) / W_{\Pi} + K_X \cdot B_X \cdot \beta_X + [(a_Q \cdot K_Q / N_{CB}) \cdot (L_{\Gamma} + 0,5 \cdot \omega \cdot U) / q] \times (t_{OT} / l_{OT} + t_{HT} / l_{HT}), \text{ с/Вт}.$$

Определить количество циклов за смену можно из условия  $n_{Ц} = T_{ВЦ} / t_{Ц} \rightarrow n_1$ , округлив расчетное число  $n_{Ц}$  до целого  $n_1$  (до меньшего значения для ТТС, а до большего для ТС).

Суммарная продолжительность каждой составляющей баланса времени единичного цикла за смену вычисляется соответственно по следующим формулам:  $T_{30} = t_{30} \cdot n_1$ ;  $T_{OC} = t_{OC} \cdot n_1$ ;  $T_{XГ} = t_{XГ} \cdot n_1$ ;  $T_{XP} = t_{XP} \cdot n_1$ ;  $T_{HO} = t_{HO} \cdot n_1$ .

Общая продолжительность внутрицикловых элементов времени за смену составляет  $T_{ВЦ} = T_{30} + T_{OC} + T_{XГ} + T_{XP} + T_{HO}$ .

По разнице между  $T_{ВЦ}$  и  $T_{ВЦ}$  можно предопределить резервное время за смену на случай улучшения организации процесса  $T_{PEЗ} = T_{ВЦ} - T_{ВЦ} = T_{CM} - T_{HC} - T_{ВЦ}$ , м.

Если соотношение  $T_{PEЗ} \cdot 100 / T_{ВЦ}$ , процент, составит более 10 %, то рекомендуется провести сравнительный расчет составляющих  $T_{CM}$  для средств с большей мощностью (другими  $Q$  и  $V_{\Gamma}$ ) с целью выявления резервов уменьшения значения  $T_{PEЗ}$ .

Последующий этап исследования характеризуется определением и преобразованием развернутого выражения баланса времени смены. Подставив в формулу  $T_{CM} = T_{ПС} + T_{ТО} + T_{30} + T_{OC} + T_{XГ} + T_{XP} + T_{HO}$  зависимости каждой из составляющих, поделив все равенство на  $T_{CM}$  и выполнив несложные преобразования с учетом  $\tau = T_{OC} / T_{CM}$ , получим

выражение коэффициента использования времени смены  $\tau$ , функционально зависящего от обобщенного параметра  $N$  в виде ниспадающей прямой  $\tau = h - dN$  [14]. Коэффициенты в формуле представлены следующими алгебраическими связями между числами и величинами:

$$h = 1 - (t_{СП} + t_{СВ} + t_{СЛ} + t_{ТОС} + (t_{ХГС} + t_{ЗОС} + t_{НОС}) \cdot n_1) \cdot \frac{1}{T_{СМ}};$$

$$d = \frac{S_{ТО} \cdot V_{ТО}}{T_{СМ}} + \left[ \frac{1,25 \cdot K_Q}{W_{П}} + 0,9 \cdot L_{Г} \cdot K_V + K_X \cdot V_X \cdot \beta_X + \frac{K_Q \cdot (L_{Г} + 0,5 \cdot \omega/U)}{q} \times \left( \frac{t_{ОТ}}{l_{ОТ}} + \frac{t_{НТ}}{l_{НТ}} \right) \right] \cdot \frac{n_1}{T_{СМ}}.$$

Каждый из коэффициентов – параметр использования средств, характеризующий относительные средне-взвешенные потери времени смены:  $h$  – независящие от  $N$  и имеющие место при любой наработке;  $d$  – зависящие от мощности и основного объема работ. Параметры  $h$  и  $d$  имеют разные численные значения для тракторных и автомобильных ТС и ТТС.

### Результаты исследования

Арифметические алгоритмы заложены в программу. Определяются коэффициенты использования времени смены (в автоматическом режиме), при помощи которых в дальнейшем будет установлено значение эксплуатационных параметров в соответствии с таблицей 3.

На основании табличных данных известна функциональная зависимость коэффициента использования времени смены от внешних производственных условий в соответствии с рисунком 1.

Завершается исследование по заявленной теме иллюстрацией алгоритма

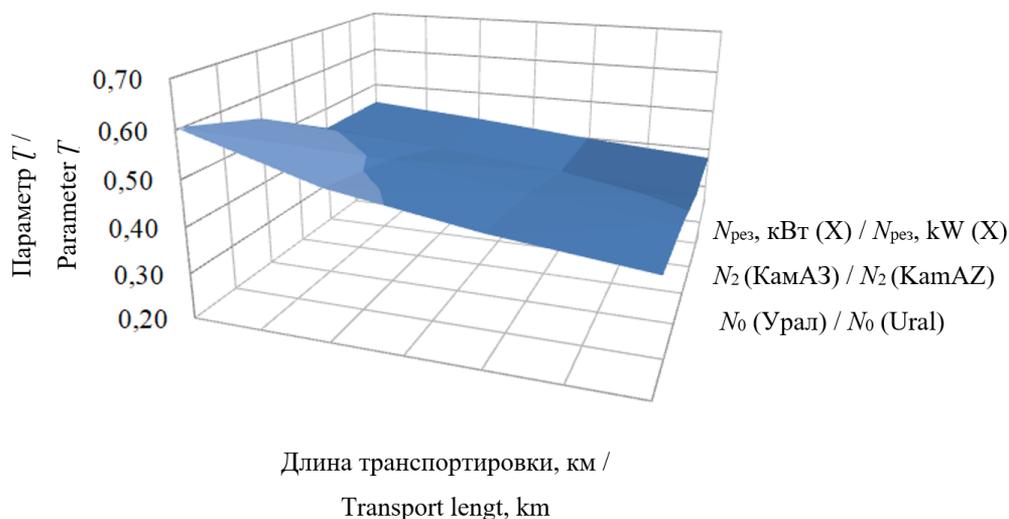
Таблица 3

Table 3

### Результаты оптимизации

#### Optimization results

$N_{hp}$ , кВт / $N_{h^*}$ , kW	170,990000000	202,610000000	224,050000000	241,420000000
$N_{dp}$ , кВт / $N_{d^*}$ , kW	325,290000000	793,100000000	1173,480000000	1508,060000000
$T_h$	0,512419676	0,445620828	0,409664378	0,386924600
$T_d$	0,414108818	0,248796635	0,189124890	0,160931500
$h$	0,636000000	0,537000000	0,486000000	0,451000000
$d$	0,000622000	0,000366000	0,000286000	0,000243000
$N_{h\omega}$ , кВт / $N_{h\omega^*}$ , kW	182,610000000	199,320000000	210,370000000	221,040000000
$N_{d\omega}$ , кВт / $N_{d\omega^*}$ , kW	481,370000000	738,700000000	925,990000000	1117,670000000
$T_{h\omega}$	0,476010000	0,453690000	0,437950000	0,423400000
$T_{d\omega}$	0,311900000	0,266700000	0,244100000	0,225100000
$h_{\omega}$	0,595700000	0,545743813	0,517089991	0,492131500
$d_{\omega}$	0,000495000	0,000382500	0,000332500	0,000295300



Р и с. 1. Значения коэффициентов использования времени смены  
F i g. 1. Shift time utilization ratios

расчета эксплуатационных показателей рассматриваемых мобильных средств в соответствии с рисунком 2.

Результаты исследования приводятся в виде резюме. На примере данных о производственных условиях хозяйств агрозоны 1.1 Центрального Федерального округа и применяемых средств механизации процесса внесения минеральных удобрений при  $L = 9$  км и  $U = 0,06$  кг/м<sup>2</sup> [6].

Математические выкладки позволяют вывести формулу эксплуатационной производительности в функции характеристик внешних условий выполнения процесса и мощности технического средства. С учетом поправочного коэффициента  $K_{об}$  на местные условия выражение целевой функции  $W$  запишется в виде:

$$W = \frac{N \cdot \mu}{P_N \cdot L_T} (h - dN) \cdot K_{об} - \text{целе-}$$

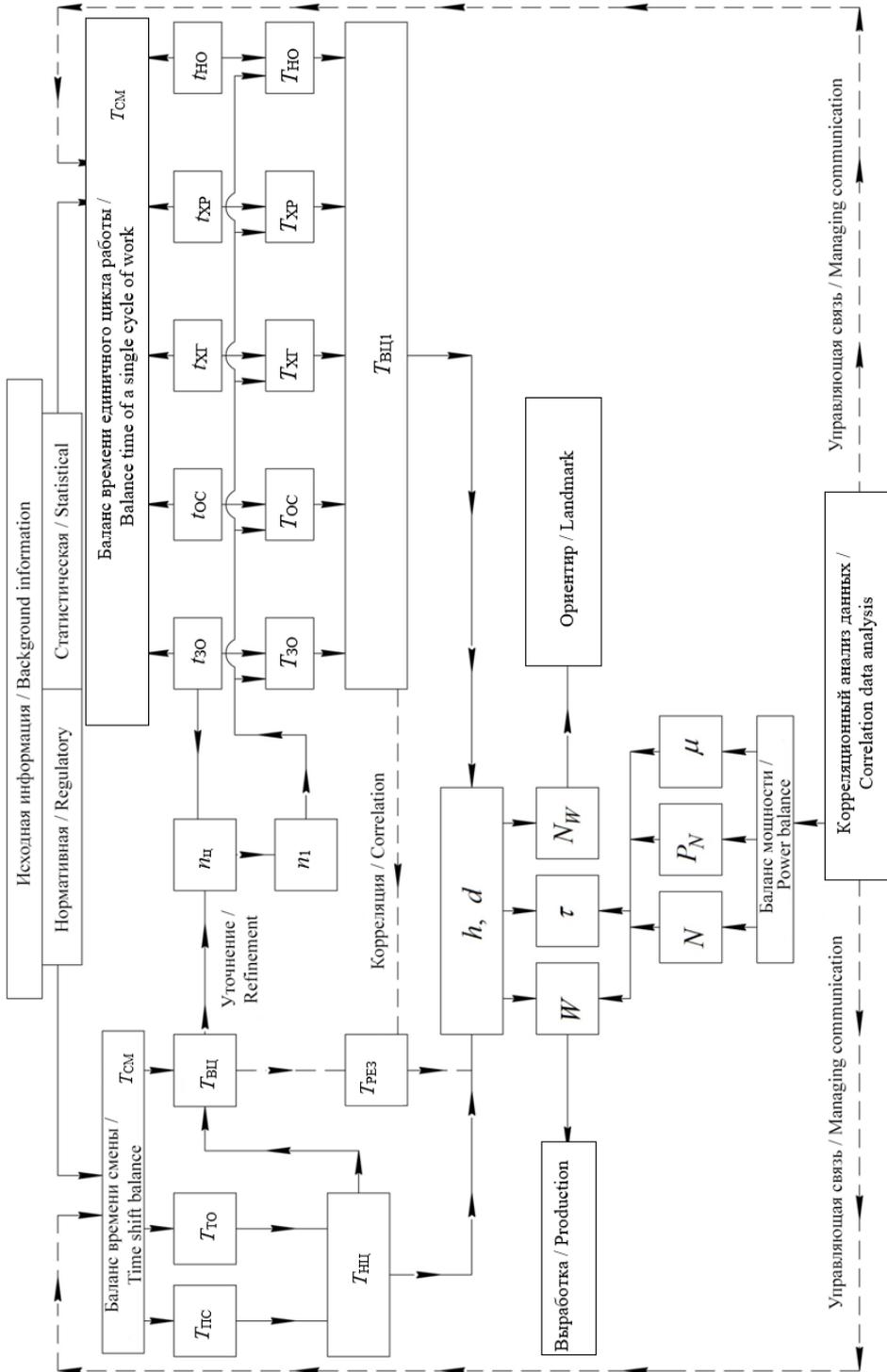
вая функция оптимизации. Для проверки ритмичности единичных циклов работы средств необходимо сравнить частное от  $K_{об} \cdot N / W$  со значением  $t_{ц}$

для конкретных ТС и ТТС и заданных условий работы. Разница между ними не должна отличаться более чем на 10 % относительно значения  $t_{ц}$ , что будет свидетельствовать о ритмичности единичных циклов.

Используя формулу производительности в качестве целевой функции (критерий  $W \rightarrow \max$ ), можно классическим методом вывести выражение для определения оптимальной мощности  $N_w$ . Из дифференцирования полученного уравнения  $W = f(N)$  по переменной  $N$  и решения равенства  $\delta W / \delta N = 0$  следует  $N_w = 0,5h / d$ , Вт.

Для производителей значение  $N_w$  представляется в качестве ориентира, к которому можно приблизиться или за счет больших денежных вложений, или на основе компромисса между  $N_w$  и другими оптимальными значениями  $N_c$ , соответствующими экономическим (стоимостным) критериям, то есть умеренным эксплуатационным затратам ( $N_c$ ).

В результате реализации алгоритма расчета и преобразования математического аппарата в более удобную форму



Р и с 2. Алгоритм расчета эксплуатационных показателей мобильных средств  
 Fig. 2. Algorithm for calculating operational indicators of mobile devices

получены значения производительности (выработки) средств:

1. Для транспортных средств при доставке удобрений:

а) автомобилем УРАЛ-432065 (кузов):

$$h = 1 - \frac{T_{\text{ПС}} + t_{\text{ТО}} \cdot v_{\text{ТО}} + t_{\text{ХГС}} \cdot n_1}{T_{\text{СМ}}} =$$

$$= 1 - \frac{1,1 + 0,2 \cdot 1,17 + 0,11 \cdot 11}{7} = 0,63;$$

$$d = \frac{S_{\text{ТО}} \cdot v_{\text{ТО}}}{T_{\text{СМ}}} + \left[ \frac{1,25 \cdot K_Q}{W_{\text{П}}} - \right.$$

$$\left. -0,9 \cdot L_{\Gamma} \cdot K_V + K_X \cdot v_X \cdot \beta_X + \right.$$

$$\left. + \frac{K_Q \cdot L_{\Gamma} \cdot t_{\text{ОТ}}}{q \cdot l_{\text{ОТ}}} \right] \cdot \frac{n_1}{T_{\text{СМ}}} =$$

$$= \frac{0,0007 \cdot 1,17}{7} + \left[ \frac{1,25 \cdot 0,042}{40} - \right.$$

$$\left. -0,9 \cdot 9 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5} + 1 \cdot 40 \cdot 10^{-5} \cdot 1 + \right.$$

$$\left. + \frac{0,042 \cdot 9 \cdot 0,32}{1 \cdot 800} \right] \cdot \frac{11}{7} = 0,0028.$$

Коэффициент использования времени смены в таком случае  $\tau = h - dN$   $\tau = 0,63 - 0,0028 \cdot 140 = 0,24$ . С учетом полученного значения  $\tau$  определяем эксплуатационную производительность

$$W = \frac{3,6 \cdot 140 \cdot 1 \cdot 0,24 \cdot 0,9}{1,27 \cdot 9} = 9,1 \text{ т/ч};$$

б) трактором с прицепом (МТЗ-82.1+2ПТС-6):

$$h = 1 - \frac{T_{\text{ПС}} + t_{\text{ТО}} \cdot v_{\text{ТО}} + t_{\text{ХГС}} \cdot n_1}{T_{\text{СМ}}} =$$

$$= 1 - \frac{1,3 + 0,2 \cdot 1,49 + 0,31 \cdot 5}{7} = 0,54;$$

$$d = \frac{S_{\text{ТО}} \cdot v_{\text{ТО}}}{T_{\text{СМ}}} + \left[ \frac{1,25 \cdot K_Q}{W_{\text{П}}} - \right.$$

$$\left. -0,9 \cdot L_{\Gamma} \cdot K_V + K_X \cdot v_X \cdot \beta_X + \right.$$

$$\left. + \frac{K_Q \cdot L_{\Gamma} \cdot t_{\text{ОТ}}}{q \cdot l_{\text{ОТ}}} \right] \cdot \frac{n_1}{T_{\text{СМ}}} =$$

$$= \frac{0,0027 \cdot 1,43}{7} + \left[ \frac{1,25 \cdot 0,085}{40} - \right.$$

$$\left. -0,9 \cdot 9 \cdot 4,86 \cdot 10^{-5} + 1 \cdot 40 \cdot 10^{-5} \cdot 2 + \right.$$

$$\left. + \frac{0,085 \cdot 9 \cdot 0,24}{1 \cdot 800} \right] \cdot \frac{5}{7} = 0,0029.$$

Коэффициент использования времени смены в таком случае  $\tau = h - dN$   $\tau = 0,54 - 0,0029 \cdot 57 = 0,37$ . С учетом полученного значения  $\tau$  определяем эксплуатационную производительность

$$W = \frac{3,6 \cdot 57 \cdot 1 \cdot 0,37 \cdot 0,9}{1,21 \cdot 9} = 6,3 \text{ т/ч}.$$

2. Для транспортно-технологических средств при транспортировке и распределении удобрений:

а) автомобилем УРАЛ-432065 (разбрасыватель Amazone):

$$h = 1 - \frac{T_{\text{ПС}} + t_{\text{ТО}} \cdot v_{\text{ТО}} + t_{\text{ХГС}} \cdot n_1}{T_{\text{СМ}}} =$$

$$= 1 - \frac{1,1 + 0,2 \cdot 1,83 + 0,11 \cdot 5}{7} = 0,71;$$

$$d = \frac{S_{\text{ТО}} \cdot v_{\text{ТО}}}{T_{\text{СМ}}} + \left[ \frac{1,25 \cdot K_Q}{W_{\text{П}}} - \right.$$

$$\left. -0,9 \cdot L_{\Gamma} \cdot K_V + K_X \cdot v_X \cdot \beta_X + \right.$$

$$\left. + \frac{K_Q \cdot (L_{\Gamma} + 0,5 \cdot \omega/U)}{q} \right] \times$$

$$\begin{aligned} & \times \left( \frac{t_{OT}}{l_{OT}} + \frac{t_{HT}}{l_{HT}} \right) \cdot \frac{n_1}{T_{CM}} = \\ & = \frac{0,0007 \cdot 1,83}{7} + \left[ \frac{1,25 \cdot 0,042}{40} - \right. \\ & - 0,9 \cdot 9 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5} + 6 \cdot 4 \cdot 10^{-5} \cdot 1 + \\ & \left. + \frac{0,042 \cdot (9 + 0,5 \cdot 300/600)}{1} \right] \times \\ & \times \left( \frac{0,32}{800} + \frac{0,12}{400} \right) \cdot \frac{5}{7} = 0,0014. \end{aligned}$$

Коэффициент использования времени смены в таком случае  $\tau = h - dN\tau = 0,71 - 0,0014 \cdot 140 = 0,52$ . С учетом полученного значения  $\tau$  определяем эксплуатационную производительность  $W = \frac{3,6 \cdot 140 \cdot 0,256 \cdot 0,52 \cdot 0,9}{1,27 \cdot 9} = 5,5$  т/ч;

б) трактором с разбрасывателем (МТЗ-82.1+РУМ-6):

$$\begin{aligned} h & = 1 - \frac{T_{ПС} + t_{ТО} \cdot v_{О} + t_{ХГС} \cdot n_1}{T_{СМ}} = \\ & = 1 - \frac{1,3 + 0,2 \cdot 1,71 + 0,30 \cdot 3}{7} = 0,62; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d & = \frac{S_{ТО} \cdot v_{ТО}}{T_{СМ}} + \left[ \frac{1,25 \cdot K_Q}{W_{П}} - \right. \\ & - 0,9 \cdot L_{Г} \cdot K_V + K_X \cdot v_X \cdot \beta_X + \\ & \left. + \frac{K_Q \cdot (L_{Г} + 0,5 \cdot \omega/U)}{q} \right] \times \\ & \times \left( \frac{t_{OT}}{l_{OT}} + \frac{t_{HT}}{l_{HT}} \right) \cdot \frac{n_1}{T_{СМ}} = \\ & = \frac{0,0027 \cdot 1,71}{7} + \left[ \frac{1,25 \cdot 0,085}{40} - \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - 0,9 \cdot 9 \cdot 4,86 \cdot 10^{-5} + 6 \cdot 4 \cdot 10^{-5} \cdot 2 + \\ & \left. + \frac{0,085 \cdot (9 + 0,5 \cdot 300/600)}{1} \right] \times \\ & \times \left( \frac{0,24}{600} + \frac{0,12}{400} \right) \cdot \frac{3}{7} = 0,0022. \end{aligned}$$

Коэффициент использования времени смены в таком случае  $\tau = h - dN\tau = 0,62 - 0,0022 \cdot 57 = 0,49$ . С учетом полученного значения  $\tau$  определяем эксплуатационную производительность  $W = \frac{3,6 \cdot 57 \cdot 0,418 \cdot 0,49 \cdot 0,9}{1,33 \cdot 9} = 3,9$  т/ч.

### Обсуждение и заключение

Доказана приемлемость формулы, описывающей линейную зависимость эксплуатационной производительности технических средств от их мощности.

Для новых или проектируемых средств при отсутствии их эксплуатационно-технологической оценки норму выработки можно с достаточной достоверностью определять методами экстраполяции и интерполяции или аппроксимации по их расчетной производительности.

Достаточную достоверность подтверждает соответствие при сопоставлении полученных расчетных значений эксплуатационных показателей со справочными данными. В результате сравнения определено, что при выполнении тракторно-транспортных работ, а именно доставки минеральных удобрений (I класс грузов) к хранилищам, эксплуатационная производительность составляет 5,84 т/ч, полученное теоретическое значение 6,3 т/ч. В таком случае их расхождение составит 4,2 %, что приемлемо для инженерных расчетов.

При выполнении транспортно-технологических процессов, внесении твердых минеральных удобрений по прямой технологии, производительность

за час основного времени  $\Pi$  составляет 7,88 т/ч. С учетом полученного в результате математического моделирования коэффициента использования времени смены  $\tau$  определяем эксплуатационную производительность  $W = \Pi \cdot \tau = 7,88 \cdot 0,49 = 3,86$  т/ч. Данное значение соответствует расчетному.

Теоретическим путем определено, что при эксплуатации ТТС Урал-432065 с разбрасывателем Amazone в определенных производственных и агроландшафтных условиях коэффициент использования времени смены составит  $\tau = 0,52$  и будет отличаться на 3,7% от значения  $\tau = 0,54$ , полученного при эксплуатационно-технологической оценке, в соответствии с протоколом испытаний [15–19]. Тем самым подтверждается достоверность результатов исследований. Таким образом,

разработанный алгоритм расчета выработки мобильных средств сомнений не вызывает [20–24].

Наряду с этим следует отметить, что оригинальностью статьи является разработанная математическая модель, позволяющая привести к единообразию расчет эксплуатационной производительности различных видов, типов ТС и ТТС [25; 26]. Это представляет практический интерес при планировании механизированных работ в различных природно-производственных и агроландшафтных условиях с использованием агрегатов, не имеющих эксплуатационно-технологической оценки, например, значений производительности.

Также оригинальность отражена в подходе прогнозирования потребности в технике, живой силе и возможности повышения их резервов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шкель, А. С. Технология внесения твердых минеральных удобрений транспортно-технологическим агрегатом СТА-5ТМ в составе специализированного автомобильного шасси УРАЛ-432065 / А. С. Шкель, М. А. Козловская, Т. Д. Дзоценидзе // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – № 9. – С. 44–48. – URL: <https://rucont.ru/efd/458413> (дата обращения: 12.11.2020).
2. Предложения по созданию многоцелевых грузовых автомобилей нового поколения / Д. А. Загарин, М. А. Козловская, Т. Д. Дзоценидзе, А. С. Шкель // Журнал автомобильных инженеров. – 2016. – № 2 (97). – С. 18–25. – URL: <http://www.aac-press.ru/f/97/18.pdf> (дата обращения: 12.11.2020).
3. Расчетные исследования опытных образцов из новой линейки грузовых автомобилей сельскохозяйственного назначения / В. В. Московкин, Т. Д. Дзоценидзе, А. Г. Левшин [и др.] // Технология колесных и гусеничных машин. – 2012. – № 2. – С. 31–35. – Рез. англ.
4. Дзоценидзе, Т. Д. Комплексные исследования новых транспортных средств сельскохозяйственного назначения / Т. Д. Дзоценидзе // Вестник КрасГАУ. – 2009. – № 3 (30). – С. 152–161. – URL: <https://clck.ru/RtbgM> (дата обращения: 12.11.2020). – Рез. англ.
5. Инновационный подход в развитии транспортной инфраструктуры агропромышленного комплекса / А. Ю. Измайлов, Т. Д. Дзоценидзе, Н. Е. Евтюшенков [и др.] // Технология колесных и гусеничных машин. – 2012. – № 1. – С. 23–28. – Рез. англ.
6. Создание современной компонентной базы – основы развития транспортной инфраструктуры страны / А. А. Эйдинов, Т. Д. Дзоценидзе, Д. А. Загарин, П. А. Кабанин // Автомобильная промышленность. – 2008. – № 11. – С. 3–5. – URL: <http://www.mashin.ru/files/avb08.pdf> (дата обращения: 12.11.2020).
7. Агротехнические и технологические параметры автомобилей сельскохозяйственного назначения / С. Н. Галкин, Т. Д. Дзоценидзе, А. Г. Левшин [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. – № 5. – С. 3–6. – URL: <https://rucont.ru/efd/356705> (дата обращения: 12.11.2020).
8. Загарин, Д. А. Моделирование параметров колесной транспортно-тяговой машины с учетом эксплуатации в условиях КФХ и ЛПХ / Д. А. Загарин, Т. Д. Дзоценидзе // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 10. – С. 33–38. – URL: <https://rucont.ru/efd/356698> (дата обращения: 12.11.2020).

9. Расчет производительности и потребности технических средств уборочно-транспортного комплекса / А. Ю. Измайлов, А. А. Артюшин, Н. Е. Евтюшенков [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2016. – № 2. – С. 5–10. – URL: <https://www.vimsmi.com/jour/article/view/121> (дата обращения: 12.11.2020). – Рез. англ.

10. Хайт, Д. Экономическое обоснование выбора с/х машин / Д. Хайт // Сельскохозяйственная техника. – 1963. – № 2. – С. 10–14.

11. Некоторые аспекты создания специализированного транспорта сельскохозяйственного назначения / Д. А. Загарин, А. С. Шкель, М. А. Козловская, Т. Д. Дзюенидзе // Технология колесных и гусеничных машин. – 2015. – № 6 (22). – С. 6–12.

12. Уваров, В. П. Оптимальное соотношение основных механизированных работ при прямом внесении удобрений / В. П. Уваров, А. Г. Левшин, Н. А. Майстренко // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2016. – № 4. – С. 38–43. – URL: <https://www.vimsmi.com/jour/article/view/144> (дата обращения: 12.11.2020). – Рез. англ.

13. Измайлов, А. Ю. Разработка математического аппарата для моделирования технологий по транспортированию селекционного урожая / А. Ю. Измайлов, Н. Е. Евтюшенков, В. Ф. Рожин // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2015. – № 6. – С. 14–16. – URL: [http://www.cnsnb.ru/jour/j\\_as.asp?id=126353](http://www.cnsnb.ru/jour/j_as.asp?id=126353) (дата обращения: 12.11.2020).

14. Майстренко, Н. А. Потребительские ориентиры эффективного использования перспективных транспортно-технологических средств / Н. А. Майстренко, В. П. Уваров // Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2016. – № 1. – С. 44–50. – URL: <https://clck.ru/Rtcjj> (дата обращения: 12.11.2020). – Рез. англ.

15. Yeung, D. W. K. Subgame Consistent Cooperative Solutions in Stochastic Differential Games / D. W. K. Yeung, L. A. Petrosyan. – DOI 10.1023/B:JOTA.0000025714.04164.e4 // Journal of Optimization Theory and Applications. – 2004. – Vol. 120. – Pp. 651–666. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1023/B:JOTA.0000025714.04164.e4#citeas> (дата обращения: 12.11.2020).

16. MacKinnon, R. D. Optimization Models of Transportation Network Improvement / R. D. MacKinnon, G. M. Barber. – DOI 10.1177/030913257700100303 // Progress in Human Geography. – 1977. – Vol. 1, Issue 3. – Pp. 387–412. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/030913257700100303> (дата обращения: 12.11.2020).

17. Khodakarami, M. Modeling Maintenance Project Selection on a Multimodal Transportation Network / M. Khodakarami, K. N. Mitchell, X. B. Wang. – DOI 10.3141/2409-01 // Journal of the Transportation Research Board. – 2014. – Vol. 2409, Issue 1. – Pp. 1–8. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2409-01> (дата обращения: 12.11.2020).

18. Malladi, K. T. Optimization of Operational Level Transportation Planning in Forestry: A Review / K. T. Malladi, T. Sowlati. – DOI 10.1080/14942119.2017.1362825 // International Journal of Forest Engineering. – 2017. – Vol. 28, Issue 3. – Pp. 198–210. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1080/14942119.2017.1362825?scroll=top&needAccess=true> (дата обращения: 12.11.2020).

19. Smart Farming Techniques for Climate Change Adaptation in Cyprus / G. Adamides, N. Kalatzis, A. Stylianou [et al.]. – DOI 10.3390/atmos11060557 // Atmosphere. – 2020. – Vol. 11, Issue 6. – URL: <https://www.mdpi.com/2073-4433/11/6/557> (дата обращения: 12.11.2020).

20. Zavorotin, E. Method of Introducing Innovation to Land Use in Agriculture / E. Zavorotin, A. Gordoplova, N. Tiurina. – DOI 10.30525/2256-0742/2018-4-3-74-79 // Baltic Journal of Economic Studies. – 2018. – Vol. 4, Issue 3. – Pp. 74–79. – URL: <http://www.baltijapublishing.lv/index.php/issue/article/view/426/pdf> (дата обращения: 12.11.2020).

21. Maurel, V. B. Putting Agricultural Equipment and Digital Technologies at the Cutting Edge of Agroecology / V. B. Maurel, Ch. Huyghe. – DOI 10.1051/occl/2017028 // OCL – Oilseeds and Fats, Crops and Lipids. – 2017. – Vol. 24, Issue 3. – URL: <https://www.occl-journal.org/articles/occl/abs/2017/03/occl170028s/occl170028s.html> (дата обращения: 12.11.2020).

22. Zhu, M. Research Progresses in Technological Innovation and Integration of Agricultural Engineering / M. Zhu, X. Q. Zhou, Z. F. Zhai. – DOI 10.3965/j.ijabe.20160906.2440 // International Journal

of Agricultural and Biological Engineering. – 2016. – Vol. 9, Issue 6. – Pp. 1–9. – URL: <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/2440> (дата обращения: 12.11.2020).

23. Linking Models for Assessing Agricultural Land Use Change / S. Janssen, I. N. Athanasiadis, I. Bezlepina [et al.]. – DOI 10.1016/j.compag.2010.10.011 // Computers and Electronics in Agriculture. – 2011. – Vol. 76, Issue 2. – Pp. 148–160. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169910002218?via%3Dihub> (дата обращения: 12.11.2020).

24. A Component-Based Framework for Simulating Agricultural Production and Externalities / M. Donatelli, G. Russell, A. E. Rizzoli [et al.]. – DOI 10.1007/978-90-481-3619-3\_4 // Brouwer F., Ittersum M. (eds). Environmental and Agricultural Modelling. – Dordrecht : Springer, 2010. – Pp. 63–108. – URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-90-481-3619-3\\_4](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-90-481-3619-3_4) (дата обращения: 12.11.2020).

25. Harris, G. Integrated Assessment and Modelling: An Essential Way of Doing Science / G. Harris. – DOI 10.1016/S1364-8152(01)00058-5 // Environmental Modelling & Software. – 2002. – Vol. 17, Issue 3. – Pp. 201–207. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815201000585?via%3Dihub> (дата обращения: 12.11.2020).

26. Gerdstri, N. Applying the Analytic Hierarchy Process (AHP) to Build a Strategic Framework for Technology Roadmapping / N. Gerdstri, D. F. Kocaoglu. – DOI 10.1016/j.mcm.2007.03.015 // Mathematical and Computer Modelling. – 2007. – Vol. 46, Issue 7. – Pp. 1071–1080. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895717707001069?via%3Dihub> (дата обращения: 12.11.2020).

*Поступила 12.06.2020; принята к публикации 10.07.2020; опубликована онлайн 30.12.2020*

*Об авторах:*

**Майстренко Николай Александрович**, доцент кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка и высоких технологий в растениеводстве ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1268-713X>, nmaystr@mail.ru

**Уваров Виктор Петрович**, доцент кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка и высоких технологий в растениеводстве ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8208-222X>, ros1500@mail.ru

**Левшин Александр Григорьевич**, заведующий кафедрой эксплуатации машинно-тракторного парка и высоких технологий в растениеводстве ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8010-4448>, alev200151@rambler.ru

**Хорт Дмитрий Олегович**, заведующий отделом технологий и машин для садоводства, виноградарства и питомниководства ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат сельскохозяйственных наук, Researcher ID: Q-2695-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6503-0065>, vim\_sad@mail.ru

**Воротникова Олеся Сергеевна**, аспирант кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка и высоких технологий в растениеводстве ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3535-8112>, vorotnikova003@mail.ru

*Заявленный вклад соавторов:*

Н. А. Майстренко – разработка математической модели, расчет производительности разных видов и типов транспортных и транспортно-технологических средств; В. П. Уваров – разработка унифицированного алгоритма, расчет производительности разных видов и типов транспортных и транспортно-технологических средств; А. Г. Левшин – введение, обзор литературных источ-

ников, постановка цели и проблематики исследования, формулировка результатов исследования; Д. О. Хорт – определение ориентировочной нормы выработки мобильных средств, для которых не установлены нормативные показатели работы, многовариантное имитационное моделирование на ЭВМ; О. С. Воротникова – обработка статистической информации, расчет примера в соответствии с предложенным алгоритмом.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Shkel A.S., Kozlovskaya M.A., Dzotsenidze T.D. [Technology of Application of Solid Mineral Fertilizers by STA-5TM Transport and Technological Unit as a Part of Ural-432065 Specialized Automobile Chassis]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2016; (9):44-48. Available at: <https://rucont.ru/efd/458413> (accessed 12.11.2020). (In Russ.)
2. Zagarin D.A., Kozlovskaya M.A., Dzotsenidze T.D., et al. [Proposals for Multi-Purpose Trucks of the New Generation]. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov* = Automotive Engineers' Journal. 2016; (2):18-25. Available at: <http://www.aae-press.ru/f/97/18.pdf> (accessed 12.11.2020). (In Russ.)
3. Moskovkin V.V., Dzotsenidze T.D., Levshin A.G., et al. Test Studies of New-Line Agricultural-Purpose Truck Prototypes. *Tekhnologiya kolesnykh i gusenichnykh mashin* = Technology of Wheeled and Tracked Machines. 2012; (2):31-35. (In Russ.)
4. Dzotsenidze T.D. Complex Research of the New Means of Transport in Agriculture. *Vestnik KrasGAU* = Bulletin of KrasGAU. 2009; (3):152-161. Available at: <https://clck.ru/RtbgM> (accessed 12.11.2020). (In Russ.)
5. Izmaylov A.Yu., Dzotsenidze T.D., Yevtyushenkov N.Ye., et al. Innovative Approach in Development of Agricultural Transport Infrastructure. *Tekhnologiya kolesnykh i gusenichnykh mashin* = Technology of Wheeled and Tracked Machines. 2012; (1):23-28. (In Russ.)
6. Eydinov A.A., Dzotsenidze T.D., Zagarin D.A., et al. [Creation of a Modern Component Base as the Basis of the Country's Transport Infrastructure Development]. *Avtomobilnaya promyshlennost* = Automotive Industry. 2008; (11):3-5. Available at: <http://www.mashin.ru/files/avb08.pdf> (accessed 12.11.2020). (In Russ.)
7. Galkin S.N., Dzotsenidze T.D., Levshin A.G., et al. [Agrotechnical and Technological Parameters of Agricultural Vehicles]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2011; (5):3-6. Available at: <https://rucont.ru/efd/356705> (accessed 12.11.2020). (In Russ.)
8. Zagarin D.A., Dzotsenidze T.D. [Modeling of Wheeled Transport and Traction Machine Parameters Taking Into Account Operation in Conditions of Peasant Farms and Personal Subsidiary Farms]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2010; (10):33-38. Available at: <https://rucont.ru/efd/356698> (accessed 12.11.2020). (In Russ.)
9. Izmaylov A.Yu., Artyushin A.A., Evtyushenkov N.E., et al. Analysis of General Plow Body Tractive Resistance. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2016; (2):5-10. Available at: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/121> (accessed 12.11.2020). (In Russ.)
10. Khayt D. [Economic Justification for Choosing Agricultural Machines]. *Selskokhozyaystvennaya tekhnika* = Agricultural Machinery. 1963; (2):10-14. (In Russ.)
11. Zagarin D.A., Shkel A.S., Kozlovskaya M.A., et al. [Some Aspects of Creating Specialized Agricultural Transport]. *Tekhnologiya kolesnykh i gusenichnykh mashin* = Technology of Wheeled and Tracked Machines. 2015; (6):6-12. (In Russ.)
12. Uvarov V.P., Levshin A.G., Maystrenko N.A. Optimum Ratio of Main Mechanized Operations for Direct-Flow Fertilizers Introduction. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2016; (4):38-43. Available at: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/144> (accessed 12.11.2020). (In Russ.)

13. Izmaylov A.Yu., Yevtyushenkov N.Ye., Rozhin V.F. [Development of the Mathematical Apparatus for Modeling the Technologies for Transportation of the Breeding Crop]. *Vestnik Rossiyskoy selskokhozyaystvennoy nauki* = Bulletin of the Russian Agricultural Sciences. 2015; (6):14-16. Available at: [http://www.cnshb.ru/jour/j\\_as.asp?id=126353](http://www.cnshb.ru/jour/j_as.asp?id=126353) (accessed 12.11.2020). (In Russ.)
14. Maystrenko N.A., Uvarov V.P. Consumer Targets of Efficient Use of Advanced Transport-And-Technological Vehicles. *Vestnik FGOU VPO "Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina"* = Moscow Goryachkin Agroengineering University Bulletin. 2016; (1):44–50. Available at: <https://clck.ru/Rtcjj> (accessed 12.11.2020). (In Russ.)
15. Yeung D.W.K., Petrosyan L.A. Subgame Consistent Cooperative Solutions in Stochastic Differential Games. *Journal of Optimization Theory and Applications*. 2004; 120:651-666. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1023/B:JOTA.0000025714.04164.e4>
16. MacKinnon R.D., Barber G.M. Optimization Models of Transportation Network Improvement. *Progress in Human Geography*. 1977; 1(3):387-412. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/030913257700100303>
17. Khodakarami M., Mitchell K.N., Wang X.B. Modeling Maintenance Project Selection on a Multimodal Transportation Network. *Journal of the Transportation Research Board*. 2014; 2409(1):1-8. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3141/2409-01>
18. Malladi K.T., Sowlati T. Optimization of Operational Level Transportation Planning in Forestry: A Review. *International Journal of Forest Engineering*. 2017; 28(3):198-210. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2017.1362825>
19. Adamides G., Kalatzis N., Stylianou A., et al. Smart Farming Techniques for Climate Change Adaptation in Cyprus. *Atmosphere*. 2020; 11(6). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11060557>
20. Zavorotin E., Gordopolova A., Tiurina N. Method of Introducing Innovation to Land Use in Agriculture. *Baltic Journal of Economic Studies*. 2018; 4(3):74-79. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2018-4-3-74-79>
21. Maurel V.B., Huyghe Ch. Putting Agricultural Equipment and Digital Technologies at the Cutting Edge of Agroecology. *OCL – Oilseeds and Fats, Crops and Lipids*. 2017; 24(3). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1051/ocl/2017028>
22. Zhu M., Zhou X.Q., Zhai Z.F. Research Progresses in Technological Innovation and Integration of Agricultural Engineering. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2016; 9(6):1-9. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20160906.2440>
23. Janssen S., Athanasiadis I.N., Bezlepina I., et al. Linking Models for Assessing Agricultural Land Use Change. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2011; 76(2):148-160. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.10.011>
24. Donatelli M., Russell G., Rizzoli A.E., et al. A Component-Based Framework for Simulating Agricultural Production and Externalities. In: F. Brouwer, M. Ittersum (eds). *Environmental and Agricultural Modelling*. Dordrecht: Springer; 2010. Pp. 63-108. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1007/978-90-481-3619-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-90-481-3619-3_4)
25. Harris G. Integrated Assessment and Modelling: An Essential Way of Doing Science. *Environmental Modelling & Software*. 2002; 17(3):201-207. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00058-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00058-5)
26. Gerd Sri N., Kocaoglu D.F. Applying the Analytic Hierarchy Process (AHP) to Build a Strategic Framework for Technology Roadmapping. *Mathematical and Computer Modelling*. 2007; 46(7):1071-1080. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2007.03.015>

Received 12.06.2020; revised 10.07.2020; published online 30.12.2020

About the authors:

**Nikolay A. Maistrenko**, Associate Professor of the Chair of Machine and Tractor Operation and High Technologies in Plant Production, Russian Timiryazev State Agrarian University (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1268-713X>, [nmaystr@mail.ru](mailto:nmaystr@mail.ru)

**Viktor P. Uvarov**, Associate Professor of the Chair of Machine and Tractor Operation and High Technologies in Plant Production, Russian Timiryazev State Agrarian University (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8208-222X>, [ros1500@mail.ru](mailto:ros1500@mail.ru)

**Aleksandr G. Levshin**, Head of the Chair of Machine and Tractor Operation and High Technologies in Plant Production, Russian Timiryazev State Agrarian University (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8010-4448>, [alev200151@rambler.ru](mailto:alev200151@rambler.ru)

**Dmitriy O. Khort**, Head of Department of Technology and Machinery for Horticulture, Viticulture and Nursery, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), Cand.Sc. (Agriculture), Researcher ID: Q-2695-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6503-0065>, [vim\\_sad@mail.ru](mailto:vim_sad@mail.ru)

**Olesya S. Vorotnikova**, Postgraduate Student of the Chair of Machine and Tractor Operation and High Technologies in Plant Production, Russian Timiryazev State Agrarian University (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3535-8112>, [vorotnikova003@mail.ru](mailto:vorotnikova003@mail.ru)

*Contribution of the authors:*

N. A. Maistrenko – development of mathematical model, calculation of performance of different transport and transport technological facilities; V. P. Uvarov – development of a unified algorithm, calculation of performance of different transport and transport technological facilities; A. G. Levshin – introduction, review of literature sources, setting the research goal and issues, formulation of research results; D. O. Khort – determination of the approximate standards of performance of vehicles, for which normative indices of work are not established, multidirectional simulation on the computer; O. S. Vorotnikova – processing of statistical information, calculation of an example according to the proposed algorithm.

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



## Разработка обучаемого классификатора состояний с множеством моделей распознавания образов

Е. М. Тарасов\*, И. К. Андрончев, А. А. Булатов,  
А. Е. Тарасова

ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей  
связи» (г. Самара, Российская Федерация)

\*[tarasov53em@yandex.ru](mailto:tarasov53em@yandex.ru)

**Введение.** Необходимость классификации состояний рельсовых линий в условиях воздействия на чувствительный элемент датчика информации значительных возмущающих факторов с гарантированным обеспечением качества классификации при необходимой длине рельсовых линий участка контроля формирует задачу создания классификатора с расширенными функциональными возможностями. Для этого используются многомерные образы состояний с множеством информативных признаков, обучающих процедур моделей классификации. Применение классического принципа классификации с единственной моделью приводит к чрезмерному усложнению алгоритма группирования с невысокой точностью из-за неверного решения системы условных уравнений при многомерной аппроксимации многочленами Эрмита.

**Материалы и методы.** Для решения поставленной задачи рассмотрены принципы сокращения размерности признакового пространства, процедуры обучения классификатора состояний с многомерными образами, выбора решающих правил классификации с иерархической группировкой классов, а также формирования множества моделей различной степени сложности, обученных решением несовместной системы уравнений. Благодаря применению в качестве моделей многочленов Эрмита в работе получены модели классификаторов состояний рельсовых линий различной степени сложности, используемые в адаптивном алгоритме.

**Результаты исследования.** В статье представлены результаты формирования 57 моделей классификаторов с использованием многочленов Эрмита с признаками (аргументами) по 2, 3, 4, 5, 6. В качестве примера показана процедура формирования моделей с 2–6 признаками. Результаты исследований показали, что с увеличением количества признаков качество классификации улучшается, как при делении пространства состояний на несколько классов.

**Обсуждение и заключение.** Результаты проведенных исследований подтверждают реализуемость принципа классификации состояний рельсовых линий множеством моделей классификации и алгоритм рекуррентного повышения сложности классификации путем использования модели повышенной сложности. Критерием предельного выявления новой, более сложной модели является несовпадение результатов вычисления класса  $i$ -й моделью и реальным классом, в котором находится рельсовая линия в рассматриваемый момент времени.

**Ключевые слова:** информативные признаки, обучение классификатора, модели классификатора, качество классификации, образ

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



*Для цитирования:* Разработка обучаемого классификатора состояний с множеством моделей распознавания образов / Е. М. Тарасов, И. К. Андрончев, А. А. Булатов, А. Е. Тарасова. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202004.659-682 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 659–682.

Original article

## Development of a Trainable Classifier of State of Rail Lines with Multiple Patterns of Image Recognition

E. M. Tarasov\*, I. K. Andronchev, A. A. Bulatov,  
A. E. Tarasova

Samara State Transport University (Samara, Russian Federation)

\*tarasov53em@yandex.ru

*Introduction.* The necessity to classify the state of rail lines affected by significant damaging factors on the sensitive element of the information sensor providing the assurance of classification quality with the required length of the rail lines of the control section forms the task of creating a classifier with extended functionality. Extending the functionality is possible using multidimensional state images with a set of informative features and training procedures for classification models. Using the classical classification principle with a single model leads to an excessive complication of the classification algorithm with low accuracy due to inaccurate solution of the system of conditional equations with multidimensional approximation by Hermite polynomials.

*Materials and Methods.* The principles of reducing the dimension of the features space, various procedures for trainable classifier of state of rail lines with multidimensional patterns, the selection of decisive classification rules with a hierarchical grouping of classes, and the formation of a set of models of varying degrees of complexity trained to solve an incompatible system of equations are considered to solve the problem. There were obtained various degrees of complexity used in the adaptive algorithm for classifying the rail lines states using Hermite polynomials as models.

*Results.* The article presents the results of developing 57 classifier models using Hermite polynomials with features of 2, 3, 4, 5, 6 arguments. As an example, the procedure of developing models with 2–6 features is shown. The research results showed that with an increase in the number of features, the quality of classification improves, as when dividing the state space into several classes.

*Discussion and Conclusion.* The results of the studies confirm the feasibility of the principle of classification of rail line states by a set of classification models, and an algorithm of recursively increasing the classification complexity using a model of increased complexity. The criterion for presenting a new, more complex model is the mismatch between the results of the class calculation by the  $i$ -th model and the real class in which the rail line is located at the moment in time.

**Keywords:** informative features, classifier training, classifier models, classification quality, image

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

**For citation:** Tarasov E.M., Andronchev I.K., Bulatov A.A., et al. Development of a Trainable Classifier of State of Rail Lines with Multiple Patterns of Image Recognition. *Inzhenerynye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(4):659-682. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.659-682>

### Введение

Основным элементом в комплексе автоматизации технологического процесса перевозок и обеспечения безопасности движения поездов являются

системы контроля состояний рельсовых линий (СКРЛ). Основными требованиями к СКРЛ, формирующими информацию о занятости, свободности и исправности рельсовых линий

(РЛ) контролируемых участков пути, являются: надежность программно-аппаратных средств и безопасность функционирования модулей распознавания и классификации состояний РЛ, а также обеспечение квазиинвариантности к влиянию различных дестабилизирующих воздействий (к помехам от тягового тока, флуктуациям первичных параметров рельсовой линии, нестабильности параметров источников питания и др.). Классификаторы РЛ, широко используемые в настоящее время на сети магистральных железных дорог, имеют разомкнутую структуру и действуют автономно на ограниченном участке рельсовой линии, к началу которой подключен генератор сигнала опроса  $u_1(t)$ , нагруженный в конце на входное сопротивление приемника, реагирующего на уровень выходного сигнала  $u_2(t)$  [1; 2]. Особенностью работы классификаторов состояний является то, что они функционируют в условиях воздействия интенсивных помех, имеющих физические характеристики сигнала опроса первичного датчика, проходящих по рельсовым линиям и суммирующихся на произвольной координате с сигналом опроса чувствительного элемента датчика. Эти воздействия представляют собой помехи  $f_a(t)$ , аддитивно воздействующие на сигнал опроса РЛ, а также на чувствительный элемент датчика – рельсовые линии. Следовательно, на выходной сигнал воздействуют возмущения через изменение первичных параметров рельсовых линий, а именно: поперечной проводимости изоляции и продольного сопротивления рельсовой линии. Они являются параметрическими  $f_p(t)$  и, как правило, подавляют выходной сигнал.

Схема замещения первичного датчика контроля состояний рельсовых участков пути имеет переменную структуру. При состоянии РЛ, когда на контрольном участке ограниченной длины отсутствует поезд и датчик исправен, схема замещения состоит из трех четы-

рехполосников, а именно: двух четырехполосников, замещающих аппаратуры согласования источника сигнала опроса и нагрузки с РЛ. Это четырехполосники с постоянными параметрами. Третий четырехполосник замещает РЛ, являющуюся чувствительным элементом первичного датчика, на который воздействуют аддитивные и параметрические возмущения  $f_a(t)$ ,  $f_p(t)$ , подлежащие компенсации. Полезными воздействиями, которые необходимо распознавать, являются влияния поезда на РЛ и обрыв рельсовой линии. При этом необходимо учесть, что РЛ обладают высокой междурельсовой проводимостью  $g(t)$ , что создает проблему формирования информативных образов  $X(t)$ , обладающих инвариантностью к возмущающим воздействиям на признаковом уровне.

При вступлении поезда или обрыве РЛ контрольного участка схема замещения РЛ становится схемой с переменной структурой, содержащей поперечную или продольную неоднородность. Декомпозиция схемы замещения РЛ в этом случае представляет собой каскадное соединение трех четырехполосников, а именно: четырехполосника от начала РЛ до неоднородности, четырехполосника, замещающего неоднородность с сосредоточенными параметрами в виде воздействия поезда или обрыва РЛ, и четырехполосника от места неоднородности до конца РЛ [2]. Возмущения  $f_a(t)$ ,  $f_p(t)$  оказывают воздействие на РЛ при любой схеме замещения и являются причиной изменения сигнала опроса – входных и выходных электрических параметров рельсового четырехполосника  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$ . Реакцией классификатора на воздействия дестабилизирующих факторов значительного уровня и спектра сигнала одномерного образа  $X(t)$  может являться пересечение границ классов и ложная классификация состояний РЛ.

Решение проблемы правильной классификации состояний РЛ в усло-

виях воздействия значительных возмущений возможно с использованием многомерных образов и множества моделей в классификаторах состояний. Поставленная задача состоит из следующих этапов: разработка принципа (алгоритма) классификации состояний РЛ; формирование априорного максимального алфавита признаков, информация которых адекватно характеризует состояния РЛ в любой момент времени; выбор вида и сложности модели классификатора; разработка алгоритма обучения классификатора.

Все эти подзадачи классификации состояний рельсовых линий имеют свои характерные особенности. В статье рассматриваются обобщенные принципы создания классификатора с использованием множества моделей (решающих функций) в системах классификации состояний объектов в условиях воздействия дестабилизирующих факторов.

### Обзор литературы

В настоящее время исполнительным элементом, классифицирующим состояния РЛ, является электромагнитное реле с двумя устойчивыми состояниями: включенным, когда РЛ исправна и свободна и поездам разрешается движение, и выключенным – при неисправной или занятой поездом РЛ (в этом состоянии движение поездам запрещено). Такой классификатор с источником сигнала опроса РЛ принято называть рельсовой цепью (РЦ) [3; 4].

Одной из существенных проблем, вызывающих сбой в работе классификаторов, является использование единственного информативного признака – уровня напряжения на входе приемника РЛ  $u_2(t)$ , обладающего малой информативностью, что в условиях высокого уровня возмущающих факторов на РЛ контрольного участка существенно ог-

раничивает распознающие возможности классификатора<sup>1</sup>.

Решение проблемы правильной классификации состояний РЛ в условиях воздействия значительных возмущений необходимо искать в использовании многомерных образов и множества моделей классификации состояний [5; 6]. При этом возникают задачи определения оптимального набора признаков, границ классов или решающих правил классификации, вида и сложности моделей классификатора (решающих функций) при использовании множества моделей, а также алгоритма обучения классификатора [7].

Определение оптимального набора признаков рассматривается как задача формирования иного, нового пространства признаков с размерностью  $\tilde{R}$ , которое меньше априорного:  $\tilde{R} < R$ . Решение поставленной задачи потребует введения латентных признаков, позволяющих линейно разделять различные классы. При разделении на два класса удобно воспользоваться популярным в настоящее время методом опорных векторов (SVM), хотя возникают определенные сложности процедуры обучения функцией Лагранжа [8]. Так как метод SVM предусматривает дискриминантное разделение только на два класса состояний, то модифицировать его, на случай множества классов, довольно затруднительно. В методе опорных векторов SVM сделана попытка достижения нелинейности поверхности разделения классов посредством применения ядерных функций, а параметры дискриминантных функций определяются путем максимизации пространства между образами двух классов в новом пространстве признаков [9]. Нечеткие нейронные сети на основе опорных векторов не нуждаются в априорной информации и направлены на создание связей между

<sup>1</sup> Инвариантные измерения информативных признаков координаты поезда / Е. М. Тарасов [и др.] // Перспективные информационные технологии: труды Междунар. науч.-техн. конф. Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2019. С. 509–513.

входным набором данных и наблюдаемыми выходами [10]. Это является достоинством, но существует недостаток, заключающийся в избыточной сложности аппроксимации и длительности обучения.

Исследователями подробно рассмотрены алгоритмы селекции признаков и методики отбора наиболее информативных признаков и показано, что самым эффективным методом является оценка информативности с использованием решающей функции и обучающих процедур [11–13].

Границы классов возможно определять с помощью фокальной модели представлений гладких кривых и поверхностей многофокальными лемнискатами, представляющими собой алгебраическую кривую, у которой произведение расстояний от каждой точки до  $n$  заданных точек постоянно, а также с использованием правила с иерархической группировкой классов [14; 15]. Интересный подход к решению задачи предлагается в одной из работ, где рассматривается способ моделирования границ, используя линейные модели и их обобщение непосредственно в мультиклассовую модель, включая «один против одного» и «один против всех» [16].

Для того чтобы принять решение о принадлежности образа состояния к определенному классу, как правило, используется модель классификации. Для построения моделей классификации применены ортогональные полиномы, в частности полиномы Эрмита, а классификация состояний рельсовой линии производится сравнением априорно определенных границ классов вычисленными границами по совокуп-

ности состояний элементов [17; 18]. Описывается процедура корректировки моделей с исправлением ошибок классификации для определения вектора коэффициентов модели линейных классификаторов образов при общем распределении образов [19]. Упорядочивание с помощью логистической регрессии выполняется на основе сигмоидальной функции, параметрами которой, определяющими решение о принадлежности образа к заданному классу, являются весовые коэффициенты, определяемые путем минимизации функции ошибки на обучающей выборке [20]. С учетом современных машинных систем обработки информации классификацию состояний РЛ предпочтительно осуществлять с использованием метода, основанного на обучении с учителем. В настоящее время известно множество методов классификации, связанных с тем, что процедура обучения напрямую влияет на качество классификации, на величину относительной погрешности определения границ классов [21–24]. Привлекательны подходы автоматического рекуррентного совершенствования алгоритма классификации, представленные в работах, в которых обучение корректируется по величине относительной погрешности классификации<sup>2</sup> [25].

Несмотря на актуальность рассмотренных принципов классификации, их простоту, группирование состояний РЛ они находят ограниченное применение по алгоритму, так как образы состояний пересекаются, и задача формирования классификаторов, обладающих хорошими качествами распознавания, остается актуальной. Использование множества моделей классификации с многомерными образами, обладающих различной

---

<sup>2</sup> Platt J. C. Fast Training of Support Vector Machines using Sequential Minimal Optimization // Advances in Kernel Methods: Support Vector Learning. Cambridge: MIT Press, 1998. Pp. 41–62. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2016/02/smo-book.pdf> (дата обращения: 03.11.2020); Principe J. C., Xu D., Fisher J. W. Information Theoretic Learning // S. Haykin (ed.). Unsupervised Adaptive Filtering. Wiley, 2000. Pp. 265–319. URL: [https://www.researchgate.net/publication/2241131\\_Information-Theoretic\\_Learning](https://www.researchgate.net/publication/2241131_Information-Theoretic_Learning) (дата обращения: 03.11.2020).

сложностью, позволяет решить задачу классификации состояний рельсовых линий в условиях воздействия значительных возмущений.

**Материалы и методы**

Прежде чем приступить к построению моделей, являющихся основным элементом, обеспечивающим правильную классификацию, необходимо решить задачу формирования априорных информативных признаков, описывающих состояния РЛ в произвольный момент времени, с использованием которых должны функционировать алгоритмы классификации.

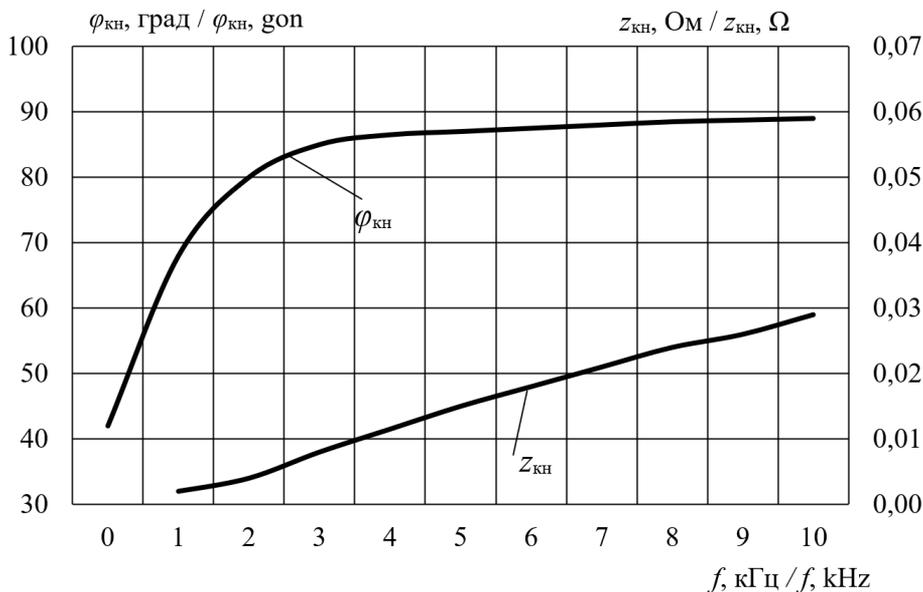
Любой класс состояний, подлежащий распознаванию, обладает рядом различительных особенностей из-за комплексного характера параметров рельсового четырехполюсника, которые отражаются на параметрах первичных информативных признаков, а именно, на значениях амплитуд напряжений и токов на входе и выходе рельсовой линии, а также их фазовых соотношений.

При этом необходимо отметить, что наличие на рельсовом участке поезда проявляется как шунтирование рельсов на переменном токе опроса комплексным сопротивлением колесной пары поезда. Исследования изменения величины и характера сопротивления колесных пар поезда, проведенные в значительном диапазоне частот, выявили, что сопротивление в общем случае является комплексной величиной.

Полное сопротивление поездного шунта состоит из трех частей: переходных сопротивлений бандажей колес и поверхностей рельсов  $R_{ш}$  и сопротивления колесных пар  $z_{кн}$ , являющегося комплексным и определяющегося выражением:

$$z_{ш} = 2R_{ш} + z_{кн} = 2R_{ш} + |z_{кн}| e^{j\varphi_{кн}}$$

На рисунке 1 представлены графики зависимости модуля  $|z_{кн}|$  и аргумента  $\varphi_{кн}$  от частоты сигнала опроса рельсовых линий.



Р и с. 1. Графики зависимости модуля и аргумента сопротивления колесной пары от частоты  
 F i g. 1. Graphs of module and argument dependency of wheel set resistance from frequency

Зависимость модуля  $|z_{ш}|$  и аргумента  $\varphi_{ш}$  полного сопротивления поездного шунта от частоты представлена на рисунке 2.

Из анализа графиков следует, что в диапазоне частот до 1 кГц можно принять  $|z_{ш}| = R_{ш}$  и  $\varphi_{ш} = 0$ , то есть основное влияние на полное сопротивление поездного шунта  $z_{ш}$  оказывает контактное сопротивление между головкой рельсов и колесной парой, составляющее около 99,9 % от общей величины сопротивления шунтирования рельсов, и следовательно, при анализе напряжений на входе приемника в процессе шунтирования рельсов оно принимается активным.

В классе контрольного режима сопротивления места излома рельсовой линии характеризуется комплексным сопротивлением  $\dot{Z}_{э}$ , величина которого зависит от коэффициента распространения волны земляного тракта  $\gamma$ , постоянной земляного тракта  $e$  и от частоты тока опроса рельсовых линий

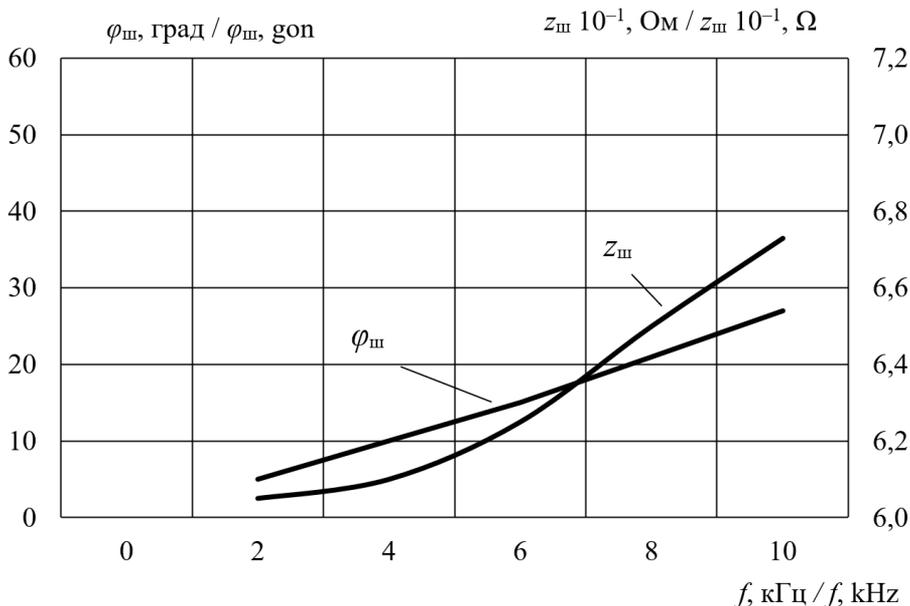
(например, для частоты тока опроса рельсовых линий 50 Гц  $e = 1,72 + j0,18$ ) и определяется формулой [2]:

$$\dot{Z}_{э} = eZ_c \sqrt{1+2\rho} [cth(\gamma_1(l-x)) + cth(\gamma_1x)],$$

где  $x$  – координата места обрыва рельса, отсчитываемая от конца рельсовой линии;  $l$  – длина рельсовой линии;  $\rho$  – коэффициент, характеризующий поверхностную проводимость;  $e = a + j\beta$  – постоянная земляного тракта;  $\gamma_1 = e\gamma / \sqrt{1+2\rho} = e\gamma / 2,1448$  – коэффициент распространения волны земляного тракта.

Комплексный характер сопротивления места излома рельсовой линии также отражается на параметрах сигналов на входе и выходе РЛ, особенно на величинах фаз сигналов.

Вследствие того, что амплитуды напряжений и токов на входе и выходе РЛ, а также их фазовые соотношения зависят от параметров четырехполюсника РЛ, их предпочтительно использовать



Р и с. 2. Графики зависимости модуля и аргумента полного сопротивления шунта от частоты  
F i g. 2. Graphs of module and argument dependency of shunt resistance from frequency

в качестве первичных признаков, составляющих образы состояний. Соответственно, матрицы множеств признаков, принадлежащих образам классов нормального  $\{P_N\}$ , шумового  $\{P_S\}$  и контрольного  $\{P_K\}$  режимов, имеют вид:

$$\begin{aligned}
 P_N &= \begin{bmatrix} X_1^T \\ X_2^T \\ \vdots \\ X_i^T \\ \vdots \\ X_m^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mj} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}, \\
 P_S &= \begin{bmatrix} X_1^T \\ X_2^T \\ \vdots \\ X_i^T \\ \vdots \\ X_m^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mj} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}, \\
 P_K &= \begin{bmatrix} X_1^T \\ X_2^T \\ \vdots \\ X_i^T \\ \vdots \\ X_m^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mj} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}, \\
 &\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{классы } (n) \text{ образы } (m)} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{матрицы признаков}} \quad \begin{matrix} Y_1 & Y_2 & & Y_j & & Y_n \end{matrix}
 \end{aligned}$$

где  $X_j^T$  – транспонированный вектор столбец  $X_j$ ;  $P_N$ ,  $P_S$ ,  $P_K$  – показатели классов.

Формирование компактного пространства признаков преследует несколько целей. Во-первых, отбор наиболее информативных признаков представляет интерес с точки зрения изучения распознаваемых классов, подлежащих классификации, и выявления их взаимосвязи. Во-вторых, сокращение числа признаков, как правило, облегчает задачу распознавания. Так как степень репрезентативности выборки образов

одинакового размера обратно пропорциональна размерности признакового пространства, то чем большее число признаков используется при классификации, тем больше число образов обучающей последовательности необходимо для надежного построения решающего правила. Поэтому при фиксированном объеме выборки существует ограничение числа признаков, на которых может быть основано решающее правило. Например, при использовании решающих функций квадратичного вида и числе образов обучающей последовательности, равном 100, решающее правило должно включать не более десяти признаков. В-третьих, сложность принятия решения о том, имеет ли смысл данная классификация, частично возникает из-за проблемы представления многомерных данных. Поэтому появляется необходимость преобразования многомерных образов в одно-, двух- или, самое большее, трехмерное пространство, что позволяет строить решающие функции и осуществлять процедуры распознавания в диалоговом режиме с визуализацией полученных результатов. И, наконец, в-четвертых, сокращение числа признаков уменьшает разного рода потери, связанные с измерением признаков.

Известно достаточно большое количество работ, посвященных разработке классификаторов РЛ в условиях воздействия возмущений [26; 27]. Основная особенность и отличие ранее известных подходов от предложенного в работе – это использование единственной модели  $d_i(X)$  в виде полинома различной степени и сложности, а также решающих правил классификации вида:

$$d_i(X) = C_i^T X \begin{cases} > 0, \text{ если } X \in P_i \\ < 0, \text{ если } X \notin P_i \end{cases}$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, n.$$

Данное решающее правило представлено для широко распространен-

ного случая дискриминантной модели – решающей функции (РФ) [28]. В данном случае рассматривается множество классов, и дискриминантный подход не приемлем.

Важным моментом при разработке классификатора РЛ является определение правил классификации множеством моделей, а также выбор и обоснование показателей классов. В настоящее время используется большое разнообразие правил классификации, но с учетом множества классов РЛ рационально применить решающее правило с иерархией группировки классов [29]. С учетом этого алгоритм функционирования СКРЛ следующий:

$$K_i \in \begin{cases} 1, \text{ if } d_1(X) \& d_2(X) = 1 \& 1 = 1, \\ \quad P_N - \text{ движение разрешено;} \\ 0, \text{ if } d_1(X) \& d_2(X) = 0 \& 1 = 0, \quad K_i \in P_S, \\ \quad P_K - \text{ движение запрещено;} \\ 0, \text{ if } d_1(X) \& d_2(X) = 1 \& 0 = 0, \quad K_i \in P_S, \\ \quad P_K - \text{ движение запрещено;} \\ 0, \text{ if } d_1(X) \& d_2(X) = 0 \& 0 = 0, \quad K_i \in P_S, \\ \quad P_K - \text{ движение запрещено.} \end{cases}$$

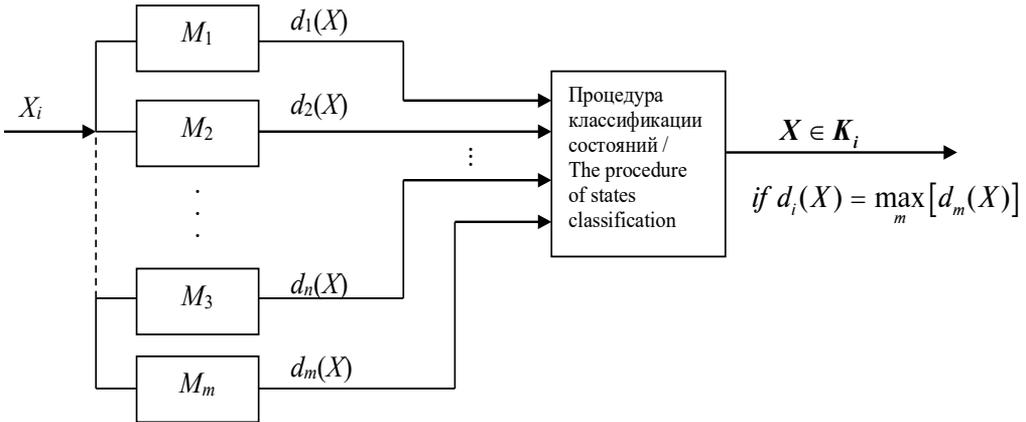
Многомерность пространства состояний РЛ, воздействие значительных дестабилизирующих факторов приводят к необходимости использования РФ повышенной сложности для распознавания состояний РЛ. Усложнение РФ приводит к увеличению ее чувствительности к незначительным изменениям параметров первичных признаков РЛ. В таком случае, если классификатор обучен (коэффициенты модели определены) при нормативных значениях первичных признаков, то при изменениях показателя первичных признаков происходит неправильная классификация состояний. Поэтому достоверно распознавать состояния РЛ в таких условиях затруднительно, и решение проблемы возможно с использованием множества моделей с различной степе-

ню сложности при классификации [4]. Следовательно, если классификатор с  $i$ -й моделью  $P_i$  (минимально возможной сложностью) классифицирует состояние РЛ с наименьшей ошибкой, то в выбранном промежутке времени состояния рельсовых линий распознаются классификатором с использованием  $i$ -й модели и определенного множества признаков, являющихся ее аргументами, а иначе осуществляется переход к другой модели.

На рисунке 3 представлена структурная схема классификатора с множеством моделей.

Алгоритм классификации состояний рельсовой линии множеством моделей классификации, согласно рисунку 3, следующий. Априорно формируются  $m$  моделей, причем первая модель имеет наименьшую сложность, а последняя – максимальную. При предъявлении в  $i$ -й момент времени  $X_i$ -го образа распознается состояние рельсовой линии классификатором с использованием первой модели  $M_1$ , и если текущий класс состояния классифицирован правильно, то данная модель и образ  $X_i$  принимаются для классификации следующих классов. Если при распознавании любого другого класса ошибка распознавания превышает допустимую, то первая модель  $M_1$  отклоняется, и начинается новый цикл распознавания классов другой моделью  $M_2$ . Таким образом производится селекция моделей. В качестве критерия селекции используется относительная ошибка распознавания границ классов, определенных при обучении классификатора. Очевидно, в этом случае нахождение вида и сложности каждой модели производится индивидуально, а не решением совместной системы уравнений для всех моделей.

Построение моделей различной сложности для классификации является одной из сложных задач при создании распознающего классификатора состояний РЛ. При этом формирование ряда моделей предпочтительно осу-



Р и с. 3. Структурная схема системы распознавания образов:  $M_1, M_2, \dots, M_m$  – модели различной сложности

Fig. 3. Structural scheme of pattern recognition system:  $M_1, M_2, \dots, M_m$  – models of varying recognition complexity

шествять рекуррентной процедурой, позволяющей добавлением новых членов в модель усложнять ее сложность. С учетом этого положения в качестве модели удобно использовать ортогональные полиномы (многочлены) Чебышева, Лежандра, Лагерра, Лорана и Эрмита, так как они обеспечивают условия теоремы Вейерштасса о приближении функций [5; 30]. Наиболее привлекательны с позиции интервала ортогональности многочлены Эрмита, для получения которых используется рекуррентное выражение:

$$H_{k+1}(x) - 2xH_k(x) + 2kH_{k-1}(x) = 0, \quad k \geq 1.$$

Интервал ортогональности многочленов Эрмита составляет  $-\infty < x < \infty$ . Это свойство предоставляет определенное преимущество при их использовании в качестве модели классификации, поскольку нет необходимости в ограничении диапазона изменения переменных.

Известно, что при ортогональности системы функций  $\phi_1^*(x), \phi_2^*(x) \dots$  в определенном интервале  $[a, b]$  ортонормированная система функций находится с помощью формулы:

$$\phi_i(x) = \sqrt{\frac{u(x)}{A_i}} \phi_i^*(x), \quad (1)$$

где  $u(x) = \exp(-x^2)$  – весовая функция;  $\phi_i^*(x)$  – ортогональные системы функций.

С учетом (1) ортонормированные многочлены Эрмита определяются следующим выражением:

$$\varphi_k(x) = \frac{\exp(-x^2/2) H_k(x)}{\sqrt{2^k k! \sqrt{\pi}}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Для модели, в качестве аргументов которой используются два информативных признака, то есть  $n = 2$ , полная

система ортонормированных функций имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1(X) &= \varphi_1(x_1)\varphi_1(x_2), \\ \varphi_2(X) &= \varphi_1(x_1)\varphi_2(x_2), \\ \varphi_3(X) &= \varphi_2(x_1)\varphi_1(x_2), \\ \varphi_4(X) &= \varphi_2(x_1)\varphi_2(x_2), \\ \varphi_5(X) &= \varphi_1(x_1)\varphi_3(x_2), \\ &\dots\dots\dots \\ \varphi_n(X) &= \varphi_n(x_1)\varphi_n(x_2). \end{aligned} \right\}$$

Если выбрано множество, состоящее из  $n$  ортонормированных функций  $\varphi_1(X), \varphi_2(X), \varphi_3(X), \dots, \varphi_n(X)$ , то множество кусочно-линейных подмоделей  $d_{11}(X), d_{21}(X), d_{31}(X), \dots, d_{n1}(X)$ , являющихся составной частью первой модели  $d_1(X)$ , представляется в виде линейной комбинации функций  $\varphi(X)$  с неизвестными коэффициентами в виде:

$$d_1(X) = \sum_{i=1}^n C_{ij} \varphi_j(X), \quad (2)$$

где  $\varphi_j(X) = \prod \varphi_k(x_i)$  – ортонормированные функции.

При формировании РФ с использованием признаков на входе рельсового четырехполосника  $n = 3$  полная система ортонормированных функций  $x_1 - x_3$  имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1(X) &= \varphi_1(x_1)\varphi_1(x_2)\varphi_1(x_3), \\ \varphi_2(X) &= \varphi_1(x_1)\varphi_1(x_2)\varphi_2(x_3), \\ \varphi_3(X) &= \varphi_1(x_1)\varphi_2(x_2)\varphi_1(x_3), \\ \varphi_4(X) &= \varphi_1(x_1)\varphi_2(x_2)\varphi_2(x_3), \\ \varphi_5(X) &= \varphi_2(x_2)\varphi_1(x_2)\varphi_1(x_3), \\ \varphi_6(X) &= \varphi_2(x_2)\varphi_1(x_2)\varphi_2(x_3), \\ &\dots\dots\dots \\ \varphi_n(X) &= \varphi_n(x_1)\varphi_n(x_2)\varphi_n(x_3). \end{aligned} \right\} \cdot (3)$$

Система (3) формирует вторую модель  $d_2(X)$  из множества кусочно-линейных подмоделей  $d_{12}(X), d_{22}(X), d_{32}(X), \dots, d_{n2}(X)$  и представляется в виде линейной комбинации функций  $\varphi(X)$  с неизвестными коэффициентами в виде:

$$d_2(X) = \sum_{i=1}^n C_{ij} \varphi_j(X). \quad (4)$$

При формировании РФ с использованием признаков на входе рельсового четырехполосника  $n = 4$  полная система ортонормированных функций  $x_1 - x_4$  имеет вид:

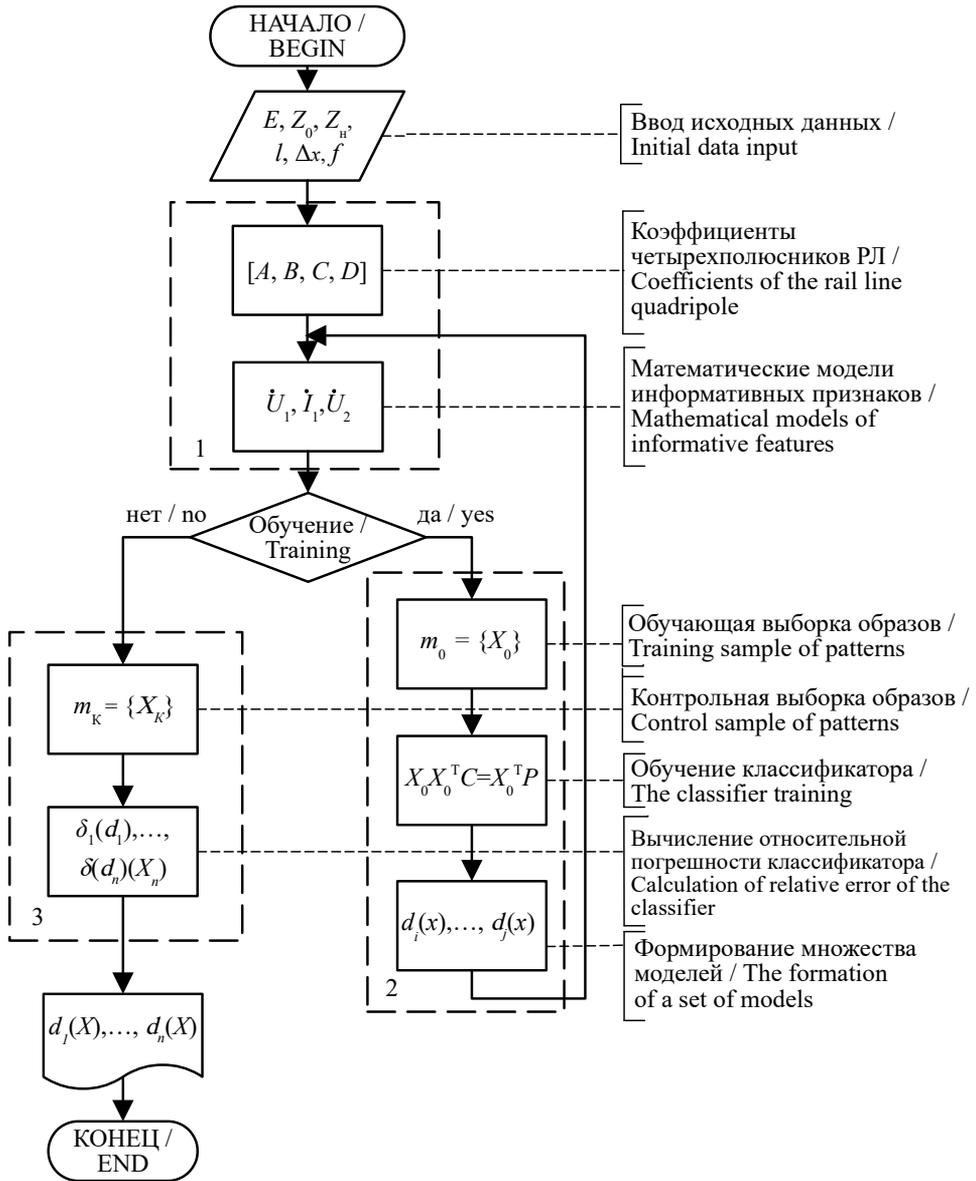
$$\left. \begin{aligned} \varphi_1(X) &= \varphi_1(x_1)\varphi_1(x_2)\varphi_1(x_3)\varphi_1(x_4), \\ \varphi_2(X) &= \varphi_1(x_1)\varphi_1(x_2)\varphi_1(x_3)\varphi_2(x_4), \\ \varphi_3(X) &= \varphi_1(x_1)\varphi_1(x_2)\varphi_2(x_3)\varphi_1(x_4), \\ \varphi_4(X) &= \varphi_1(x_1)\varphi_1(x_2)\varphi_2(x_3)\varphi_2(x_4), \\ \varphi_5(X) &= \varphi_1(x_1)\varphi_2(x_2)\varphi_1(x_3)\varphi_1(x_4), \\ \varphi_6(X) &= \varphi_1(x_1)\varphi_2(x_2)\varphi_1(x_3)\varphi_2(x_4), \\ &\dots\dots\dots \\ \varphi_n(X) &= \varphi_n(x_1)\varphi_n(x_2)\varphi_n(x_3)\varphi_n(x_4). \end{aligned} \right\} \cdot (5)$$

Система (5) формирует третью модель  $d_3(X)$  из множества кусочно-линейных подмоделей  $d_{13}(X), d_{23}(X), d_{33}(X), \dots, d_{n3}(X)$  и представляется в виде линейной комбинации функций  $\varphi(X)$  с неизвестными коэффициентами в виде:

$$d_3(X) = \sum_{i=1}^n C_{ij} \varphi_j(X). \quad (6)$$

Выбирая комбинацию признаков из множества  $X \equiv \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  и количества ортонормированных функций  $\varphi_j(X)$ , определяющих сложность модели  $d(X)$ , можно построить ряд  $d_1(X), d_2(X), d_3(X), \dots, d_n(X)$  (рис. 4), который будет представляться для распознавания классов при классификации состояний РЛ.

Определение коэффициентов моделей (2), (4), (6) осуществляется принципом многомерной аппроксимации, когда на первом этапе формируются пространства классов состояний



Р и с. 4. Процедура формирования адекватных моделей классификатора  
 Fig. 4. The procedure of the formation of adequate classifier models

с обучающей выборкой образов  $[X]_0$  и априорно определенными показателями классов  $P_{ijk}$ , а на втором этапе проверяется правильность распознавания классов использованием контрольной

ной выборки образов  $[X]_k$  с оценкой качества классификации [6; 31; 32]. Так как при классификации состояний РЛ априорная совокупность классов состояний заранее известна (классы обра-

зов режимов нормального  $P_N$ , шунтового  $P_S$  и контрольного  $P_K$ ), то обучение модели относится к задаче «обучение с учителем». На рисунке 4 представлена блок-схема алгоритма формирования адекватных моделей, включая обучение классификатора.

В целом процедура формирования адекватных моделей, включая обучение классификатора состояний РЛ, осуществляется тремя группами блоков: блоками математических моделей информативных признаков и формирования пространства образов, обучения классификатора, проверки правильности распознавания состояний обученным классификатором [7].

На первом этапе формирования адекватных моделей с использованием четырехполюсной схемы замещения РЛ моделируются классы состояний и в соответствии с ними определяются коэффициенты четырехполюсных схем замещения в каждом из классов. Используя математические модели первичных информативных признаков, разработанных в одной из наших работ, и программно-математический пакет Mathcad, можно сформировать многомерные матрицы признаков в соответствующих заранее определенных координатах проводимости изоляции  $g$ , а также переменных координатах поездного шунта  $x_s$  и координатах излома  $x_o$  РЛ [33]. На следующем этапе выбирается вид модели и, используя многомерные матрицы признаков, формируются обучающие и контрольные выборки образов. Решением системы условных уравнений определяются коэффициенты полиномов моделей, и формируются ряды моделей различной степени сложности, причем первый ряд состоит из модели с двумя информативными признаками, второй ряд содержит модели с тремя информативными признаками и т. д.

Используя контрольную выборку образов, составленную из образов, непопавших в обучающую выборку образов,

и сформированных рядов моделей, проверяется погрешность классификации состояний РЛ. Если погрешность находится в допустимом пределе, то модель включается во множество, а если нет, то модель снова проходит процедуру определения коэффициентов с использованием другой многомерной матрицы признаков. Данная процедура циклического обучения классификатора и проверки допустимой погрешности классификации проводится до формирования всех моделей в рядах. Виды моделей рассмотрены в данной работе ниже.

### Результаты исследования

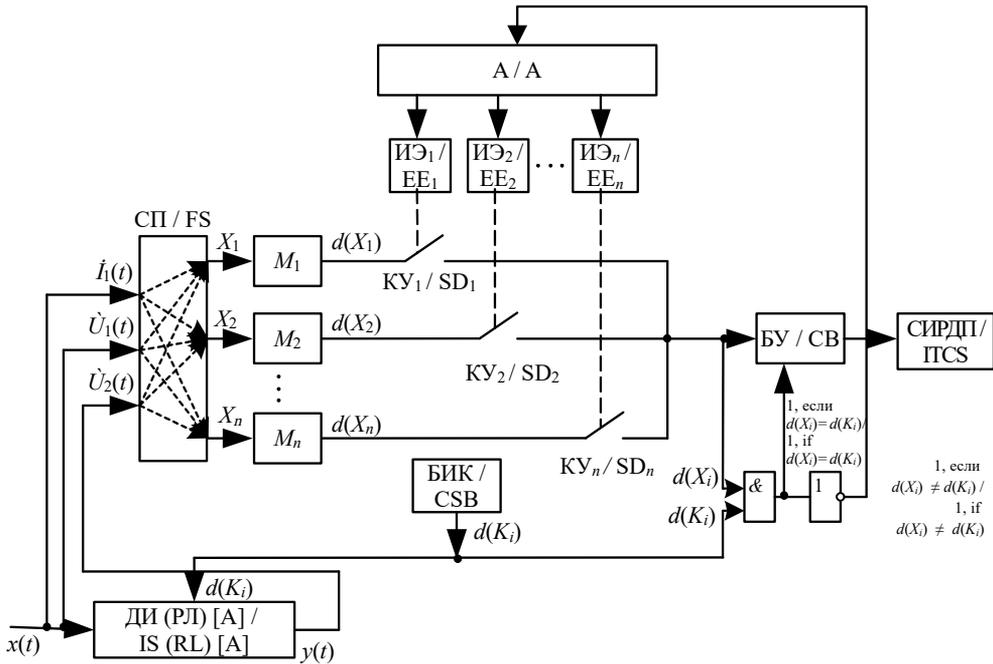
Если СКРЛ функционирует в стационарных условиях, когда первичные параметры рельсовой линии не изменяются, то классификатор обучается распознаванию по статистическим характеристикам признаков. Данный принцип является обучением с учителем [4]. Но из-за динамических воздействий поездов на рельсовый путь и изменения климатических условий значения первичных параметров изменяются в широком диапазоне: например, сопротивление поездного шунта изменяется в диапазоне от 0,02 до 0,12 Ом при нормативном значении 0,06 Ом, проводимость изоляции РЛ может колебаться от 0,02 до 4 См/км при нормативном 1,0 См/км, что приводит к значительным погрешностям распознавания классов. В таком случае методы обучения с учителем могут применяться только для коротких временных промежутков, так как система не обладает свойствами отслеживания динамических вариаций первичных параметров. Для устранения этого недостатка необходимо верифицировать модели к изменениям комплексных амплитуд входного и выходного сигналов путем имитации различных классов состояний и воздействий, дестабилизирующих в момент отсутствия поезда. На рисунке 5 представлена структурно-функциональная схема обучаемого классификатора состояний РЛ с множе-

ством моделей распознавания классов состояний.

При изменении внешних условий работы системы или параметров рельсовых линий в результате воздействия дестабилизирующих факторов изменяются значения первичных информативных признаков, являющихся аргументами модели, что приводит к ошибке распознавания границ классов. В этом случае необходима корректировка мо-

дели посредством ее усложнения и верификации результатов классификации состояний РЛ новой моделью, и этот принцип реализуется использованием при классификации множества моделей различной сложности.

Реализация циклической верификации осуществляется использованием в классификаторе блока имитации классов и сравнением циклически заданных классов и вычисленных моделью



Р и с. 5. Структурно-функциональная схема обучаемого классификатора с множеством моделей распознавания классов состояний рельсовых линий:

- СП – селектор признаков (формирование комбинаций признаков для  $i$ -й модели);
- А – адаптер модели;  $КУ_n$  – коммутационные устройства; БИК – блок имитации классов;
- $d(K_i)$  – имитация класса;  $i$  – номер класса;  $d(X_i)$  – результат классификации  $i$ -й моделью;
- $X_1, X_2, \dots, X_n$  – образы состояний;  $x_1, x_2, \dots, x_j, x_j, x_k$  – первичные информативные признаки (амплитуды напряжений и токов на входе и выходе рельсовой линии и их фазовые соотношения);
- ИЭ – исполнительный элемент; СИРДП – системы интервального регулирования движения поездов; БУ – блок управления; ДИ (РЛ) – датчик информации (рельсовой линии)

Fig. 5. Structural and functional diagram of a trained classifier with a set of pattern recognition models of rail lines states: SP – feature selector (formation of feature combinations for the  $i$ -th model); A – model adapter;  $SD_n$  – switching devices; CSB – classes simulation block;  $d(K_i)$  – class simulation;  $i$  – class number;  $d(X_i)$  – the result of classification by the  $i$ -th model;  $X_1, X_2, \dots, X_n$  – primary informative features (amplitudes of voltages and currents at the input and output of the rail line and their phases); EE – executive element; ITCS – interval train control systems; CB – control block; IS (RL) – information sensor (of the rail line)

границ классов. При совпадении результатов с наперед заданным качеством классификации модель принимается за основу, и до следующего цикла верификации с помощью нее классифицируются все классы состояний РЛ. При несовпадении результатов вычисления границ классов моделью и информации имитатора классов система адаптации переводит классификатор в тестовый режим, при котором блок адаптации для классификации подключает вторую модель (рис. 5,  $M_2$ ), так как первая модель  $M_1$  выдает неудовлетворительное качество классификации, как было указано выше. На первом входе логического элемента «&» появляется логическая «1» (рис. 5), а на второй вход поступает результат классификации моделью  $M_2$ . Если состояние рельсовой линии правильно классифицировано, то есть результат имитации класса БИК и классификации второй моделью совпадают, то и на второй вход логического блока поступает «1», и на выходе логического блока, управляющего БУ, появляется разрешающий сигнал классификации состояний РЛ второй моделью. В следующий интервал времени осуществляется верификация класса шунтового режима, а именно БИК имитирует вступление поезда на участок контроля, классификатор с помощью модели  $M_2$  распознает класс шунтового режима, и если класс распознан верно, то на обоих входах логического блока появляются «единицы», и система продолжает классифицировать состояния РЛ моделью  $M_2$ . Аналогично в последующем временном интервале верифицируется класс контрольного режима.

Если при верификации какого-либо класса результаты имитации класса и распознавания состояний моделью  $M_2$  не совпадают, то на выходе логического блока появляется логический «0», а элемент инверсии подает на управляющий вход адаптера (рис. 5, А), разрешающий сигнал на переключение модели. Адаптер с помощью исполни-

тельного элемента ИЭ<sub>3</sub> и коммутационного устройства КУ<sub>3</sub> подключает третью модель для классификации групп состояний РЛ. Причем сложность третьей модели выше, чем первой и второй. Аналогично вышеописанному алгоритму осуществляется верификация всех классов третьей моделью. Если при классификации состояний РЛ моделью  $M_3$  качество классификации снова неудовлетворительно, то адаптер подключает следующую модель, и цикл продолжается до тех пор, пока адаптер не выберет ту модель, которая при верификации не обеспечит требуемое качество классификации.

В общем случае при распознавании состояний РЛ принцип распознавания с множеством моделей может быть реализован с информативными признаками, измеренными на входе и выходе четырехполюсника РЛ. С учетом того, что состояния рельсовой линии характеризуются шестью первичными признаками, решение задачи создания моделей различной сложности сводится к формированию множества моделей с комбинациями признаков в полиномах по 2–6.

Комбинации  $n$  признаков в моделях из множества  $b$  признаков определяются:

$$S_T^n = \frac{T!}{n!(T-n)!}, \quad (7)$$

где  $T!$  – максимальное количество признаков;  $n!$  – количество признаков, участвующих в сочетаниях.

В соответствии с (7) количество моделей из сочетания по два признака из множества  $b$  признаков равно 15, и они имеют вид:

$$\begin{aligned} d_1^2 &= f(U_2, \varphi_2); & d_2^2 &= f(U_1, U_2); \\ d_3^2 &= f(U_2, \varphi_1); & d_4^2 &= f(U_2, \psi_1); \\ d_5^2 &= f(U_2, I_1); & d_6^2 &= f(\varphi_2, U_1); \\ d_7^2 &= f(\varphi_2, \varphi_1); & d_8^2 &= f(\varphi_2, I_1); \\ d_9^2 &= f(\varphi_2, \psi_1); & d_{10}^2 &= f(U_1, \varphi_1); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_{11}^2 &= f(U_1, I_1); & d_{12}^2 &= f(U_1, \psi_1); \\ d_{13}^2 &= f(\varphi_1, I_1); & d_{14}^2 &= f(\varphi_1, \psi_1); \\ d_{15}^2 &= f(I_1, \psi_1). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_3^5 &= f(U_1, \varphi_1, \varphi_2, I_1, \psi_1); \\ d_4^5 &= f(U_1, \varphi_1, U_2, I_1, \psi_1); \\ d_5^5 &= f(U_1, \varphi_1, U_2, \varphi_2, \psi_1); \\ d_6^5 &= f(U_1, \varphi_1, U_2, \varphi_2, I_1). \end{aligned}$$

При использовании в моделях четырех признаков количество сочетаний, в соответствии с (7), равно 20, и модели имеют вид:

$$\begin{aligned} d_1^3 &= f(\varphi_2, I_1, \psi_1); & d_2^3 &= f(U_2, I_1, \psi_1); \\ d_3^3 &= f(U_2, \varphi_2, \psi_1); & d_4^3 &= f(U_2, \varphi_2, I_1); \\ d_5^3 &= f(\varphi_1, I_1, \psi_1); & d_6^3 &= f(\varphi_1, \varphi_2, \psi_1); \\ d_7^3 &= f(\varphi_1, \varphi_2, I_1); & d_8^3 &= f(\varphi_1, U_2, \psi_1); \\ d_9^3 &= f(\varphi_1, U_2, I_1); & d_{10}^3 &= f(\varphi_1, U_2, \varphi_2); \\ d_{11}^3 &= f(\varphi_2, I_1, \psi_1); & d_{12}^3 &= f(U_1, \varphi_2, \psi_1); \\ d_{13}^3 &= f(U_1, \varphi_2, I_1); & d_{14}^3 &= f(U_1, U_2, \psi_1); \\ d_{15}^3 &= f(U_1, U_2, I_1); & d_{16}^3 &= f(U_1, U_2, \varphi_2); \\ d_{17}^3 &= f(U_1, \varphi_1, \psi_1); & d_{18}^3 &= f(U_1, \varphi_1, I_1); \\ d_{19}^3 &= f(U_1, \varphi_1, \varphi_2); & d_{20}^3 &= f(U_1, \varphi_1, U_2). \end{aligned}$$

Четырехмерное множество признаков в моделях создает семейство из 15 моделей, которые имеют вид:

$$\begin{aligned} d_1^4 &= f(U_2, \varphi_2, I_1, \psi_1); & d_2^4 &= f(\varphi_1, \varphi_2, I_1, \psi_1); \\ d_3^4 &= f(\varphi_1, U_2, I_1, \psi_1); & d_4^4 &= f(\varphi_1, U_2, \varphi_2, \psi_1); \\ d_5^4 &= f(\varphi_1, U_2, \varphi_2, I_1); & d_6^4 &= f(U_1, \varphi_2, I_1, \psi_1); \\ d_7^4 &= f(U_1, U_2, I_1, \psi_1); & d_8^4 &= f(U_1, U_2, \varphi_2, \psi_1); \\ d_9^4 &= f(U_1, U_2, \varphi_2, I_1); & d_{10}^4 &= f(U_1, \varphi_1, I_1, \psi_1); \\ d_{11}^4 &= f(U_1, \varphi_1, \varphi_2, \psi_1); & d_{12}^4 &= f(U_1, \varphi_1, \varphi_2, I_1); \\ d_{13}^4 &= f(U_1, \varphi_1, U_2, \psi_1); & d_{14}^4 &= f(U_1, \varphi_1, U_2, I_1); \\ d_{15}^4 &= f(U_1, \varphi_1, U_2, \varphi_2). \end{aligned}$$

При использовании в моделях сочетания из пяти признаков количество сформированных моделей может быть равно 6, и они имеют вид:

$$\begin{aligned} d_1^5 &= f(\varphi_1, U_2, \varphi_2, I_1, \psi_1); \\ d_2^5 &= f(U_1, U_2, \varphi_2, I_1, \psi_1); \end{aligned}$$

И, наконец, самая сложная модель содержит все шесть признаков, и она имеет вид:

$$d_1^6 = f(U_1, \varphi_1, U_2, \varphi_2, I_1, \psi_1).$$

Оценить количественно качество классификации разработанными моделями удобно, используя критерии качества классификации каждой моделью:

$$K_{NS} = \frac{\inf d_N(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\sup d_S(x_1, x_2, \dots, x_n)} \Bigg|_{P_N > P_S}, \quad \forall(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (8)$$

где  $K_{NS}$  – критерий качества классификации нормального и шунтового режимов;  $\inf d_N(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – нижняя граница класса нормального режима;  $\sup d_S(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – верхняя граница класса шунтового режима.

$$K_{SK} = \frac{\inf d_S(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\sup d_K(x_1, x_2, \dots, x_n)} \Bigg|_{P_S > P_K}, \quad \forall(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (9)$$

где  $K_{SK}$  – критерий качества классификации шунтового и контрольного режимов;  $\inf d_S(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – нижняя граница класса шунтового режима;  $\sup d_K(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – верхняя граница класса контрольного режима.

С использованием математического пакета Mathcad и разработанного принципа формирования моделей авторами исследована классификация состояний рельсовых линий ограниченной длины 2,5 км при частоте сигнального тока 50 Гц и диапазоне изменения проводимости изоляции  $4,0 > g > 0,02$  См/км

тремя моделями различной сложности из 57 сформированных моделей и значениями критериев правильной классификации  $K_{NS} > 1,2$  и  $K_{SK} > 1,2$  [2].

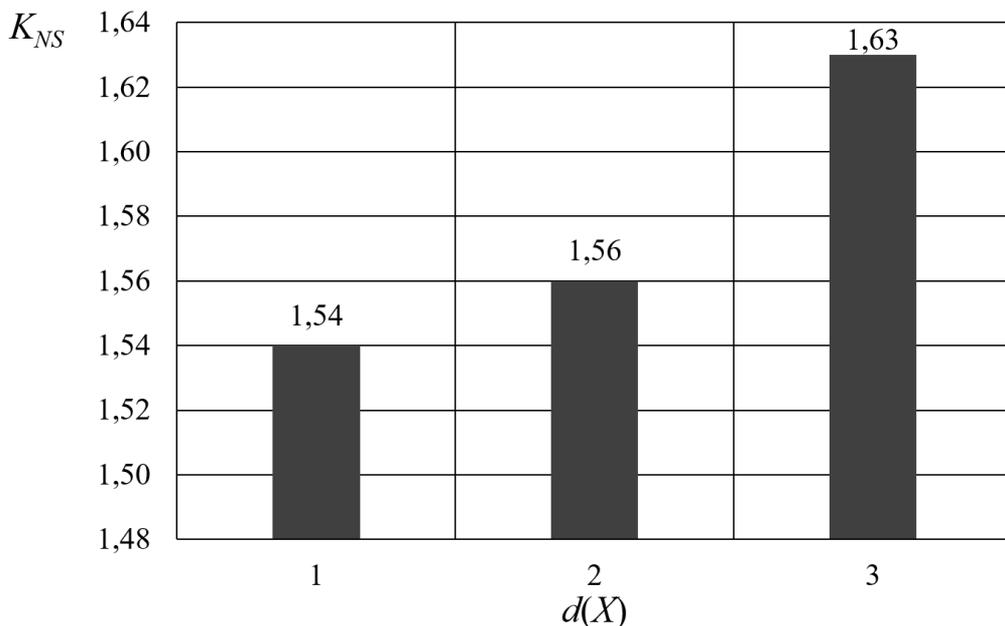
На рисунке 6 графически проиллюстрированы результаты классификации состояний РЛ критерием (8) и тремя моделями различной сложности в виде ортогональных полиномов Эрмита: (2), (4) и (6) с использованием двух  $d_1^2 = f(U_2, \varphi_2)$  (рис. 6, диаграмма 1), трех  $d_{16}^3 = f(U_1, U_2, \varphi_2)$  (рис. 6, диаграмма 2) и четырех признаков  $d_9^4 = f(U_1, U_2, \varphi_2, I_1)$  (рис. 6, диаграмма 3).

Анализ результатов исследований показывает, что в соответствии с критерием качества классификации нормального и шунтового режимов (8) классы с использованием моделей (2), (4) и (6) распознаются правильно, так как  $K_{NS} > 1,2$ . Причем условие критерия качества классификации выполняется с запасом. Так, моделью минимальной сложности с двумя признаками реальный критерий  $K_{NS} = 1,54$ , что превышает допустимое значение в 1,28 раза, мо-

делью с тремя признаками  $K_{NS} = 1,55$ , и это превышает в 1,3 раза, а моделью с четырьмя признаками  $K_{NS} = 1,63$ , и превышение составляет 1,36 раза.

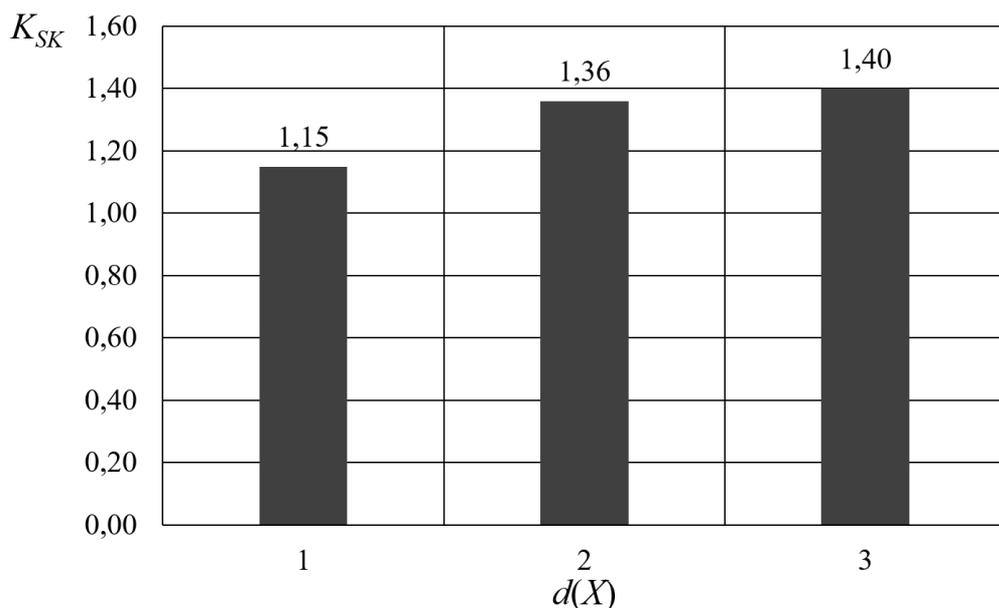
На рисунке 6 графически проиллюстрированы результаты классификации состояний РЛ критерием (9) и тремя моделями различной сложности, использованными в предыдущем случае с употреблением двух  $d_1^2 = f(U_2, \varphi_2)$  (рис. 7, диаграмма 1), трех  $d_{16}^3 = f(U_1, U_2, \varphi_2)$  (рис. 7, диаграмма 2) и четырех признаков  $d_9^4 = f(U_1, U_2, \varphi_2, I_1)$  (рис. 7, диаграмма 3).

Анализ результатов исследования качества классификации классов шунтового и контрольного режимов критерием  $K_{SK}$  показывает, что с использованием модели минимальной сложности с двумя признаками реальный критерий  $K_{SK} = 1,15$ , что ниже порога допустимого значения 1,2, то есть классы неправильно классифицируются, а с использованием модели с тремя признаками  $K_{SK} = 1,36$ , что превышает порог допустимого значения в 1,13 раза, а с исполь-



Р и с. 6. Графики значений критериев качества классификации по (8)

F i g. 6. Graphs of values of classification quality criteria according to (8)



Р и с. 7. Графики значений критериев качества классификации по (9)  
 F i g. 7. Graphs of values of classification quality criteria according to (9)

зованием модели с четырьмя признаками  $K_{SK} = 1,4$ , и превышение составляет 1,17 раза, и следовательно, классы распознаются правильно. Таким образом, моделью минимальной сложности обученный классификатор не может распознать правильно все классы, так как диапазон дестабилизирующих воздействий значительный, а также большая длина рельсовой линии участка контроля. Вместе с тем добавление дополнительного признака «модуль напряжения на входе рельсовой линии» позволяет существенно повысить классифицирующие свойства модели.

**Обсуждение и заключение**

Результаты проведенных исследований подтверждают реализуемость принципа классификации состояний РЛ множеством моделей классификации, и алгоритм рекуррентного повышения сложности классификации путем использования модели повышенной сложности. Критерием предъявления новой более сложной модели

является несовпадение результатов вычисления класса  $i$ -й моделью и реальным классом, в котором находится рельсовая линия в рассматриваемый момент времени. В результате имитационного и математического моделирования получены 57 моделей, которые могут быть использованы при классификации состояний РЛ. Разработанный подход позволяет реализовать синтез классификаторов заранее определенными критериями, что чрезвычайно привлекательно при создании классификаторов, функционирующих в условиях воздействия дестабилизирующих факторов в значительном диапазоне, так как реальный диапазон изменения основного возмущающего воздействия достигает от 0,02 до 40 См/км. Значительный запас классификации режимов следует из требований обеспечения высокой надежности классификации состояний РЛ, так как они обеспечивают безопасность движения поездов и грузов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Тарасова, А. Е.** Исследование потенциальных возможностей классификаторов состояний рельсовых линий / А. Е. Тарасова // Наука и образование транспорту. – 2018. – № 1. – С. 223–226.
2. **Кравцов, Ю. А.** Методика проверки помехоустойчивости приемников тональных рельсовых цепей / Ю. А. Кравцов, А. А. Антонов, М. Е. Бакин // Мир транспорта. – 2015. – Т. 13, № 6 (61). – С. 102–109. – URL: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/554> (дата обращения: 03.11.2020). – Рез. англ.
3. **Мудрая, Н. Г.** Автоматическая система контроля работоспособности рельсовых цепей на основе применения широкополосных сигналов / Н. Г. Мудрая // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – Т. 57, № 1. – С. 124–129. – URL: <https://clck.ru/RjKTm> (дата обращения: 03.11.2020). – Рез. англ.
4. **Bestemyanov, P. F.** Energy-Efficient Algorithms for Assessment of the Rail-Circuit Operation / P. F. Bestemyanov. – DOI 10.3103/S106837121709005X // Russian Electrical Engineering. – 2017. – Vol. 88, Issue 9. – Pp. 557–562. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103%2FS106837121709005X> (дата обращения: 03.11.2020).
5. **Тарасов, Е. М.** Принцип построения классификатора состояний рельсовых линий множеством информативных признаков / Е. М. Тарасов // Известия Транссиба. – 2012. – № 1. – С. 112–118. – URL: [http://izvestia-transsiba.ru/images/journal\\_pdf/2012-1\(9\).pdf](http://izvestia-transsiba.ru/images/journal_pdf/2012-1(9).pdf) (дата обращения: 03.11.2020).
6. Разработка обучаемого классификатора состояний рельсовых линий с многомерными информативными признаками / Д. В. Железнов, Е. М. Тарасов, А. Г. Исайчева, Т. И. Михеева. – DOI 10.15622/SP.50.2 // Труды СПИИРАН. – 2017. – № 1 (50). – С. 32–54. – URL: <http://proceedings.spiiras.nw.ru/ojs/index.php/sp/article/view/3436> (дата обращения: 03.11.2020). – Рез. англ.
7. **Rosen, Ch. A.** Pattern Classification by Adaptive Machines / Ch. A. Rosen. – DOI 10.1126/science.156.3771.38 // Science. – 1967. – Vol. 156, Issue 3771. – Pp. 38–44. – URL: <https://science.sciencemag.org/content/156/3771/38> (дата обращения: 03.11.2020).
8. **Vapnik, V. N.** An Overview of Statistical Learning Theory / V. N. Vapnik // IEEE Trans. Neural Networks. – 1999. – Vol. 10, Issue 5. – Pp. 988–999. – URL: <https://www.math.arizona.edu/~hzhang/math574m/Read/vapnik.pdf> (дата обращения: 03.11.2020).
9. **Попов, А. А.** Получение разреженных решений методом LS SVM через построение выборки с помощью методов оптимального планирования и внешних критериев качества моделей / А. А. Попов, Ш. А. Бобоев. – DOI 10.21285/1814-3520-2018-1-100-117 // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 1. – С. 100–117. – URL: [http://journals.istu.edu/vestnik\\_irtgu/journals/2018/01/articles/09](http://journals.istu.edu/vestnik_irtgu/journals/2018/01/articles/09) (дата обращения: 03.11.2020). – Рез. англ.
10. Support-Vector-Based Fuzzy Neural Network for Pattern Classification / Ch.-T. Lin, Ch.-M. Yeh, Sh.-F. Liang [et al.] // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 2006. – Vol. 14, Issue 1. – Pp. 31–41. – URL: <https://ir.nctu.edu.tw/bitstream/11536/12680/1/000235378000003.pdf> (дата обращения: 03.11.2020).
11. **Тарасов, Е. М.** Исследование информативности признаков при распознавании состояний рельсовых линий / Е. М. Тарасов, В. Л. Герус, А. Е. Тарасова. – DOI 10.15507/0236-2910.028.201802.191-206 // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 2. – С. 191–206. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/60-18-2/401-10-15507-0236-2910-028-201802-5> (дата обращения: 03.11.2020). – Рез. англ.
12. **Ailem, M.** Model-Based Co-Clustering for the Effective Handling of Sparse Data / M. Ailem, F. Role, M. Nadif. – DOI 10.1016/j.patcog.2017.06.005 // Pattern Recognition. – 2017. – Vol. 72. – Pp. 108–122. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320317302297?via%3Dihub> (дата обращения: 03.11.2020).
13. Pattern Recognition / K. Kulkarni, P. Turaga, A. Srivastava, R. Chellappa. – DOI 10.1002/047134608x.w5513.pub2 – New York: Wiley, 2019. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/047134608X.W5513.pub2> (дата обращения: 03.11.2020).
14. **Rakcheeva, T.** Focal Model in the Pattern Recognition Problem / T. Rakcheeva. – DOI 10.1007/978-3-030-12082-5\_12 // Advances in Artificial Systems for Medicine and Education II. AIMEE 2018. –

2018. – Pp. 127–138. – URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-12082-5\\_12](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-12082-5_12) (дата обращения: 03.11.2020).

15. **Неделько, В. М.** Некоторые вопросы оценивания качества методов построения решающих функций / В. М. Неделько // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2013. – № 3. – С. 123–132. – URL: [http://journals.tsu.ru/informatics/&journal\\_page=archive&id=922&article\\_id=2381](http://journals.tsu.ru/informatics/&journal_page=archive&id=922&article_id=2381) (дата обращения: 03.11.2020).

16. **Hamed, H. A.** Pattern Classification / H. A. Hamed, J. H. Elnaz. – DOI 10.1007/978-3-319-57550-6\_2 // Guide to Convolutional Neural Networks. – 2017. – Pp. 15–83. – URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-57550-6\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-57550-6_2) (дата обращения: 03.11.2020).

17. On Ensuring Invariance in Problems of Control of Rail-Line Conduction / E. M. Tarasov, V. B. Teplyakov, V. B. Gumennikov, A. G. Isaicheva. – DOI 10.3103/S1068371217030166 // Russian Electrical Engineering. – 2017. – Vol. 88, Issue 3. – Pp. 105–108. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103%2FS1068371217030166> (дата обращения: 03.11.2020).

18. **Присухина, И. В.** Машинная классификация режима работы электрической рельсовой цепи на основе логистической регрессии / И. В. Присухина, Д. В. Борисенко. – DOI 10.25206/1813-8225-2018-162-126-130 // Омский научный вестник. – 2018. – № 6. – С. 126–130. – URL: [https://www.omgtu.ru/general\\_information/media\\_omgtu/journal\\_of\\_omsk\\_research\\_journal/files/arhiv/2018/6\(162\)/126-130 Присухина И. В., Борисенко Д. В..pdf](https://www.omgtu.ru/general_information/media_omgtu/journal_of_omsk_research_journal/files/arhiv/2018/6(162)/126-130%20Присухина%20И.%20В..pdf) (дата обращения: 03.11.2020).

19. **Amari, S.** A Theory of Adaptive Pattern Classifiers / S. Amari. – DOI 10.1109/PGEC.1967.264666 // IEEE Transactions on Electronic Computers. – 1967. – Vol. 16, Issue 3. – Pp. 299–307. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4039068> (дата обращения: 03.11.2020).

20. **Борисенко, Д. В.** Машинная классификация режима работы электрической рельсовой цепи на основе логистической регрессии / Д. В. Борисенко, И. В. Присухина, С. А. Лунёв. – DOI 10.25206/1813-8225-2018-160-67-72 // Омский научный вестник. – 2018. – № 4. – С. 67–72. – URL: [https://www.omgtu.ru/general\\_information/media\\_omgtu/journal\\_of\\_omsk\\_research\\_journal/files/arhiv/2018/4\(160\)/67-72 Борисенко Д. В., Присухина И. В., Лунёв С. А..pdf](https://www.omgtu.ru/general_information/media_omgtu/journal_of_omsk_research_journal/files/arhiv/2018/4(160)/67-72%20Борисенко%20Д.%20В.,%20Присухина%20И.%20В.,%20Лунёв%20С.%20А..pdf) (дата обращения: 03.11.2020).

21. **Dokukin, A. A.** Multilevel Models for Solution of Multiclass Recognition Problems / A. A. Dokukin, V. V. Ryazanov, O. V. Shut. – DOI 10.1134/S1054661816030044 // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2016. – Vol. 26, Issue 3. – Pp. 461–473. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS1054661816030044> (дата обращения: 03.11.2020).

22. **Geva, S.** Adaptive Nearest Neighbor Pattern Classification / S. Geva, J. Sitte. – DOI 10.1109/72.80344 // IEEE Transactions on Neural Networks. – 1991. – Vol. 2, Issue 2. – Pp. 318–322. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/80344> (дата обращения: 03.11.2020).

23. **Присухина, И. В.** Совершенствование алгоритмов машинной классификации состояний рельсовых электротехнических систем в составе автоматической локомотивной сигнализации / И. В. Присухина, Д. В. Борисенко. – DOI 10.25206/1813-8225-2019-168-63-69 // Омский научный вестник. – 2019. – № 6. – С. 63–69. – URL: [https://www.omgtu.ru/general\\_information/media\\_omgtu/journal\\_of\\_omsk\\_research\\_journal/files/arhiv/2019/6\(168\)/63-69 Присухина И. В., Борисенко Д. В..pdf](https://www.omgtu.ru/general_information/media_omgtu/journal_of_omsk_research_journal/files/arhiv/2019/6(168)/63-69%20Присухина%20И.%20В.,%20Борисенко%20Д.%20В..pdf) (дата обращения: 03.11.2020).

24. **Жуков, Д. А.** Влияние объема контрольной выборки на качество диагностики состояния технического объекта / Д. А. Жуков, В. Н. Клячкин // Автоматизация процессов управления. – 2018. – № 2. – С. 90–95. – URL: [http://apu.npomars.com/images/pdf/52\\_11.pdf](http://apu.npomars.com/images/pdf/52_11.pdf) (дата обращения: 03.11.2020). – Рез. англ.

25. Разработка инвариантного обучаемого идентификатора координаты поезда / Д. В. Железнов, А. Г. Котенко, Т. И. Михеева [и др.] // Вестник СамГУПС. – 2017. – № 2. – С. 100–112. – URL: <https://www.samgups.ru/upload/iblock/414/414b71f869a65cf53fca34b7e3aa9d1.pdf> (дата обращения: 03.11.2020). – Рез. англ.

26. **Tarasov, E. M.** Development of an Intelligent System of Determinating the Coordinates and the Speed of the Train / E. M. Tarasov, D. V. Zheleznov. – DOI 10.1515/tj-2016-0013 // Transport and Telecommunication Journal. – 2016. – Vol. 17, Issue 2. – Pp. 138–143. – URL: <https://content.sciendo.com/view/journals/tj/17/2/article-p138.xml> (дата обращения: 03.11.2020).

27. **Кравцов, Ю. А.** Методика проверки помехоустойчивости приемников тональных рельсовых цепей / Ю. А. Кравцов, А. А. Антонов, М. Е. Бакин // Мир транспорта. – 2015. – Т. 13, № 6. – С. 102–109. – URL: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/554> (дата обращения: 03.11.2020). – Рез. англ.
28. **Myasnikov, E. V.** Analysis of Approaches to Feature Space Partitioning for Nonlinear Dimensionality Reduction / E. V. Myasnikov. – DOI 10.1134/S1054661816030147 // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2016. – Vol. 26, Issue 3. – Pp. 474–482. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS1054661816030147> (дата обращения: 03.11.2020).
29. **Лябах, Н. Н.** Автоматизация процесса классификации интеллектуальных транспортных комплексов на основе экспертных систем / Н. Н. Лябах, Н. Г. Умрихин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 2. – С. 98–103. – URL: <http://vestnik.rgups.ru/?p=22> (дата обращения: 03.11.2020). – Рез. англ.
30. **Голик, Ф. В.** Аппроксимация эмпирических распределений вероятностей полиномами Бернштейна / Ф. В. Голик. – DOI 10.30898/1684-1719.2018.7.5 // Журнал радиоэлектроники. – 2018. – № 7. – URL: [http://jre.cplire.ru/jre/jul18/5/abstract\\_e.html](http://jre.cplire.ru/jre/jul18/5/abstract_e.html) (дата обращения: 03.11.2020). – Рез. англ.
31. **Kazanskiy, N. L.** Integrated Design Technology for Computer Vision Systems in Railway Transportation / N. L. Kazanskiy, S. B. Popov. – DOI 10.1134/S1054661815020133 // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2015. – Vol. 25, Issue 2. – Pp. 215–219. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS1054661815020133> (дата обращения: 03.11.2020).
32. **Klyachkin, V. N.** The Use of Aggregate Classifiers in Technical Diagnostics, Based on Machine Learning / V. N. Klyachkin, Yu. E. Kuvayskova, D. A. Zhukov // Information Technology and Nanotechnology. – 2017. – Vol. 1903. – Pp. 32–35. – URL: <http://ceur-ws.org/Vol-1903/paper7.pdf> (дата обращения: 03.11.2020).
33. Обеспечение инвариантности к возмущающим воздействиям в рельсовых линиях / Е. М. Тарасов, Д. М. Железнов, Н. Н. Васин, А. Е. Тарасова. – DOI 10.15507/2658-4123.029.201902.152-168 // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 2. – С. 152–168. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/82-19-2/689-10-15507-0236-2910-029-201902-1> (дата обращения: 03.11.2020). – Рез. англ.

*Поступила 14.05.2020; принята к публикации 10.07.2020; опубликована онлайн 30.12.2020*

*Об авторах:*

**Тарасов Евгений Михайлович**, заведующий кафедрой электротехники ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения» (443066, Российская Федерация, г. Самара, ул. Свободы, д. 2В), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: C-2505-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2717-7343>, tarasov53em@yandex.ru

**Андрончев Иван Константинович**, ректор ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения» (443066, Российская Федерация, г. Самара, ул. Свободы, д. 2В), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: AAD-2892-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3964-7050>, rektorat@samgups.ru

**Булатов Андрей Александрович**, проректор ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения» (443066, Российская Федерация, г. Самара, ул. Свободы, д. 2В), кандидат технических наук, доцент, Researcher ID: AAC-5665-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1278-2172>, bulatov@samgups.ru

**Тарасова Анна Евгеньевна**, аспирант кафедры электротехники ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения» (443066, Российская Федерация, г. Самара, ул. Свободы, д. 2В), Researcher ID: C-2497-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6907-6036>, tarasova.ann@list.ru

*Заявленный вклад соавторов:*

Е. М. Тарасов – постановка задачи, консультирование по теоретической части, анализ результатов исследований, разработка математических моделей; И. К. Андрончев – разработка алгорит-

ма классификации состояний рельсовой линии со множеством моделей, работа с литературой; А. А. Булатов – разработка алгоритмов моделирования распознавания состояний рельсовых линий на ЭВМ, анализ литературных источников; А. Е. Тарасова – обработка результатов исследований, проведение исследований с использованием программного средства Mathcad, оформление статьи.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Tarasova A. Ye. [Research of Potential Possibilities of Rail State Classifiers]. *Nauka i obrazovanie transportu* = Science and Education of Transport. 2018; (1):223-226. (In Russ.)
2. Kravtsov Yu. A., Antonov A. A., Bakin M. E. Methods of Interference Immunity Checking of Tone Track Circuits Receivers. *Mir transporta* = World of Transport and Transportation. 2015; 13(6):102-109. Available at: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/554> (accessed 03.11.2020). (In Russ.)
3. Mudraya N. G. Automatic Control System of Rail Circuits Rolling on the Basis of Application of Complex Signals. *Sovremennye tehnologii. Systemnyi analiz. Modelirovanie* = Modern Technologies. System Analysis. Modeling. 2018; 57(1):124-129. Available at: <https://clck.ru/RjKTm> (accessed 03.11.2020). (In Russ.)
4. Bestemyanov P. F. Energy-Efficient Algorithms for Assessment of the Rail-Circuit Operation. *Russian Electrical Engineering*. 2017; 88(9):557-562. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S106837121709005X>
5. Tarasov Ye. M. [The Principle of Building a Classifier of Rail Line States by a Set of Informative Features]. *Izvestiya Transsiba* = News of Transsib. 2012; (1):112-118. Available at: [http://izvestia-transsiba.ru/images/journal\\_pdf/2012-1\(9\).pdf](http://izvestia-transsiba.ru/images/journal_pdf/2012-1(9).pdf) (accessed 03.11.2020). (In Russ.)
6. Zhelezov D. V., Tarasov E. M., Isaycheva A. G., et al. Development of the Learning Classifier of Rail Lines States with Multivariate Informative Features. *Trudy SPIIRAN* = SPIIRAS Proceedings. 2017; (1):32-54. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15622/SP.50.2>
7. Rosen Ch. A. Pattern Classification by Adaptive Machines. *Science*. 1967; 156(3771):38-44. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1126/science.156.3771.38>
8. Vapnik V. N. An Overview of Statistical Learning Theory. *IEEE Trans. Neural Networks*. 1999; 10(5):988-999. Available at: <https://www.math.arizona.edu/~hzhang/math574m/Read/vapnik.pdf> (accessed 03.11.2020). (In Eng.)
9. Popov A. A., Boboev Sh. A. Obtaining Sparse Solutions by LS SVM Method through Sample Construction by Optimal Experiment Design Method and Model Quality Criteria. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018; 22(1):100-117. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-100-117>
10. Lin Ch.-T., Yeh Ch.-M., Liang Sh.-F., et al. Support-Vector-Based Fuzzy Neural Network for Pattern Classification. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2006; 14(1):31-41. Available at: <https://ir.nctu.edu.tw/bitstream/11536/12680/1/000235378000003.pdf> (accessed 03.11.2020). (In Eng.)
11. Tarasov E. M., Gerus V. L., Tarasova A. E. Study of Informative Value of Features in Rail Condition Monitoring. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(2):191-206. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.191-206>
12. Ailem M., Role F., Nadif M. Model-Based Co-Clustering for the Effective Handling of Sparse Data. *Pattern Recognition*. 2017; 72:108-122. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2017.06.005>
13. Kulkarni K., Turaga P., Srivastava A., et al. Pattern Recognition. New York: Wiley; 2019. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1002/047134608x.w5513.pub2>
14. Rakcheeva T. Focal Model in the Pattern Recognition Problem. In: *Advances in Artificial Systems for Medicine and Education II. AIMEE 2018*. 2018. Pp. 127-138. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-12082-5\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-12082-5_12)

15. Nedelko V.M. Some Aspects of Estimating a Quality of Decision Functions Construction Methods. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* = Tomsk State University Journal of Control and Computer Science. 2013; (3):123-132. Available at: [http://journals.tsu.ru/informatics/&journal\\_page=archive&id=922&article\\_id=2381](http://journals.tsu.ru/informatics/&journal_page=archive&id=922&article_id=2381) (accessed 03.11.2020). (In Russ.)
16. Hamed H.A., Elnaz J.H. Pattern Classification. In: Guide to Convolutional Neural Networks. 2017. Pp. 15-83. Available at: [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-57550-6\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-57550-6_2) (accessed 03.11.2020). (In Eng.)
17. Tarasov E.M., Teplyakov V.B., Gumennikov V.B., et al. On Ensuring Invariance in Problems of Control of Rail-Line Conduction. *Russian Electrical Engineering*. 2017; 88(3):105-108. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068371217030166>
18. Prisukhina I.V., Borisenko D.V. [Machine Classification of the Electric Rail Circuit Operation Mode on the Basis of Logistic Regression]. *Omskiy nauchnyy vestnik* = Omsk Scientific Bulletin. 2018; (6):126-130. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-162-126-130>
19. Amari S. A Theory of Adaptive Pattern Classifiers. *IEEE Transactions on Electronic Computers*. 1967; 16(3):299-307. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/PGEC.1967.264666>
20. Borisenko D.V., Prisukhina I.V., Lunev S.A. [Machine Classification of the Electric Rail Circuit Operation Mode on the Basis of Logistic Regression]. *Omskiy nauchnyy vestnik* = Omsk Scientific Bulletin. 2018; (4):67-72. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-160-67-72>
21. Dokukin A.A., Ryazanov V.V., Shut O.V. Multilevel Models for Solution of Multiclass Recognition Problems. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2016; 26(3):461-473. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S1054661816030044>
22. Geva S., Sitte J. Adaptive Nearest Neighbor Pattern Classification. *IEEE Transactions on Neural Networks*. 1991; 2(2):318-322. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1109/72.80344>
23. Prisukhina I.V., Borisenko D.V. [Improvement of Algorithms of Machine Classification of Rail Electrical Systems States as a Part of Automatic Locomotive Signaling]. *Omskiy nauchnyy vestnik* = Omsk Scientific Bulletin. 2019; (6):63-69. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2019-168-63-69>
24. Zhukov D.A., Kliachkin V.N. The Effect of the Control Sample Volume on the Quality of Diagnostics of the Technical Object State. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya* = Automation of Control Processes. 2018; (2):90-95. Available at: [http://apu.npomars.com/images/pdf/52\\_11.pdf](http://apu.npomars.com/images/pdf/52_11.pdf) (accessed 03.11.2020). (In Russ.)
25. Zhelezov D.V., Kotenko A.G., Mikheeva T.I., et al. Development of Invariant Trainable Identifier of Train Coordinate. *Vestnik SamGUPS* = Bulletin of Samara State University of Railway Transport. 2017; (2):100-112. Available at: <https://www.samgups.ru/upload/iblock/414/414b71f869a65cf53ffca34b7e3aa9d1.pdf> (accessed 03.11.2020). (In Russ.)
26. Tarasov E.M., Zhelezov D.V. Development of an Intelligent System of Determinating the Coordinates and the Speed of the Train. *Transport and Telecommunication Journal*. 2016; 17(2):138-143. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1515/ttj-2016-0013>
27. Kravtsov Yu.A., Antonov A.A., Bakin M.E. Methods of Interference Immunity Checking of Tone Track Circuits Receivers. *Mir transporta* = World of Transport and Transportation. 2015; 13(6):102-109. Available at: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/554> (accessed 03.11.2020). (In Russ.)
28. Myasnikov E.V. Analysis of Approaches to Feature Space Partitioning for Nonlinear Dimensionality Reduction. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2016; 26(3):474-482. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S1054661816030147>
29. Liabakh N.N., Umrikhin N.G. Classification Process Automation of Intelligent Transport Complexes on the Basis of Expert Systems. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* = Rostov State University of Railway Transport Bulletin. 2013; (2):98-103. Available at: <http://vestnik.rgups.ru/?p=22> (accessed 03.11.2020). (In Russ.)
30. Golik F.V. Approximation of the Empirical Probability Distributions by Bernstein Polynomials. *Zhurnal radioelektroniki* = Journal of Radio Electronics. 2018; (7). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.7.5>

31. Kazanskiy N.L., Popov S.B. Integrated Design Technology for Computer Vision Systems in Railway Transportation. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2015; 25(2):215-219. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S1054661815020133>

32. Klyachkin V.N., Kuvayskova Yu.E., Zhukov D.A. The Use of Aggregate Classifiers in Technical Diagnostics, Based on Machine Learning. *Information Technology and Nanotechnology*. 2017; 1903:32-35. Available at: <http://ceur-ws.org/Vol-1903/paper7.pdf> (accessed 03.11.2020). (In Russ.)

33. Tarasov E.M., Zheleznov D.V., Vasin N.N., et al. Providing Invariance to Disturbing Effects in Rail Lines. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(2):152-168. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.152-168>

*Received 14.05.2020; revised 10.07.2020; published online 30.12.2020*

*About the authors:*

**Evgeniy M. Tarasov**, Head of Electrical Engineering Chair, Samara State Transport University (2V Svoboda St., Samara 443066, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: C-2505-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2717-7343>, tarasov53em@yandex.ru

**Ivan K. Andronchev**, Rector of Samara State Transport University (2V Svoboda St., Samara 443066, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: AAD-2892-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3964-7050>, rektorat@samgups.ru

**Andrey A. Bulatov**, Vice-Rector of Samara State Transport University (2V Svoboda St., Samara 443066, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Associate Professor, Researcher ID: AAC-5665-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1278-2172>, bulatov@samgups.ru

**Anna E. Tarasova**, Postgraduate Student of Electrical Engineering Chair, Samara State Transport University (2V Svoboda St., Samara 443066, Russian Federation), Researcher ID: C-2497-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6907-6036>, tarasova.ann@list.ru

*Contribution of the authors:*

E. M. Tarasov – formulation of the problem, consulting on theoretical part, analysis of research results, development of mathematical models; I. K. Andronchev – development of an algorithm for classification of rail line states with multiple models, work with literature; A. A. Bulatov – development of algorithms for modeling the recognition of railway line states on computer, analysis of literary sources; A. E. Tarasova – processing of research results, conducting research using the Mathcad, formatting the article.

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



## Исследование влияния сложности технического исполнения и номенклатурно-количественного состава сельскохозяйственной техники на показатель ее утилизируемости

И. Н. Кравченко<sup>1</sup>, Ю. С. Мигачев<sup>2</sup>, Ю. А. Кузнецов<sup>3</sup>,  
А. М. Давыдкин<sup>4\*</sup>, М. Н. Ерофеев<sup>5</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»  
(г. Москва, Российская Федерация)

<sup>2</sup>ФГКВООУ ВО «Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С. К. Тимошенко (г. Кострома, Российская Федерация)

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н. В. Парахина» (г. Орёл, Российская Федерация)

<sup>4</sup>ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва»  
(г. Саранск, Российская Федерация)

<sup>5</sup>ФГБУН «Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук» (г. Москва, Российская Федерация)

\*aldavydkin@yandex.ru

*Введение.* Рациональная утилизация сельскохозяйственной техники, отработавшей свой ресурс, является актуальной проблемой современного агропромышленного комплекса. В связи с этим реализация мероприятий по использованию физической модели утилизации отработавшей сельскохозяйственной техники является решением проблем вторичного использования ресурсов.

*Материалы и методы.* Статистические исследования экспериментальных данных и получение регрессионной модели осуществлялось с использованием метода парного линейного регрессионного анализа. С применением регрессионного уравнения проведен расчет значений показателя утилизируемости по всему номенклатурному составу сельскохозяйственной техники, а также его среднего значения.

*Результаты исследования.* На основании анализа показателей технического состояния высвобождаемых изделий установлено, что для создания концептуальной модели утилизируемости сельскохозяйственной техники предпочтительно использовать четыре основные группы показателей: техническое состояние, материалоемкость, технологичность и безопасность комплектующих. Предложенная группа определяет возможность проведения утилизации объекта, придавая ему общее свойство утилизируемости. Приведены результаты исследований влияния показателей сложности конструкций и технического исполнения, состояния и номенклатурно-количественного состава сельскохозяйственной техники на показатель ее утилизируемости.

*Обсуждение и заключение.* По результатам исследований разработана концептуальная физическая модель утилизируемости сельскохозяйственной техники, позволяющая планировать мероприятия по утилизации различных видов сельскохозяйственной

© Кравченко И. Н., Мигачев Ю. С., Кузнецов Ю. А., Давыдкин А. М., Ерофеев М. Н., 2020



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

венной техники при проведении сопоставительного анализа всего номенклатурного состава с наибольшей эффективностью. Принятые ограничения позволяют проводить оценку технического состояния и утилизируемости сельскохозяйственной техники с использованием концептуальной физической модели утилизируемости. Установлены закономерности между временем хранения, сложностью технического исполнения, материалоемкостью, количественным составом (объемом утилизации) и показателем утилизируемости сельскохозяйственной техники.

**Ключевые слова:** физическая модель утилизируемости, номенклатурно-количественный состав, конструктивные особенности сельскохозяйственной техники, фактическое состояние, показатель утилизируемости

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

**Для цитирования:** Исследование влияния сложности технического исполнения и номенклатурно-количественного состава сельскохозяйственной техники на показатель ее утилизируемости / И. Н. Кравченко, Ю. С. Мигачев, Ю. А. Кузнецов [и др.]. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202004.683-698 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 683–698.

Original article

## Studying the Influence of the Technical Performance Complexity and the Nomenclature and Quantitative Composition of Agricultural Machinery on Its Recyclability Rate

I. N. Kravchenko<sup>a</sup>, Y. S. Migachev<sup>b</sup>, Yu. A. Kuznetsov<sup>c</sup>,  
A. M. Davydkin<sup>d\*</sup>, M. N. Erofeev<sup>e</sup>

<sup>a</sup>Russian Timiryazev State Agrarian University  
(Moscow, Russian Federation)

<sup>b</sup>Military Academy of Radiation, Chemical and Biological Defense  
named after Marshal of the Soviet Union S. K. Timoshenko  
(Kostroma, Russian Federation)

<sup>c</sup>Orel State Agrarian University (Orel, Russian Federation)

<sup>d</sup>National Research Mordovia State University  
(Saransk, Russian Federation)

<sup>e</sup>Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy  
of Sciences (Moscow, Russian Federation)

\*aldavydkin@yandex.ru

**Introduction.** Rational recycling of agricultural machinery, which has reached the end of its service life, is an urgent problem of the modern agro-industrial complex. In this regard, using the physical model for recycling agricultural machinery, reached its service life, is a solution to the problem of resource recycling.

**Materials and Methods.** The paired linear regression analysis method was used to conduct statistical research of experimental data and develop a regression model. The authors calculated the recyclability rate values for the entire agricultural machinery nomenclature and its average value through using regression equation.

**Results.** Based on the analysis of indicators for technical condition of being recycled products, it was established that for developing a conceptual model of agricultural machinery recycling, it is preferable to use four main groups of indicators: technical condition, material capacity, manufacturability, and safety of components. The proposed group of indicators determines the possibility of recycling the machinery units. The results of researching the influence of indicators of design complexity, technical performance, condition, nomenclature and quantitative composition of agricultural machinery on the recyclability are presented.

*Discussion and Conclusion.* According to the research results, a conceptual physical model for recyclability of agricultural machinery was developed that allows planning more effectively measures for recycling various types of agricultural machinery when conducting a comparative analysis of the entire nomenclature composition. The adopted restrictions allow estimating the technical condition and recyclability of agricultural machinery using the conceptual physical model of recyclability. The relationships between the storage time, complexity of technical performance, material capacity, quantitative composition (volume of recycling) and recyclability rate of agricultural machinery are revealed.

**Keywords:** physical model of recyclability, nomenclature and quantitative composition, design features of agricultural machinery, actual condition, recyclability rate

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

**For citation:** Kravchenko I.N., Migachev Y.S., Kuznetsov Yu.A., et al. Studying the Influence of the Technical Performance Complexity and the Nomenclature and Quantitative Composition of Agricultural Machinery on Its Recyclability Rate. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(4):683-698. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.683-698>

## Введение

Высокие темпы механизации производственных процессов в агропромышленном комплексе определяют необходимость многократного использования ресурсов, входящих в состав сельскохозяйственной техники и технологического оборудования<sup>1</sup> [1; 2].

Утилизация сельскохозяйственной техники, завершившей свой жизненный цикл, является составной частью проблемы рационального использования ресурсов, вовлекаемых в процессы производства и потребления. В этой связи для решения проблемы вторичного использования ресурса отработавшей техники предлагается использовать физическую модель, позволяющую реализовать алгоритм утилизации сельскохозяйственной техники<sup>2</sup> [3; 4].

## Обзор литературы

Анализ и обобщение результатов исследований по определению степени влияния на общий показатель утилизируемости продемонстрировал, что техническое состояние сельскохозяйственной техники является определяющим при оценке утилизируемости [5; 6]. Следовательно, возникает необходи-

мость определения факторов, влияющих на техническое состояние техники с целью эффективного проведения процесса утилизации.

Изменение технического состояния сельскохозяйственной техники происходит под влиянием тех же факторов, которые сопровождали ее на этапе эксплуатации и хранения. Усиление влияния факторов, появляющихся при старении изделия, обусловлено изменением (ухудшением) условий хранения списанных средств и оказывает существенное влияние на сохраняемость технических и физико-химических свойств материалов.

Факторы, влияющие на общее техническое состояние изделий, можно условно разделить на две группы: объективные и субъективные.

К объективным факторам относятся различные неблагоприятные для изделий условия внешней среды, связанные с климатическими, метеорологическими, биологическими, механическими и другими воздействиями.

Субъективные факторы зависят от деятельности человека. К ним относятся мероприятия, связанные с обеспечением нормальных условий проведения

<sup>1</sup> Утилизация техники в системе АПК / Н. В. Алдошин [и др.]. М.: Триада, 2014. 222 с.

<sup>2</sup> Утилизация сельскохозяйственной техники: проблемы и решения / С. А. Соловьев [и др.]. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2015. 172 с.

разукомплектации и утилизации, а также решений, направленных на сохранение полезных свойств и характеристик образцов в процессе подготовки и проведения утилизации.

Результаты ранее проведенных исследований показывают, что в большинстве случаев на утилизируемость сельскохозяйственной техники, находящейся в течение продолжительного периода на хранении, оказывают влияние процессы старения, коррозии и другие факторы, проявляющиеся со временем [7–10]. При этом скорость протекания этих процессов существенно зависит от качества применяемых материалов, конструкции, технологии изготовления, условий эксплуатации, применяемых методов и средств противокоррозионной защиты.

Причиной старения являются сложные физико-химические процессы, происходящие в элементах конструкции, веществ и материалов. К ним относятся структурные изменения в диэлектриках, химические превращения в связывающих и пропиточных материалах, нарушение электрической и механической прочности материалов и элементов конструкции, нарушение герметизации, повышение водопроницаемости материалов и т. д.

Ввиду того, что основную долю конструктивных материалов, используемых при изготовлении машин, составляют различные металлы и их сплавы, наибольшее отрицательное влияние на сохраняемость физико-химических свойств и характеристик сельскохозяйственной техники оказывает коррозия (самопроизвольное разрушение металлов вследствие химического и электрохимического взаимодействия их с коррозионной средой). К коррозионным процессам относятся процессы, связанные с появлением на поверхности металлов продуктов коррозии или окисных пленок под воздействием влажности или агрессивных компонентов внешней среды.

Анализ данных ряда научных исследований показывает, что наибольшее влияние на уровень сохраняемости технических характеристик оказывают температура воздуха, влажность, солнечная радиация и коррозионно-активные агенты [11; 12].

Среди технологичных (эксплуатационных) факторов, оказывающих существенное влияние на способность изделия к переработке, можно выделить время проведения утилизации после списания образца. Данный фактор влияет на продолжительность проведения разукомплектации при подготовке к проведению утилизации, а также на сохранение показателя материалоемкости изделия. Изменение технического и качественного состояния изделий приводит к снижению уровня утилизируемости, который может быть оценен с использованием таких показателей, как продолжительность разборки и изменение материалоемкости изделий.

При утилизации изделий в течение первых пяти лет после списания наблюдается резкое увеличение времени разборки образцов по причине прогрессирующих процессов старения отдельных деталей (коррозия, изменение механических свойств) в результате изменившихся условий хранения [13–15]. Показатель утилизируемости образцов резко уменьшается со временем, что обусловлено изменением и ухудшением полезных свойств изделий из пластмассы, резины, дерева, кожи и материалов на текстильной и бумажной основе. В дальнейшем время разборки несколько стабилизируется, однако с сохранением тенденции, направленной на дальнейшее увеличение.

Обобщение опытных данных по оценке степени утилизируемости сельскохозяйственной техники, находящейся на хранении от влияния климатических и биологических факторов показывает, что среднее время разборки образцов увеличивается в 1,4–2,6 раза [16–18].

### Материалы и методы

С использованием метода парного линейного регрессионного анализа проведены исследования зависимостей влияния основных показателей  $K_M$ ,  $K_T$  и  $K_{TC}$  на комплексный показатель утилизируемости.

В качестве функции отклика использовался показатель утилизируемости сельскохозяйственной техники  $F_y$ . В качестве исследуемых факторов выбраны групповые показатели  $K_M$ ,  $K_T$  и  $K_{TC}$ .

Интервалы варьирования факторов, а также расчетные значения показателя утилизируемости по номенклатурному составу сельскохозяйственной техники приведены в таблице 1.

Характер установленной зависимости описывается регрессионным уравнением вида:

$$F_y = 0,441 + 0,174K_{TC} + 0,021K_M - 0,173K_T - 0,091K_B. \quad (1)$$

С использованием регрессионного уравнения (1) проведен расчет значений показателя утилизируемости по всему номенклатурному составу сельскохозяйственной техники, а также его среднего значения, составившего 0,464 отн. ед.

Экспериментальные данные показателя утилизируемости  $F_{yi}$ , результаты расчетов по регрессионному уравнению  $P_{yi}^p$ , значения групповых показателей утилизируемости, а также среднее квадратическое отклонение экспериментальных данных от расчетных  $S_y$  представлены в таблице 2.

Адекватность расчетных значений экспериментальным данным подтвер-

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

#### Расчетные значения показателя утилизируемости по номенклатурному составу сельскохозяйственной техники

#### Calculated values of the utilization index for the nomenclature composition of agricultural machinery

Номенклатурный состав техники / Nomenclature of equipment	Значения групповых показателей и интервалы их варьирования, отн. ед. / Values of group indicators and intervals of their variation, relative unit							
	$K_T$		$K_M$		$K_B$		$K_{TC}$	
	min	max	min	max	min	max	min	max
Сельскохозяйственная техника / Agricultural machinery	0,66	0,99	0,01	0,33	0,01	0,33	0,66	0,99

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

#### Экспериментальные и расчетные значения показателей утилизируемости

#### Experimental and calculated utilization values

Номенклатурный состав техники / Nomenclature of equipment	Экспериментальные значения групповых показателей, отн. ед. / The experimental values of the group indicators, relative unit				$F_{yi}$ , отн. ед. / $F_{yi}$ , relative unit	$P_{yi}^p$ , отн. ед. / $P_{yi}^p$ , relative unit	$S_y$ , отн. ед. / $S_y$ , relative unit
	$K_T$	$K_M$	$K_B$	$K_{TC}$			
Сельскохозяйственная техника / Agricultural machinery	0,35	0,62	0,15	0,95	0,560	0,546	0,0208

ждена натурными испытаниями. Общий объем отходов после проведения утилизации сельскохозяйственной техники составил  $48,4 \pm 5 \%$ .

Анализ экспериментальных данных показал, что полученное уравнение адекватно (с доверительной вероятностью 0,95 и  $F_T = 3,38$ ,  $F_p = 383,9$ ) описывает характер зависимости в выбранных интервалах исследованных факторов. При этом установлено, что в качестве показателей, в большей степени определяющих способность машин к утилизации, нужно выделить  $K_{TC}$  и  $K_T$ . При увеличении  $K_{TC}$  и  $K_M$  показатель утилизируемости возрастает.

Показатели  $K_M$  и  $K_B$  в меньшей степени будут влиять на комплексный показатель утилизируемости. При увеличении  $K_B$  и  $K_T$  комплексный показатель утилизируемости будет уменьшаться.

На основании проведенных исследований закономерностей влияния технического состояния, технологичности конструктивных особенностей, материалоемкости машин и безопасности ком-

плекующих на общий показатель утилизируемости сельскохозяйственной техники установлено, что в зависимости от выбранного направления утилизации, номенклатурно-количественного состава машин, а также их технического состояния доля утилизируемой техники может изменяться в пределах от 34 до 99 %.

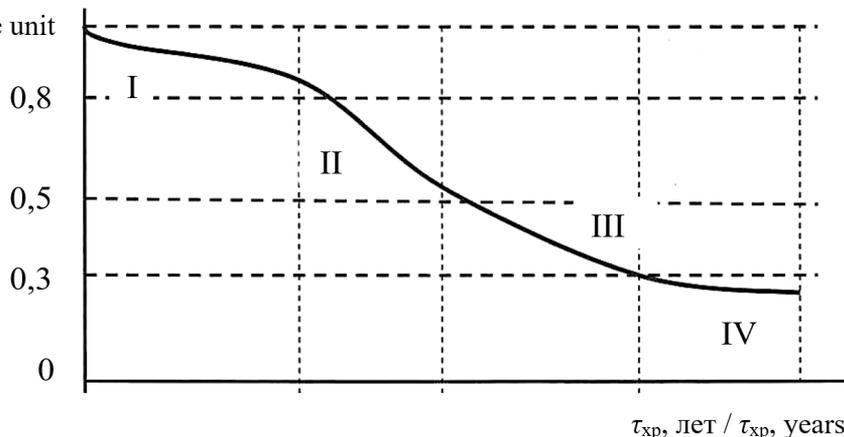
Полученные экспериментальные данные с использованием комплексного показателя утилизируемости и методики его применения использованы при обосновании предложений по номенклатуре и объемам сельскохозяйственной техники.

Между временем хранения подлежащей утилизации сельскохозяйственной техники и показателем утилизируемости существуют закономерные связи. Изменение показателя утилизируемости  $F_y$  в зависимости от срока хранения после списания  $\tau_{xp}$  показано на рисунке 1.

В результате длительной эксплуатации или продолжительного хранения

$F_y$ , отн. ед. /

$F_y$ , relative unit



Р и с. 1. Зависимость показателя утилизируемости от времени хранения подлежащей утилизации сельскохозяйственной техники: I – этап эксплуатации и хранения; II – этап эффективной утилизации; III – этап остаточной утилизации; IV – этап образования отходов

F i g. 1. Dependence of the recyclability rate on the storage time of agricultural machinery to be recycled: I – stage of operation and storage; II – stage of effective disposal; III – stage of residual disposal; IV – stage of waste generation

изделий в течение первого периода со временем происходит изменение технических характеристик. Это объясняется необратимыми изменениями параметров элементов, что в конечном итоге приводит к предельным срокам эксплуатации и хранения и далее к списанию образца. Данный период характеризуется изменением параметров утилизируемости изделий и веществ с 1,0 до 0,8 отн. ед. и  $\tau_{\text{кр}}$ , являющегося назначенным временем эксплуатации или хранения.

На данном этапе проводят утилизацию по направлениям: разуконплектацни техники и использования составных частей для сборки нового образца (комплектующих); замены, ремонта некондиционных комплектующих на исправные и отправки образца на дальнейшее хранение или эксплуатацию; использования образца по новому назначению после проведения доработки или переоснащения.

После списания сельскохозяйственной техники наступает второй период (период эффективной утилизации), характеризуемый значительным возрастанием процессов старения элементов и резким уменьшением параметров показателя утилизируемости со временем. Данный период характеризуется изменением параметров показателя утилизируемости изделий и веществ с 0,8 до 0,5 отн. ед. и  $\tau_{\text{эу}}$ , являющегося временем проведения эффективной утилизации сельскохозяйственной техники. На этом этапе проводят переработку компонентов и материалов с получением изделий и материалов для дальнейшего использования [19; 20].

Если на втором этапе утилизация техники произведена не была, наступает третий период остаточной утилизации, характеризуемый дальнейшим старением образцов. Данный период обладает показателем утилизируемости с параметрами от 0,5 до 0,3 отн. ед.

Если на третьем этапе утилизация сельскохозяйственной техники произ-

ведена не была, наступает четвертый период, характеризуемый дальнейшим старением образцов и превращением их в неликвидные отходы, подлежащие уничтожению. Данный период имеет показатель утилизируемости с параметрами от 0,3 и ниже и время образования неликвидных отходов.

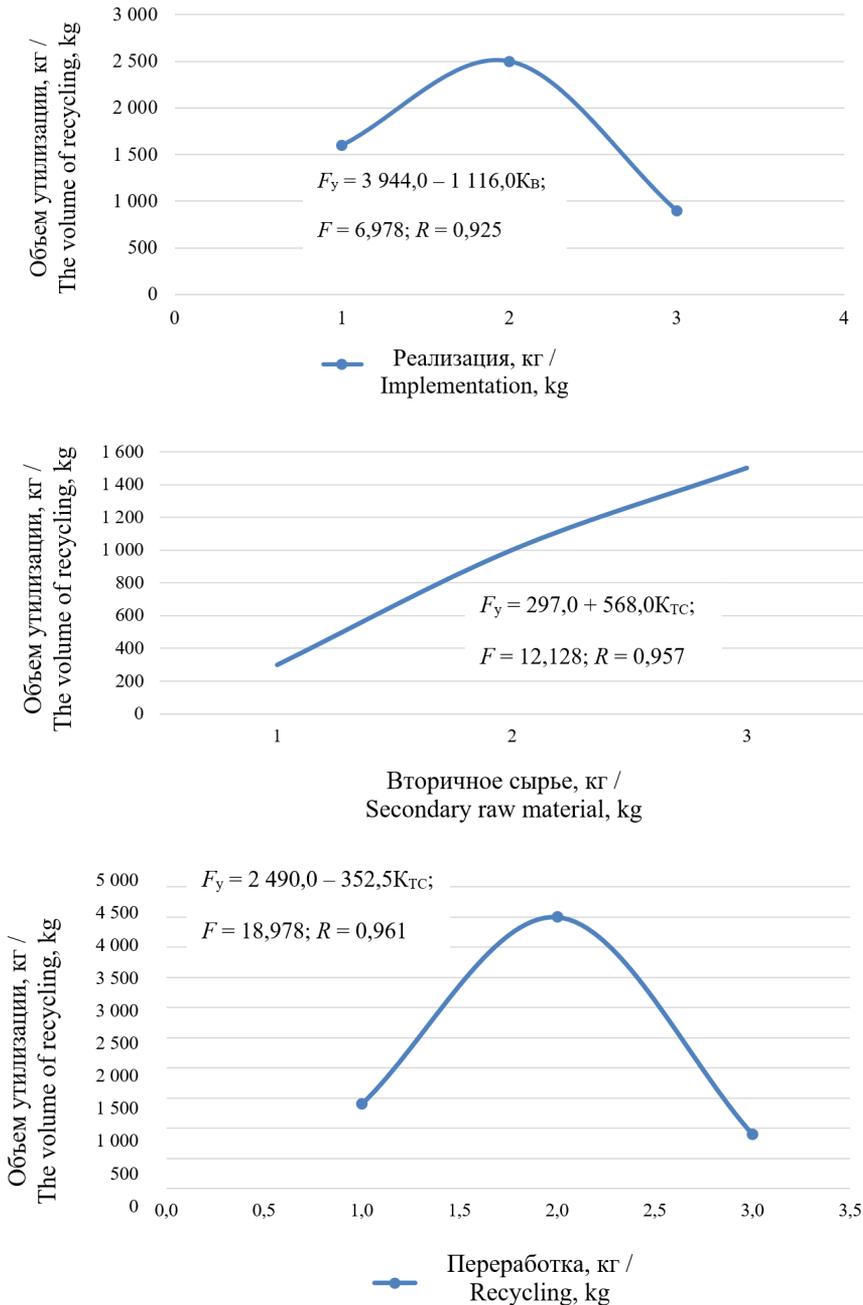
Указанная модель показывает, что эффективно планировать и проводить работы по утилизации целесообразно в первые два периода, характеризующиеся более высоким уровнем сохраняемости полезных свойств изделий, а соответственно, и показателя утилизируемости (рис. 1).

### Результаты исследования

Проведенные исследования показали, что комплексное влияние климатических и эксплуатационных факторов на физическую природу процесса утилизируемости сельскохозяйственной техники сложно и разнообразно и определяется особенностью ее номенклатурного и количественного состава. Анализ номенклатурно-количественного состава сельскохозяйственной техники для проведения утилизации по выбранным направлениям показывает, что как объекты утилизации их можно разделить на следующие условные классы: объекты высокой сложности с преобладанием слесарно-механических, электротехнических и монтажных работ; объекты, характеризующиеся средней сложностью разуконплектацни как специального оборудования, так и базового шасси; объекты низкой сложности, характеризующиеся незначительным объемом работ по разуконплектацни и утилизации.

Между показателем утилизируемости и показателем сложности технического исполнения при проведении утилизации на разных этапах ее осуществления определены закономерные связи, представленные на рисунке 2.

Показатель материалоемкости и массовости объектов характеризуется количеством сельскохозяйственной техники.



Р и с. 2. Зависимости показателя утилизируемости от технического состояния сельскохозяйственной техники  $K_{ТС}$  и соответствующие им значения коэффициента корреляции  $R$  и критерия Фишера  $F$

F i g. 2. Dependences of the recyclability rate on the technical condition of agricultural machinery  $K_{ТС}$  and the corresponding values of the correlation coefficient  $R$  and the Fisher criterion  $F$

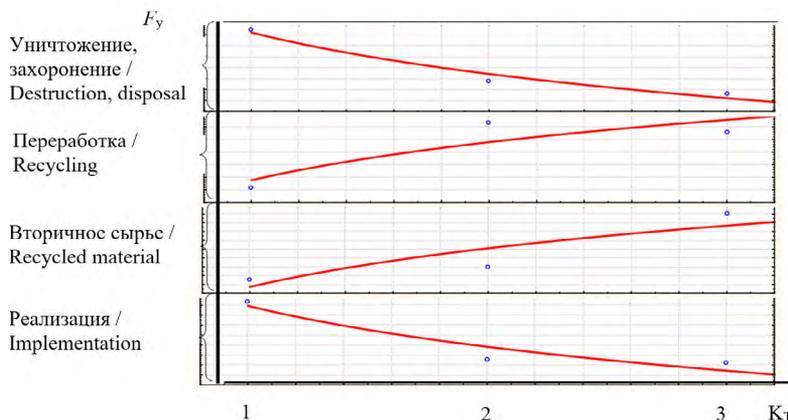
Материалоемкость образцов складывается из номенклатурно-количественного состава изделий и их весовых характеристик. Анализ состава высвобождаемых для проведения утилизации образцов показывает, что как объекты утилизации их можно разделить на следующие условные классы:

– средства с объемом утилизации от 1 до 5 тыс. т;

– средства с объемом утилизации от 5 до 10 тыс. т;

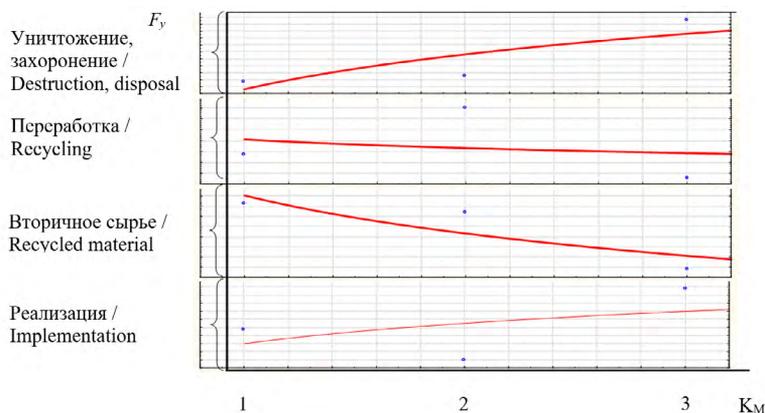
– средства с объемом утилизации от 10 тыс. т и выше.

На разных этапах осуществления утилизации между показателем утилизируемости и показателем материалоемкости существуют закономерные связи, представленные на рисунках 3 и 4.



Р и с. 3. Зависимость показателя утилизируемости от сложности технического исполнения сельскохозяйственной техники  $K_T$ : 1 – объекты низкой сложности; 2 – объекты средней сложности; 3 – объекты высокой сложности

Fig. 3. Dependence of the recyclability rate on the complexity of the technical performance of agricultural machinery  $K_T$ : 1 – objects of low complexity; 2 – objects of medium complexity; 3 – objects of high complexity



Р и с. 4. Зависимость показателя утилизируемости от материалоемкости и количественного состава (объема утилизации) сельскохозяйственной техники  $K_M$ : 1 – низкий объем; 2 – средней объем; 3 – большой объем утилизации

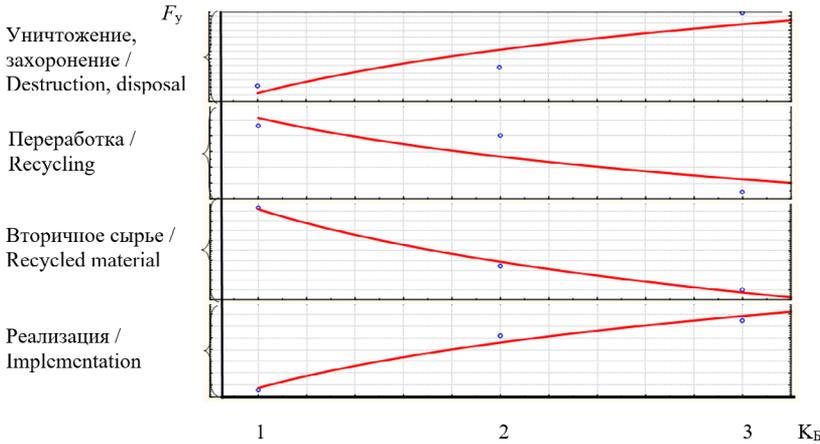
Fig. 4. Dependence of the recyclability rate on the material consumption and quantitative composition (volume of utilization) of agricultural machinery  $K_M$ : 1 – low volume; 2 – medium volume; 3 – large volume of recycling

Анализ данных по характеру и трудоемкости работ показал, что утилизация сельскохозяйственной техники требует наибольших затрат времени, финансовых, людских и материальных ресурсов.

Между показателем утилизируемости и показателем безопасности материалов  $K_B$  существуют зависимости, представленные на рисунке 5.

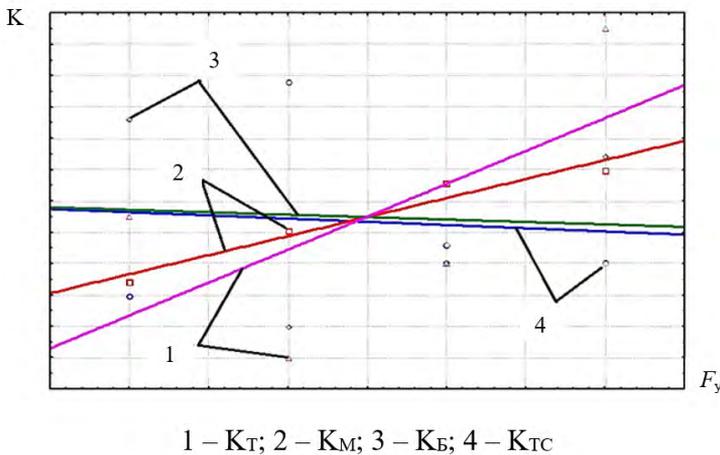
В целом совокупность утилизируемой сельскохозяйственной техники имеет сложную структуру по всем показателям, характеризующим образцы как объекты воздействия системы утилизации (рис. 6).

По схеме полного факторного эксперимента проведены исследования закономерностей влияния основных показателей  $K_M$ ,  $K_B$ ,  $K_T$  и  $K_{TC}$  на комплексный



Р и с. 5. Зависимость показателя утилизируемости от показателя безопасности материалов  $K_B$ :  
1 – малоопасные; 2 – умеренно опасные; 3 – опасные

F i g. 5. Dependence of the recyclability rate on the safety index of materials  $K_B$ :  
1 – low-risk; 2 – moderately dangerous; 3 – dangerous



Р и с. 6. Зависимость комплексного показателя утилизируемости от групповых показателей  $K$   
F i g. 6. Dependence of the complex recyclability rate on group indexes  $K$

показатель утилизируемости  $F_y$ . Матрица исходных данных определения объемов утилизации сельскохозяйственной техники по выбранным направлениям и показателям в обобщенном виде представлены в таблице 3.

Установлено, что в качестве показателей, в большей степени определяющих способность техники к утилизации, являются  $K_{TC}$  и  $K_M$ , которые имеют прямо пропорциональный характер зависимости.

Показатели  $K_B$  и  $K_T$  в меньшей степени будут влиять на комплексный показатель утилизируемости. Данная зависимость имеет обратный пропорциональный характер, то есть при увеличении  $K_B$  и  $K_T$  комплексный показатель утилизируемости будет уменьшаться.

Проведенные исследования закономерностей влияния технического состояния образцов, технологичности конструктивных особенностей, материалоемкости и безопасности комплектующих на общий показатель утилизируемости сельскохозяйственной техники позволили установить, что в зависимо-

сти от выбранного направления утилизации и номенклатурно-количественного состава доля утилизируемых образцов может изменяться в пределах от 63 до 78 %. Кроме того, показано, что влияние технического состояния образцов и материалоемкости отработавшей техники на общий показатель утилизируемости носит прямолинейный прямо пропорциональный характер зависимости. Напротив, показатели технологичности конструктивных особенностей и безопасности комплектующих влияют на показатель утилизируемости в меньшей степени и носят прямолинейный обратный пропорциональный характер.

Полученные экспериментальные данные с использованием комплексного показателя утилизируемости и методики применения использованы при обосновании предложений по номенклатуре и объемам высвобождаемого имущества.

#### Обсуждение и заключение

Разработан научно-методический аппарат обеспечения утилизации сельскохозяйственной техники, включающий в себя поэтапное решение задач

Т а б л и ц а 3

T a b l e 3

#### Матрица исходных данных определения объемов утилизации сельскохозяйственной техники по выбранным направлениям и показателям

#### Matrix of initial data for determining the volume of recycling agricultural machinery in the selected areas and indicators

Показатель / Index	Объем утилизации в зависимости от направления использования утилизируемой техники, % / Volume of recycling depending on the direction of use of the recycled equipment, %			
	Реализация / Implementation	Использование как вторресурса / Use as secondary resources	Переработка с получением продуктов / Recycling for manufacturing produce products	Образование отходов / Waste generation
Техническое состояние, $K_{TC}$ / Technical condition, $K_{TC}$	25,0	16,0	22,0	37,0
Материалоемкость, $K_M$ / Materials consumption, $K_M$	20,8	24,1	27,1	27,9
Техническое исполнение, $K_T$ / Technical performance, $K_T$	19,9	33,6	23,2	22,0
Безопасности, $K_B$ / Safety, $K_B$	31,2	17,9	22,0	28,8

определения исходных данных, обоснования требований и способов утилизации, формирования управленческих решений в направлении их использования с применением новых методик оценки номенклатуры, объемов и сроков утилизации, технического состояния и категорирования, а также проведения технико-экономической оценки утилизации изделий.

Предложены категории подлежащей утилизации сельскохозяйственной техники по величине изменения нормативного значения контролируемого показателя технического состояния, позволяющего обоснованно определять приоритетные варианты утилизации машин с учетом требований к продуктам утилизации по трем категориям (реализация, промышленная переработка, использование в качестве вторичного сырья), соответствующим направлениям утилизации.

Разработан метод экспертно-аналитической оценки утилизируемости сельскохозяйственной техники, основанный на использовании обобщенного показателя утилизируемости, и определены параметры данного показателя, позволяющего решать задачу управления и определения уровня качества сельскохозяйственной техники.

Существенный вклад в снижение показателя утилизируемости вносит показатель сложности технического исполнения образцов, влияние которого обусловлено трудоемкостью работ, связанных с проведением разбраковки изделий. Увеличение доли комплектующих, входящих в состав изделий сельскохозяйственной техники, приводит к уменьшению показателя утилизируемости и обусловлено необходимостью создания дополнительных мер безопасности при проведении работ.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Герасимов, В. С. Утилизация как механизм обновления машинно-тракторного парка АПК России / В. С. Герасимов, Р. Ю. Соловьев, В. И. Игнатов // Труды ГОСНИТИ. – 2014. – Т. 115. – С. 19–24. – URL: <https://docplayer.ru/46913729-Utilizaciya-kak-mehanizm-obnovleniya-mashinno-traktornogo-parka-apk-rossii.html> (дата обращения: 05.11.2020). – Рез. англ.
2. Герасимов, В. С. Обоснование необходимости разработки системы утилизации сельскохозяйственной и лесной техники / В. С. Герасимов, Р. Ю. Соловьев, В. И. Игнатов // Лесной вестник. – 2014. – № 2 (101). – С. 28–34. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-neobhodimosti-razrabotki-sistemy-utilizatsii-selskohozyaystvennoy-i-lesnoy-tehniki/viewer> (дата обращения: 05.11.2020).
3. Герасимов, В. С. Основные направления и перспективы развития системы утилизации сельскохозяйственной техники / В. С. Герасимов, С. А. Соловьев // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т. 121. – С. 69–75. – Рез. англ.
4. Герасимов, В. С. Исследование условий и возможностей формирования системы утилизации сельскохозяйственной техники на примере предприятий АПК Краснодарского края / В. С. Герасимов, А. Г. Черноиванов, Р. Ю. Соловьев // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т. 121. – С. 61–68. – Рез. англ.
5. Методика определения величины утилизационного сбора для выведенной из эксплуатации самоходной техники / В. И. Игнатов, А. С. Дорохов, В. С. Герасимов, В. А. Денисов. – DOI 10.15507/2658-4123.029.201901.124-139 // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 1. – С. 124–139. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/80-19-1/687-10-15507-0236-2910-029-201901-9> (дата обращения: 05.11.2020). – Рез. англ.
6. Игнатов, В. И. Утилизация и ремонт техники как элементы циркулярной экономики / В. И. Игнатов, В. С. Герасимов, М. С. Мордасова. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202001.021-042 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 21–42. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/88-20-1/751-10-15507-0236-2910-030-202001-2> (дата обращения: 05.11.2020). – Рез. англ.

7. Разработка интегрированной системы контроля качества технических изделий, вооружения и военной техники на этапах хранения и утилизации / И. Н. Кравченко, Ю. С. Мигачев, В. В. Кочуров, И. В. Лучин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2012. – № 7. – С. 25–30. – URL: [http://www.nait.ru/journals/number.php?p\\_number\\_id=1669](http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=1669) (дата обращения: 05.11.2020). – Рез. англ.

8. **Игнатов, В. И.** Использование цифровых технологий при утилизации сельскохозяйственной техники / В. И. Игнатов, В. С. Герасимов, Д. В. Андреева // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2020. – № 6. – С. 49–58. – Рез. англ.

9. **Герасимов, В. С.** Создание вторичного рынка подержанной сельскохозяйственной техники в агропромышленном комплексе Российской Федерации / В. С. Герасимов // Труды ГОСНИТИ. – 2013. – Т. 113. – С. 33–43. URL: <http://www.gosniti.com/publish1.html> (дата обращения: 05.11.2020). – Рез. англ.

10. **Алдошин, Н. В.** Контроль качества изделий выбывшей из эксплуатации техники / Н. В. Алдошин // Техника в сельском хозяйстве. – 2010. – № 4. – С. 30–33. – Рез. англ.

11. Структура автоматизированной системы формирования базы данных для эффективного управления процессами утилизации транспортных машин / И. Н. Кравченко, Н. В. Алдошин, Ю. А. Лесконог, Ю. А. Шамарин // Техника и оборудование для села. – 2017. – № 2 (236). – С. 34–39. – URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/download/56-arkhiv-zhurnala-za-2017/439-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-fevral-2-236-2017-g> (дата обращения: 05.11.2020). – Рез. англ.

12. Техника как особый вид отходов в системе утилизации машин / С. А. Соловьев, В. С. Герасимов, В. И. Игнатов, С. А. Буряков // Техника и оборудование для села. – 2016. – № 6. – С. 2–5. – URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/download/57-arkhiv-zhurnala-za-2016/431-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-6-228-iyun-2016-g> (дата обращения: 05.11.2020). – Рез. англ.

13. **Кравченко, И. Н.** Методика обоснования системы показателей утилизируемости технических средств сельскохозяйственного производства / И. Н. Кравченко, Н. В. Алдошин, Ю. А. Лесконог [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2017. – № 3 (237). – С. 32–36. – URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/download/56-arkhiv-zhurnala-za-2017/440-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-mart-3-237-2017-g> (дата обращения: 05.11.2020). – Рез. англ.

14. Методика оценки параметров и финансовых потоков в системе утилизации сельскохозяйственной техники и оборудования / В. С. Герасимов, Р. Ю. Соловьев, Ю. В. Трофименко, В. И. Игнатов // Техника и оборудование для села. – 2014. – № 8. – С. 37–40. – URL: <https://elib.pstu.ru/vufind/EdsRecord/edselr,edselr.21836508> (дата обращения: 05.11.2020). – Рез. англ.

15. Моделирование процессов формирования системы утилизации, выведенной из эксплуатации сельскохозяйственной техники / И. Н. Кравченко, Ю. А. Кузнецов, Ю. А. Лесконог [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2017. – № 9 (243). – С. 39–44. – URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/download/56-arkhiv-zhurnala-za-2017/446-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-sentyabr-9-243-2017-g> (дата обращения: 05.11.2020). – Рез. англ.

16. Recycling Technologies of Nickel-Metal Hydride Batteries: An LCA Based Analysis / L. Silvestri, A. Forcina, G. Arcese, G. Bella. – DOI 10.1016/j.jclepro.2020.123083 // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 273. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620331280?via%3Dihub> (дата обращения: 05.11.2020).

17. Modelling the Generation of Household Auto-mo-Biles in the Context Scrap of Urban-Rural Disparity: A Case Study of Nanjing, China / L. Zhang, W. Yuan, J. Songyan [et al.]. – DOI 10.1016/j.jclepro.2020.122237 // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 268. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620322848?via%3Dihub> (дата обращения: 05.11.2020).

18. **Jafari, M.** A Facile Chemical-Free Cathode Powder Separation Method for Lithium Ion Battery Resource Recovery / M. Jafari, M. M. Torabian, A. Bazargan. – DOI 10.1016/j.est.2020.101564 // Journal of Energy Storage. – 2020. – Vol. 31. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X19318316?via%3Dihub> (дата обращения: 05.11.2020).

19. **Dobrotă, D.** Improvement of Waste Tyre Recycling Technology Based on a New Tyre Markings / D. Dobrotă, G. Dobrotă, T. Dobrescu. – DOI 10.1016/j.jclepro.2020.121141 // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 260. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620311884?via%3Dihub> (дата обращения: 05.11.2020).

20. Novel Approach for Clean Utilization of Complex Low-Grade Metal Resources Using Silicon as Metal Getter / Y. Lei, P. Qiu, W. Ma, Ch. Wang. – DOI 10.1016/j.jclepro.2020.121063 // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 260. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620311100?via%3Dihub> (дата обращения: 05.11.2020).

*Поступила 03.06.2020; принята к публикации 10.07.2020; опубликована онлайн 30.12.2020*

*Об авторах:*

**Кравченко Игорь Николаевич**, профессор кафедры технического сервиса машин и оборудования ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), доктор технических наук, Researcher ID: B-9463-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>, [kravchenko-in71@yandex.ru](mailto:kravchenko-in71@yandex.ru)

**Мигачев Юрий Сергеевич**, начальник кафедры средств защиты от оружия массового поражения ФГКВУ ВО «Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С. К. Тимошенко» (156015, Российская Федерация, г. Кострома, ул. Горького, д. 16), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9424-9875>, [migatchov\\_yri@mail.ru](mailto:migatchov_yri@mail.ru)

**Кузнецов Юрий Алексеевич**, профессор кафедры надежности и ремонта машин ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н. В. Парахина» (302019, Российская Федерация, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3699-8231>, [kentury@yandex.ru](mailto:kentury@yandex.ru)

**Давыдкин Александр Михайлович**, 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: S-8297-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2984-2362>, [aldavydkin@yandex.ru](mailto:aldavydkin@yandex.ru)

**Ерофеев Михаил Николаевич**, заместитель директора по научной работе ФГБУН «Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук» (101990, Российская Федерация, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4), доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1048-3574>, [erofeff2007@yandex.ru](mailto:erofeff2007@yandex.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

И. Н. Кравченко – научное руководство, формулирование основной концепции исследования и выводов; Ю. С. Мигачев – проведение исследований и подготовка начального варианта текста; Ю. А. Кузнецов – проведение критического анализа исследований, анализ и доработка текста; А. М. Давыдкин – анализ и построение графических зависимостей; М. Н. Ерофеев – подготовка и первичный анализ литературных данных, редактирование текста.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Gerasimov V.S., Soloviev R.Yu., Ignatov V.I. Recycling as a Mechanism to Update the Machine-Tractor Fleet of the Russian Agroindustrial Complex. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2014; 115:19-24. Available at: <https://docplayer.ru/46913729-Utilizaciya-kak-mehanizm-obnovleniya-mashinno-traktornogo-parka-apk-rossii.html> (accessed 05.11.2020). (In Russ.)

2. Gerasimov V.S., Solovev R.Yu., Ignatov V.I. [Justification of the Need to Develop a System for Recycling Agricultural and Forestry Equipment]. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*. 2014; (2):28-34.

Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-neobhodimosti-razrabotki-sistemy-utilizatsii-selskokozyaystvennoy-i-lesnoy-tehniki/viewer> (accessed 05.11.2020). (In Russ.)

3. Gerasimov V.S., Soloviev S.A. The Main Directions and Prospects of Development of System of Recycling of Agricultural Machinery. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2015; 121:69-75. (In Russ.)

4. Gerasimov V.S., Chernovanov A.G., Solovyev R.Yu. Researching the Conditions for the Possibility of the Formation of a System of Utilisation for Agricultural Equipment Based on AIC Enterprises of the Krasnodar Region. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2015; 121:61-68. (In Russ.)

5. Ignatov V.I., Dorokhov A.S., Gerasimov V.S., et al. The Principles for Determining Recycling Fee on Decommissioned Equipment. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems*. 2019; 29(1):124-139. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.124-139>

6. Ignatov V.I., Gerasimov V.S., Mordasova M.S. Disposal and Repair of Equipment as Circular Economy Elements. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems*. 2020; 30(1):21-42. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.021-042>

7. Kravchenko I.N., Migachyov Yu.S., Kochurov V.V., et al. Development of Integrated Quality Control System of Technical Products, Armament and Military Equipment at Stages of Storage and Utilization. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya = Repair. Restoration. Modernization*. 2012; (7):25-30. Available at: [http://www.nait.ru/journals/number.php?p\\_number\\_id=1669](http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=1669) (accessed 05.11.2020). (In Russ.)

8. Ignatov V.I., Gerasimov V.S., Andreeva D.V. Use of Digital Technology in Agricultural Machinery Recycling. *Selskokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont = Agricultural Machinery: Maintenance and Repair*. 2020; (6):49-58. (In Russ.)

9. Gerasimov V.S. Creating a Secondary Market of Used Agricultural Machinery in the Agricultural Complex of the Russian Federation. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2013; 113:33-43. Available at: <http://www.gosniti.com/publish1.html> (accessed 05.11.2020). (In Russ.)

10. Aldoshin N.V. Control of Quality of Products from Coming Out of Use Technique. *Tekhnika v sel'skom hozyaystve = Machinery in Agriculture*. 2010; (4):30-33. (In Russ.)

11. Kravchenko I.N., Aldoshin N.V., Leskonog Yu.A., et al. Structure of Automated System of Database Generation for Efficient Management of Vehicle Disposal. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area*. 2017; (2):34-39. Available at: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/download/56-arkhiv-zhurnala-za-2017/439-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-fevral-2-236-2017-g> (accessed 05.11.2020). (In Russ.)

12. Solovyov S.A., Gerasimov V.S., Ignatov V.I., et al. Machinery as Special Kind of Waste Products in Recycling of Machines. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area*. 2016; (6):2-5. Available at: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/download/57-arkhiv-zhurnala-za-2016/431-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-6-228-iyun-2016-g> (accessed 05.11.2020). (In Russ.)

13. Kravchenko I.N., Aldoshin N.V., Leskonog Yu.A., et al. Methodology of Indicator System Substantiation for Disposal Ability of Agricultural Production Technical Means. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area*. 2017; (3):32-36. Available at: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/download/56-arkhiv-zhurnala-za-2017/440-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-mart-3-237-2017-g> (accessed 05.11.2020). (In Russ.)

14. Gerasimov V.S., Solovyev R.Yu., Trofimenko Yu.V., et al. Estimation Procedure of Parameters and Financial Flows in Utilization System of Agricultural Machinery and Equipment. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area*. 2014; (8):37-40. Available at: <https://elib.pstu.ru/vufind/EdsRecord/edself,edself.21836508> (accessed 05.11.2020). (In Russ.)

15. Kravchenko I.N., Kuznetsov Yu.A., Leskonog Yu.A., et al. Process Modeling for Formation of Utilization System of Agricultural Machinery Withdrawn from Use. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area*. 2017; (9):39-44. Available at: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/download/56-arkhiv-zhurnala-za-2017/446-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-sentyabr-9-243-2017-g> (accessed 05.11.2020). (In Russ.)

16. Silvestri L., Forcina A., Arcese G., et al. Recycling Technologies of Nickel-Metal Hydride Batteries: An LCA Based Analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 273. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123083>
17. Zhang L., Yuan W., Songyan J., et al. Modelling the Generation of Household Automo-Biles in the Context Scrap of Urban-Rural Disparity: A Case Study of Nanjing, China. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 268. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122237>
18. Jafari M., Torabian M.M., Bazargan A. A Facile Chemical-Free Cathode Powder Separation Method for Lithium Ion Battery Resource Recovery. *Journal of Energy Storage*. 2020; 31. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101564>
19. Dobrotă D., Dobrotă G., Dobrescu T. Improvement of Waste Tyre Recycling Technology Based on a New Tyre Markings. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 260. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121141>
20. Lei Y., Qiu P., Ma W., et al. Novel Approach for Clean Utilization of Complex Low-Grade Metal Resources Using Silicon as Metal Getter. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 260. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121063>

*Received 03.06.2020; revised 10.07.2020; published online 30.12.2020*

*About the authors:*

**Igor N. Kravchenko**, Professor of Chair of Technical Service Department of Machinery and Equipment, Russian Timiryazev State Agrarian University (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: B-9463-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>, [kravchenko-in71@yandex.ru](mailto:kravchenko-in71@yandex.ru)

**Yri S. Migachev**, Head of Chair of Protection Means against Weapons of Mass Destruction, Military Academy of Radiation, Chemical and Biological Defense named after Marshal of the Soviet Union S. K. Timoshenko (16 Gorkiy St., Kostroma 156015, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9424-9875>, [migatchov\\_yri@mail.ru](mailto:migatchov_yri@mail.ru)

**Yury A. Kuznetsov**, Professor of Machine Reliability and Repair Department, Orel State Agrarian University (69 General Rodin St., Orel 302019, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3699-8231>, [kentury@yandex.ru](mailto:kentury@yandex.ru)

**Alexandr M. Davydkin**, Associate Professor of Chair of Technical Service of Machines of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: S-8297-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2984-2362>, [aldavydkin@yandex.ru](mailto:aldavydkin@yandex.ru)

**Mikhail N. Erofeev**, Vice President of Research, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (4 Malyy Kharitonevskiy Pereulok, Moscow 101990, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1048-3574>, [erofeff2007@yandex.ru](mailto:erofeff2007@yandex.ru)

*Contribution of the authors:*

I. N. Kravchenko – scientific guidance, formulation of the main research concept and conclusions; Y. S. Migachev – conducting research and preparing the initial version of the text; Yu. A. Kuznetsov – conducting critical analysis of research, analysis and revision of text; A. M. Davydkin – relationship analysis and plotting; M. N. Erofeev – preparation and initial analysis of literary data, text editing.

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

# **ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ / TECHNOLOGIES AND MAINTENANCE MEANS IN AGRICULTURE**

УДК 631.312

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202004.699-710

Оригинальная статья



## **Оценка износостойкости и ресурса двухслойных упрочненных почворезущих рабочих органов в различных почвенных условиях**

**С. А. Сидоров, Д. А. Миронов\*, Ю. С. Ценч,  
А. В. Миронова**

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

*\*mironov-denis87@mail.ru*

*Введение.* Ресурс почворезущих рабочих органов зависит от характеристик материалов, из которых они изготовлены. В частности, важными параметрами, влияющими на работоспособность и долговечность деталей почвообрабатывающих орудий, являются значения и отношения коэффициентов относительной износостойкости материалов двухслойных деталей, как правило, упрочняющего наплавленного слоя и материала основы (стали). Установлено, что характеристики относительной износостойкости материалов почворезущих деталей меняются в зависимости от свойств обрабатываемой почвы. Целью исследования стало изучение влияния почвенных условий на значения коэффициентов относительной износостойкости материалов двухслойных почворезущих деталей и сравнительная оценка их ресурса и эффективности применения.

*Материалы и методы.* Приведена обобщающая зависимость пропорциональности износа значениям действующих удельных давлений. Даны характеристики изнашивающей способности почв. Научно обосновано изменение характеристик износостойкости материалов при различных значениях удельных давлений.

*Результаты исследования.* Представлены результаты эксплуатационных ресурсных испытаний и исследований двухслойных и монометаллических почворезущих рабочих органов в различных почвенных условиях. Определено влияние значений действующих удельных давлений на коэффициенты относительной износостойкости материалов деталей почвообрабатывающих машин.

*Обсуждение и заключение.* Выявлено, что коэффициенты относительной износостойкости материалов представляют собой не постоянную величину, а меняются в зависимости от действующих поверхностных удельных давлений. Установлена связь величин удельных давлений с параметрами почвенных состояний, в частности с твердостью почвенного пласта. При увеличении твердости обрабатываемой почвы коэффициенты относительной износостойкости различных материалов сближаются. Разница варьируется от 1,80 до 1,85 раза.

© Сидоров С. А., Миронов Д. А., Ценч Ю. С., Миронова А. В., 2020



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

**Ключевые слова:** лезвийные почворежущие рабочие органы, двухслойные почворежущие рабочие органы, почвенные условия, износостойкость, переходный коэффициент, изнашивающая способность почвы

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

**Для цитирования:** Оценка износостойкости и ресурса двухслойных упрочненных почворежущих рабочих органов в различных почвенных условиях / С. А. Сидоров, Д. А. Миронов, Ю. С. Ценч, А. В. Миронова. – DOI [10.15507/2658-4123.030.202004.699-710](https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.699-710) // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 699–710.

## Assessment of Durability and Service Life of Two-Layer Hardened Earth Cutters in Various Soil Conditions

S. A. Sidorov, D. A. Mironov\*, Y. S. Tsench, A. V. Mironova  
*Federal Scientific Agroengineering Center VIM  
(Moscow, Russian Federation)*

\*[mironov-denis87@mail.ru](mailto:mironov-denis87@mail.ru)

**Introduction.** The earth cutter resource depends on the characteristics of the materials they are made from. In particular, the important parameters that directly affect the tillage tool parts efficiency and durability are the values and ratios of the coefficients of relative wear resistance of the two-layer parts materials, as a rule of the hardened deposited layer and the base material (steel). It is established that the characteristics of the relative wear resistance of the materials for earth cutter parts vary depending on the treated soil properties. The objectives of the study are to consider the influence of soil conditions on the values of the relative wear resistance coefficients of two-layer earth cutter part materials and to carry out a comparative assessment of their resource and use efficiency.

**Materials and Methods.** The authors gave a generalized dependence of the wear proportionality to the existing specific pressures values. The characteristics of soil abrasion were given. The scientific substantiation of the changes in the characteristics of the materials wear resistance at various values of specific pressures was given.

**Results.** The results of the operational resource tests and the studies of two-layer and monometallic earth cutters are presented. The influences of the values of the operating specific pressures on the coefficients of the relative wear resistance of the materials for the tillage machine parts are determined.

**Discussion and Conclusion.** The authors have found out that the coefficients of relative wear resistance of materials are not constant, but vary depending on the current surface specific pressures. The correlation of the specific pressure values with the parameters of the tillage operation, in particular with the furrow slice hardness was established. It has been found that while increasing the cultivated soil hardness, the coefficients of various materials relative wear resistance get closer to each other. The difference varies from 1.80 to 1.85 times.

**Keywords:** blade earth cutters, two-layer earth cutters, soil conditions, wear resistance, transition coefficient, soil wearing capacity

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

**For citation:** Sidorov S.A., Mironov D.A., Tsench Y.S., et al. Assessment of Durability and Service Life of Two-Layer Hardened Earth Cutters in Various Soil Conditions. *Inzhenereremye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(4):699-710. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.699-710>

## Введение

Лезвийные рабочие органы (лемеха, долота, лапы, ножи, диски, фрезы и др.) во многом обеспечивают эффективность почвообработывающих операций.

Известно, что создание двухслойных, как правило, упрочненных наплавочными твердосплавными покрытиями лезвийных режущих рабочих органов почвообработывающих машин является одним из наиболее эффективных способов повышения их износостойкости и общего ресурса [1–4].

Оценка эффективности использования в эксплуатационных условиях двухслойных и, в целом, упрочненных изделий является важным фактором, часто определяющим экономическую целесообразность применения тех или иных упрочняющих технологий и материалов.

Многолетние наблюдения за результатами испытаний двухслойных почворежущих рабочих органов показали, что при изменении почвенных условий относительная износостойкость (в том числе для монометаллического неупрочненного аналога) одних и тех же деталей может существенно изменяться [5–7]. Это, соответственно, влияет на характеристики эффективности использования новых упрочненных изделий.

Целью исследования является изучение влияния почвенных условий на значения коэффициентов относительной износостойкости различных материалов двухслойных лезвийных почворежущих деталей, сравнительная оценка их ресурса и эффективности применения.

## Обзор литературы

Вопросами оценки износостойкости и ресурса рабочих органов почвообработывающих машин занимался ряд отечественных ученых, таких как М. Н. Тененбаум, А. Н. Розенбаум, Д. Б. Бернштейн, В. Н. Ткачев, А. Ш. Рабинович, М. Н. Ерохин, В. Н. Виноку-

ров, В. С. Новиков и японские специалисты А. Хосуи, О. Морегаги.

В работах Д. Б. Берштейна, С. А. Сидорова, Д. А. Миронова, В. Н. Ткачева, А. Ш. Рабиновича и др. показаны преимущества использования двухслойных наплавленных почворежущих рабочих органов сельскохозяйственных машин [1; 2; 4; 6].

Труд А. Ш. Рабиновича посвящен общей теории формирования почворежущего лезвия [6].

В трудах М. М. Тененбаума, А. Н. Розенбаума, С. А. Сидорова, Я. П. Лобачевского с соавторами, Д. Б. Берштейна, японских ученых и др. отмечалось явление непостоянства относительной износостойкости материалов [8–11].

Последние исследования были уточнены и развиты авторами как с теоретической, так и с практической стороны [12–16]. Даны ссылки на практические рекомендации с учетом работ В. Н. Винокурова, связанных с анализом изнашивающей способности почв и разработок М. Н. Ерохина, В. С. Новикова [17–20].

## Материалы и методы

Известно, что величина износа определяется по следующей зависимости:

$$U = C \cdot P \cdot \tau, \quad (1)$$

где  $U$  – износ в направлении действия удельного давления, мм;  $P$  – удельное давление, Мпа;  $C$  – переходной коэффициент, зависящий от характеристик используемых материалов, свойств почвы, эксплуатационных условий и др.;  $\tau$  – наработка на рабочий орган [7–10].

В приведенной зависимости удельное давление  $P$  пропорционально величине твердости почвы, скорости обработки, значениям угла резания и изменяется достаточно прогнозируемо. Величина наработки и соответствующие ей значения износов изменяются линейно.

При оценке изнашивания почворежущих рабочих органов необходимо

определить коэффициент  $C$  и, соответственно, факторы, влияющие на его изменение. Именно этот коэффициент при изменении почвенных и отчасти эксплуатационных условий подвергается наиболее значимым изменениям.

С физической точки зрения коэффициент  $C$  характеризует изнашивающую способность материалов граней (при двухслойном лезвии материалов основы и упрочняющего режущего слоя соответственно) рабочих органов почвообрабатывающих машин в определенных почвенных условиях.

Основным фактором, значительно влияющим на показатель коэффициента  $C$ , необходимо принять изнашивающую способность почвы  $\lambda$ , имеющую определение:

$\lambda$  – износ по толщине элементарной площадки, вырезанной из лезвийной части рабочего органа, изготовленного из отечественной стали 45 или ее аналога с твердостью HRC 40, эксплуатирующегося при эталонном давлении  $P_3 = 0,1$  МПа и пути трения 25 000 м (что примерно соответствует наработке в 1 га для лемеха плуга), мм/га» [9; 10].

Величина  $\lambda$  определяется по следующей эмпирической формуле [9; 10]:

$$\lambda = (X^2 + 0,08 \cdot Y + 1,5 \cdot Z) \cdot T^{1/4}, \text{ мм/га}, \quad (2)$$

где  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  – процентное содержание в почве (по массе) соответственно песка, глины и мелких каменистых включений (гравия, гальки и пр.) в долях от единицы, то есть  $X + Y + Z = 1$ ;  $T$  – твердость почвы на глубине обработки, МПа<sup>1</sup>.

В соответствии с классификацией почв по механическому составу Н. А. Качинского<sup>2</sup>, усредненные расчетные значения изнашивающей способности различных видов почв (глинистых, сулинных, супесчаных, песчаных

и др.) могут колебаться в широких пределах – от 0,12 до 0,85 мм/га [9; 10].

Коэффициент  $C$ , как отмечалось выше, имеет ту же физическую природу, что и показатель «изнашивающая способность почвы», только с учетом износостойкости конкретного материала и величины реального удельного давления:

$$C = \frac{\lambda}{P_3 K_n K_\tau K_p}, \frac{\text{мм}}{\text{МПа} \cdot \text{га}}, \quad (3)$$

где  $P_3 = 0,1$  – эталонное удельное давление, МПа;  $K_n$  – коэффициент относительной износостойкости материала при удельном давлении 0,10–0,12, МПа ( $K_n = 0,9$ –1,8 для конструкционных и высокопрочных сталей;  $K_n = 3,4$  для твердого сплава ПГ-С1 «сормайт» [2; 9];  $K_n = 3,9$  для твердого сплава ФБХ-6-2;  $K_n = 4,8$ –6,2 для твердых сплавов с добавками карбида вольфрама);  $K_\tau$  – коэффициент приведения, соответствующий наработке 1 га [10; 16; 17].

$$K_\tau = \frac{d \pm m}{0,4}, \quad (4)$$

где 0,4 – примерная ширина захвата лемешного корпуса, м;  $d$  – ширина захвата исследуемого рабочего органа, м;  $m$  – величина перекрытия (–) или расстояния (+) между рядом идущими рабочими органами, м;  $K_p$  – коэффициент, учитывающий изменение коэффициента относительной износостойкости при изменении величины удельного давления [9; 10].

В данном случае именно этот коэффициент корректирует изменения приведенного выше коэффициента относительной износостойкости  $K_n$  конкретного материала в зависимости от величины удельного давления [9; 10].

Значение корректирующего коэффициента  $K_p$  отражает влияние плот-

<sup>1</sup> Сидоров С. А. Повышение долговечности и работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин и орудий, применяемых в сельском и лесном хозяйствах: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2007. 441 с.

<sup>2</sup> Качинский Н. А. Физика почв. М.: Высшая школа, 1969. 358 с.

ности (твердости) почвы и некоторых других факторов на относительную износостойкость материалов рабочих органов, воздействующих на почвенный слой.

Следует отметить, что явление коррекции параметров износостойкости материалов при изменении значений прилагаемых износных нагрузок (удельных давлений) было известно и ранее. В частности, японскими и российскими учеными было установлено, что в эксплуатационных условиях жесткого абразивного воздействия коэффициенты относительной износостойкости  $K_{и}$  различных разнородных материалов при росте удельных износоабразивных нагрузок сближаются<sup>3</sup> [2; 9; 10; 11]. Данный факт можно объяснить особенностью воздействия абразивных частиц при реализации физических процессов микрорезания и усталостного выкрашивания<sup>4</sup> [8]. При приложении больших нагрузок более износостойкий материал, в сравнении с менее износостойкими, имеет лучшие характеристики относительно аналога, но уже не столь высокие различия, как при воздействии существенно меньших нагрузок.

При увеличении прилагаемых нагрузок на идентичные абразивные частицы агрессивность воздействия (характеризующая величины износов) последних на разнородные по противоизносным свойствам материалы отличается не так сильно, как при относительно меньшем удельном нагружении.

Очевидно, что при росте действующих нагрузок величины микрообъемов, отделяемых за цикл изнашивания абразивными частицами различных материалов изделия, изменяются не прямо пропорционально абразивным свойст-

вам, характерным для них при воздействии относительно меньших нагрузок.

На данном физическом явлении – изменении уровня сопротивления абразивному изнашиванию материалов в зависимости от значений прилагаемых абразивных нагрузок – и основывается объяснение имеющихся важных различий в относительных сравнительных (именно сравниваемых между собой) показателях изменения (повышения) ресурса по износостойкости почворежущих деталей, изготовленных и упрочненных по различным вариантам, при изменении почвенных условий.

### Результаты исследования

Многолетние результаты ресурсных испытаний и исследований почворежущих рабочих органов как монометаллических (однослойных), так и биметаллических (двухслойных, наплавленных), проведенных при различных почвенных условиях на полигоне ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», подтверждают верность приведенных выше зависимостей и научных обоснований. Обобщенные данные о сравнительном ресурсе по критерию предельного износа наиболее распространенных лезвийных почворежущих рабочих органов в различных почвенных условиях приведены в таблице.

Следует отметить, что легкие почвы (песчаные, супесчаные, легкий суглинок), как правило, имеют более высокую изнашивающую способность вследствие наличия в своем механическом составе большого количества агрессивных кварцевых частичек физического песка [12; 15]. Исключения из этой ситуации могут проявляться в условиях тяжелых сухих суглинков или черноземов.

<sup>3</sup> Хасун А., Моригаки О. Наплавка и напыление / пер. с японского В. Н. Попова. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.; Тененбаум М. Н. О непостоянстве относительной износостойкости // Повышение износостойкости и долговечности режущих элементов сельскохозяйственных машин. М.: ВИСХОМ, 1971. С. 57–63.

<sup>4</sup> Рабинович И. П., Тененбаум М. М., Торнер Р. В. Исследование материалов деталей сельхозмашин. М.: ВИСХОМ, 1969. 205 с.

**Результаты сравнительных ресурсных износных испытаний рабочих органов  
почвообрабатывающих машин, изготовленных с использованием различных материалов  
и упрочняющих технологий**

**The results of comparative resource wear tests of the working bodies of tillage machines, made  
using various materials and hardening technologies**

№	Вид рабочего органа, материал, упрочняющая технология / Type of working body, material, hardening technology	Ресурс по износостойкости, га / Wear resistance resource, ha		Усредненный коэффициент повышения ресурса относительно базового (серийного) варианта / Average coefficient of resource increase relative to the basic (serial) version		Усредненное значение приведенного коэффициента относительной износостойкости ( $K_n \cdot K_p$ ) покрытия / Average value of the relative wear resistance reduced coefficient ( $K_n \cdot K_p$ ) of the coating	
		На легких (0,7–2,0 МПа) почвах, га / On light (0.7–2.0 MPa) soils, ha	На тяжелых (2,3–4,5 МПа) почвах, га / On heavy (2.3–4.5 MPa) soils, ha	На легких (0,7–2,0 МПа) почвах, га / On light (0.7–2.0 MPa) soils, ha	На тяжелых (2,3–4,5 МПа) почвах, га / On heavy (2.3–4.5 MPa) soils, ha	На легких (0,7–2,0 МПа) почвах, га / On light (0.7–2.0 MPa) soils, ha	На тяжелых (2,3–4,5 МПа) почвах, га / On heavy (2.3–4.5 MPa) soils, ha
1	Лемех плуга долотообразный, серийный, несплавленный, из сталей Л53, 65Г / The chisel-shaped serial not welded, plow share from L53, 65G steels	4,00–10,50	17,00–21,00	1,00	1,00	–	–
2	Лемех плуга долотообразный, серийный, наплавленный сплавом ПГ-ФБХ-6-2, из сталей Л53, 65Г / The chisel-shaped, serial welded alloy PG-FBH-6-2, plow share from L53, 65G steel	11,00–27,00	32,00–40,00	2,60–2,80	1,70–1,90	3,70–4,00	2,20–2,40
3	Накладное долото трапециевидного лемеха плуга монометаллическое, из сталей 65Г, 30ХГСА / Mono-metal overhead chisel of trapezoidal plow share from 65G, 30HGSA steel	3,00–6,00	9,50–13,50	1,00	1,00	–	–

4	Накладное долото трапецевидного лемеха плуга, наплавленное сплавом ПГ-ФБХ-6-2, из стали 30ХГСА / Overhead chisel of a trapezoidal plow share fused with PG-FBH-6-2 alloy, made of 30HGSA steel	7,50–14,00	15,00–22,50	2,30–2,50	1,50–1,65	3,50–3,80	2,00–2,20
5	Лапа культиватора КПС-4 шириной 330 мм монометаллическая, серийная, из стали 65Г / KPS-4 cultivator paw 330 mm wide monometallic serial made of 65G steel	11,50–15,00	24,00–26,00	1,00	1,00	–	–
6	Лапа культиватора КПС-4 шириной 330 мм, наплавленная сплавом ПГ-ФБХ-6-2, из стали 65Г / KPS-4 cultivator paw 330 mm wide surfaced with PG-FBH-6-2 alloy made of 65G steel	33,00–39,50	41,00–49,00	2,70–2,90	1,70–2,00	3,80–4,00	2,30–2,60

На рисунке приведен вид наложенных друг на друга изношенных монометаллических и двухслойных наплавленных накладных долот лемехов плугов, эксплуатирующихся в различных почвенных условиях.

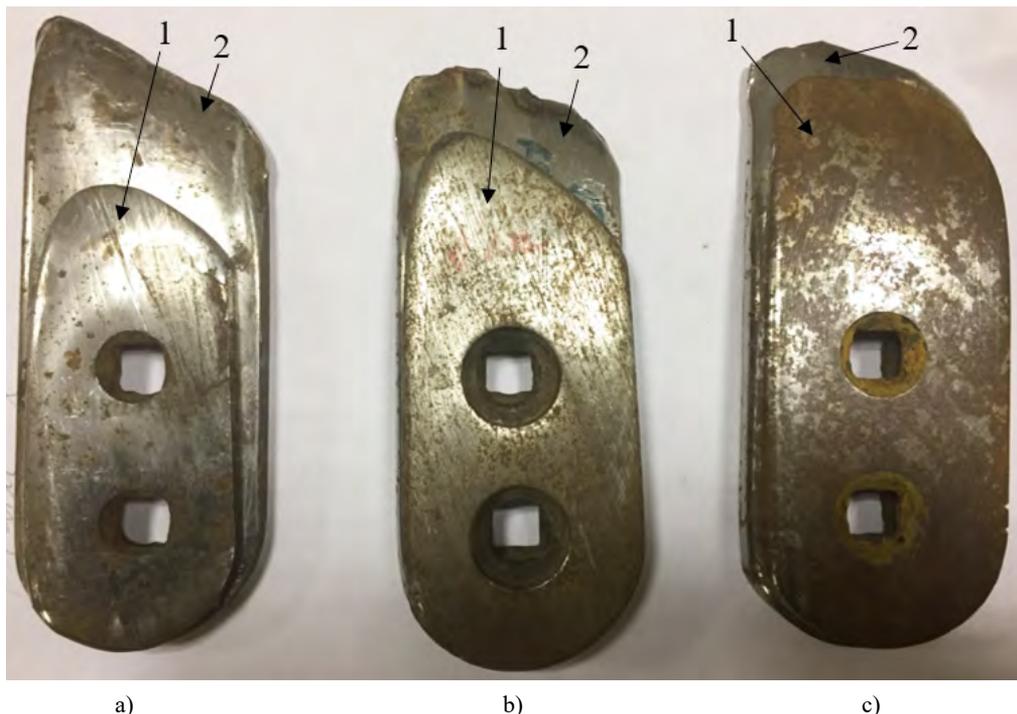
Как видно из рисунка и анализа таблицы, при росте действующих удельных нагрузок, пропорциональных твердости почвы, коэффициенты относительной износостойкости материалов основы и упрочняющего слоя рабочих органов существенно изменяются в сторону сближения. При этом очевидно, что максимальное повышение ресурса наплавленных упрочненных изделий имеет место в условиях эксплуатации на легких песчаных, су-

песчаных, легкосуглинистых почвах. Экспериментально установлено, что отличие коэффициентов относительной износостойкости сравниваемых материалов в различных почвенных условиях в пределе может достигать величины 1,80–1,85.

Исходя из результатов экспериментальных данных для коэффициента  $K_p$  в выражении (3), можно предположить следующую эмпирическую зависимость:

$$K_p = 1,15 - 1,3P + 0,7P^2. \quad (5)$$

Соответственно, максимальные величины удельных давлений  $P$ , действующие на верхнюю и нижнюю ( $P_1$  и  $P_2$ )



Р и с. Изношенные монометаллические (1) и наплавленные двухслойные (2) идентичные накладные долота плугов после наработки 5–6 га в условиях эксплуатации на следующих типах почв: а) на легких песчаных,  $T = 0,8–1,8$  МПа; б) на среднесуглинистых,  $T = 2,1–2,9$  МПа; с) на тяжелых суглинистых,  $T = 3,3–4,8$  МПа

Fig. Comparative types of worn-out monometallic (1) and deposited two-layer (2) identical overhead plows' bits after processing 5–6 ha in operating conditions on the following soil types: а) on light sand,  $T = 0.8–1.8$  MPa; б) on medium loamy soil,  $T = 2.1–2.9$  MPa; с) on heavy loamy soil, heavy clay soil,  $T = 3.3–4.8$  MPa

грани почворезущего лезвия, определяются по зависимостям [4]:

$$P_1 = (0,025 - 0,045) \cdot (1 + 0,01\varepsilon_0) \times (1 + 0,1v) \cdot (0,8 + T), \text{ МПа}, \quad (6)$$

$$P_2 = (0,05 - 0,07) \cdot (1 + 0,01\varepsilon_0) \times (1 + 0,1v) \cdot (1,3 + T^{1,5}), \text{ МПа}, \quad (7)$$

где  $T$  – твердость почвы, МПа;  $\varepsilon_0$  – угол установки рабочего органа, град;  $v$  – скорость обработки почвы, м/с; значения  $P$  могут находиться в пределах  $P \in [0,07–0,95]$ , МПа.

Представленные объективные закономерности следует учитывать при

расчете экономической эффективности использования и целесообразности применения новых разрабатываемых почворезущих рабочих органов. Как известно, экономическая эффективность использования новых изделий пропорциональна соотношению цена/ресурс [14; 15]. В частности, в отдельных случаях желательно для разработки и изготовления новых упрочненных рабочих органов почвообрабатывающих машин, особенно эксплуатирующихся на тяжелых почвах, использовать более износостойкие высокопрочные стали [18–20], а в железоуглеродистые наплавленные сплавы добавлять литой карбид вольфрама [17–20].

### Обсуждение и заключение

Коэффициенты относительной износостойкости материалов (сталей, упрочняющих твердых сплавов) почво-режущих рабочих органов не являются постоянными величинами, а меняются при вариации действующих поверхностных удельных давлений, пропорциональных и зависящих в основном от твердости обрабатываемой почвы.

Установлено, что в реальных почвенных условиях коэффициенты относительной износостойкости упрочняющих твердосплавных материалов и материалов основы (стали) при повышении твердости обрабатываемой

почвы и соответствующих удельных давлений сближаются. Различие в коэффициентах относительной износостойкости сравниваемых материалов почвообрабатывающих рабочих органов может доходить до 1,80–1,85 раза.

Соответственно, при эксплуатации в тяжелых почвенных условиях ( $T > 2,5\text{--}3,0$  МПа) эффективность применения упрочняющих технологий, в частности наплавочных, несколько снижается. Этот факт должен учитываться при подборе материалов основы и упрочняющего «режущего» слоя двухслойных биметаллических почво-режущих деталей.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бернштейн, Д. Б. Абразивное изнашивание лемешного лезвия и работоспособность плуга / Д. Б. Бернштейн // Тракторы и сельхозмашины. – 2002. – № 6. – С. 39–42. – URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2002/200206.htm> (дата обращения: 06.11.2020).
2. Surfacing Methods for Increasing the Service Life of Rapidly Wearing Working Tools of Agricultural Machines / S. A. Sidorov, D. A. Mironov, V. K. Khoroshenkov, E. I. Khlusova. – DOI 10.1080/09507116.2016.1148408 // Welding International. – 2016. – Vol. 30, Issue 10. – Pp. 808–812. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09507116.2016.1148408> (дата обращения: 06.11.2020).
3. Сурилов, В. С. Исследование износостойкости двухслойных и однородных дисков лушителей / В. С. Сурилов, В. А. Овчинников // Тракторы и сельхозмашины. – 1970. – № 8. – С. 28–29.
4. Ткачев, В. Н. Повышение долговечности дисковых рабочих органов почвообрабатывающих машин / В. Н. Ткачев, И. Л. Коган // Тракторы и сельхозмашины. – 1969. – № 8. – С. 32–33.
5. Колесов, В. Г. О повышении долговечности деталей, изнашивающихся при трении о грунт, и рациональном выборе сплавов для их наплавки / В. Г. Колесов // Вестник машиностроения. – 1961. – № 9. – С. 22–26.
6. Рабинович, А. Ш. Элементарная теория лезвия и методы проектирования самозатачивающихся почворежущих лезвий / А. Ш. Рабинович // Тракторы и сельхозмашины. – 1961. – № 10. – С. 33–36.
7. Розенбаум, А. Н. Применение двухслойного проката для самозатачивающихся почворежущих деталей / А. Н. Розенбаум // Тракторы и сельхозмашины. – 1966. – № 10. – С. 27–29.
8. Тененбаум, М. М. О методике расчета долговечности изнашивающихся деталей с.х. машин с учетом нелинейности динамики изнашивания / М. М. Тененбаум // Тракторы и сельхозмашины. – 1970. – № 9. – С. 29–31.
9. Сидоров, С. А. Методика расчета на износостойкость моно- и биметаллических почворежущих рабочих органов / С. А. Сидоров // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2003. – № 12. – С. 35–39. – URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2003/200312.htm> (дата обращения: 06.11.2020).
10. Научные принципы повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающей техники / А. Ю. Измайлов, С. А. Сидоров, Я. П. Лобачевский [и др.] // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2012. – № 3. – С. 5–7. – Рез. англ.
11. Бернштейн, Д. Б. Оценка возможности самозатачивания двухслойных почворежущих элементов при абразивном изнашивании / Д. Б. Бернштейн // Тракторы и сельхозмашины. – 1985. – № 6. – С. 31–33.

12. **Винокуров, В. Н.** Исследование изнашивающей способности почв лесной зоны / В. Н. Винокуров // Тракторы и сельхозмашины. – 1977. – № 8. – С. 20–22.
13. Modeling the Technological Process of Tillage / S. G. Mudarisov, I. I. Gabitov, Y. P. Lobachevsky [et al.]. – DOI 10.1016/j.still.2018.12.004 // Soil & Tillage Research. – 2019. – Vol. 190. – Pp. 70–77. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198718311760?via%3Dihub> (дата обращения: 06.11.2020).
14. **Ерохин, М. Н.** Прогнозирование ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин / М. Н. Ерохин, В. С. Новиков, Д. И. Петровский // Сельский механизатор. – 2015. – № 11. – С. 6–9. – URL: <http://selmech.msk.ru/1115.html> (дата обращения: 06.11.2020). – Рез. англ.
15. **Ерохин, М. Н.** К вопросу об импортозамещении рабочих органов зарубежных почвообрабатывающих машин / М. Н. Ерохин, В. С. Новиков, Д. И. Петровский // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т. 121. – С. 206–212. – Рез. англ.
16. Improving Wear Resistance of Agricultural Machine Components by Applying Hard-Alloy Thick-Layer Coatings Using Plasma Surfacing / S. A. Sidorov, V. K. Khoroshenkov, Y. P. Lobachevsky [et al.]. – DOI 10.1007/s11015-017-0443-7 // Metallurgist. – 2017. – Vol. 60. – Pp. 1290–1294. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11015-017-0443-7#citeas> (дата обращения: 06.11.2020).
17. Wear and Breakage Resistance of Hard Alloy Coatings Strengthened with Tungsten Carbide / S. A. Sidorov, Ya. P. Lobachevskii, V. K. Khoroshenkov [et al.]. – DOI 10.1007/s11015-018-0602-5 // Metallurgist. – 2018. – Vol. 61. – Pp. 1023–1028. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11015-018-0602-5#citeas> (дата обращения: 06.11.2020).
18. Novel High-Alloy Boron-Containing Steels for Driven Elements of Tilling Machines / A. Yu. Izmaylov, S. A. Sidorov, V. K. Khoroshenkov [et al.]. – DOI 10.1007/s11041-017-0130-0 // Metal Science and Heat Treatment. – 2017. – Vol. 59. – Pp. 208–210. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11041-017-0130-0#citeas> (дата обращения: 06.11.2020).
19. Study of the Structure of New Wear-Resistant Steels for Agricultural Machinery Components After Operational Tests / V. V. Ryabov, G. D. Motovilina, E. I. Khlusova [et al.]. – DOI 10.1007/s11015-016-0374-8 // Metallurgist. – 2016. – Vol. 60. – Pp. 839–844. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11015-016-0374-8#citeas> (дата обращения: 06.11.2020).
20. Method for Preparing an Efficient Master Alloy for Steel Boriding / Y. P. Lobachevskii, V. F. Aulov, A. V. Ishkov [et al.]. – DOI 10.1007/s11015-019-00731-z // Metallurgist. – 2019. – Vol. 62. – Pp. 986–993. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11015-019-00731-z#citeas> (дата обращения: 06.11.2020).

*Поступила 02.06.2020; принята к публикации 10.09.2020; опубликована онлайн 30.12.2020*

*Об авторах:*

**Сидоров Сергей Алексеевич**, заведующий лабораторией элементной базы машин для обработки почвы ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), доктор технических наук, Researcher ID: AAN-6236-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7638-2020>

**Миронов Денис Александрович**, старший научный сотрудник лаборатории элементной базы машин для обработки почвы ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9380-2026>, [mironov-denis87@mail.ru](mailto:mironov-denis87@mail.ru)

**Ценч Юлия Сергеевна**, заместитель директора по образованию и редакционно-издательской деятельности ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат педагогических наук, Researcher ID: H-5855-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3214-4725>, [vimasp@mail.ru](mailto:vimasp@mail.ru)

**Миронова Анастасия Владимировна**, младший научный сотрудник лаборатории почвообрабатывающих и мелиоративных машин ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1390-1812>, [timchenko-anastasia93@mail.ru](mailto:timchenko-anastasia93@mail.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

С. А. Сидоров – формирование основной концепции, разработка расчетных формул, описание основных результатов исследования, участие в формировании выводов; Д. А. Миронов – изготовление и упрочнение опытных партий образцов рабочих органов, организация и проведение полевых сравнительных эксплуатационных испытаний, оценка и анализ результатов эксплуатационных испытаний; Ю. С. Ценч – участие в формировании целей исследования, участие в экспериментальных исследованиях, обсуждение результатов исследований, участие в написании текста; А. В. Миронова – участие в экспериментальных исследованиях, участие в подготовке и оформлении текста, участие в анализе результатов исследований.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Bernshteyn D.B. [Abrasive Blade Wear and Tear and Plough Performance]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2002; (6):39-42. Available at: <http://www.avtomash.ru/gur/2002/200206.htm> (accessed 06.11.2020). (In Russ.)
2. Sidorov S.A., Mironov D.A., Khoroshenkov V.K., et al. Surfacing Methods for Increasing the Service Life of Rapidly Wearing Working Tools of Agricultural Machines. *Welding International*. 2016; 30(10):808-812. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1148408>
3. Surilov V.S., Ovchinnikov V.A. [Study of Wear Resistance of the Two-Layer and Homogeneous Disks of Shakers]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 1970; (8):28-29. (In Russ.)
4. Tkachev V.N., Kogan I.L. [Increasing the Durability of Soil Tillage Machine Disc Working Elements]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 1969; (8):32-33. (In Russ.)
5. Kolesov V.G. [On Increasing the Durability of Parts That Wear Out with Friction against the Ground, and a Rational Choice of Alloys for Their Surfacing]. *Vestnik mashinostroeniya* = Russian Federation Engineering Research. 1961; (9):22-26. (In Russ.)
6. Rabinovich A.Sh. [Elementary Blade Theory and Design Methods for Self-Sharpening Soil-Cutting Blades]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 1961; (10):33-36. (In Russ.)
7. Rozenbaum A.N. [Application of Two-Layer Rolled Products for Self-Sharpening Soil-Cutting Parts]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 1966; (10):27-29. (In Russ.)
8. Tenenbaum M.M. [About the Method of Calculating the Durability of Wearing Parts of Agricultural Machinery, Taking Into Account the Nonlinearity of Wear Dynamics]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 1970; (9):29-31. (In Russ.)
9. Sidorov S.A. [Methods of Calculation for Wear Resistance of Mono and Bimetallic Soil-Cutting Working Bodies]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2003; (12):35-39. Available at: <http://www.avtomash.ru/gur/2003/200312.htm> (accessed 06.11.2020). (In Russ.)
10. Izmailov A. Yu., Sidorov S.A., Lobachevsky Ya.P., et al. Scientific Principles of Raising Wear Resistance in Working Organs of Soil Tillage Machinery. *Vestnik Rossiyskoy akademii selkhoz mashinostroyeniya nauk* = Bulletin of Russian Academy of Agricultural Sciences. 2012; (3):5-7. (In Russ.)
11. Bernshteyn D.B. [Evaluation of the Possibility of Self-Sharpening of Two-Layer Soil-Cutting Elements at Abrasive Wear]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 1985; (6):31-33. (In Russ.)
12. Vinokurov V.N. [Study of the Wearing Capacity of the Forest Area Soils]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 1977; (8):20-22. (In Russ.)
13. Mudarisov S.G., Gabitov I.I., Lobachevsky Y.P., et al. Modeling the Technological Process of Tillage. *Soil & Tillage Research*. 2019; 190:70-77. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.004>
14. Erokhin M.N., Novikov V.S., Petrovskiy D.I. Predicting Resource of Tillers Working Organs. *Selskiy Mekhanizator* = Rural Mechanic. 2015; (11):6-9. Available at: <http://selmech.msk.ru/1115.html> (accessed 06.11.2020). (In Russ.)
15. Yerokhin M.N., Novikov V.S., Petrovskiy D.I. [On the Issue of Import Substitution of Working Bodies of Foreign Tillage Machines]. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2015; 121:206-212. (In Russ.)

16. Sidorov S.A., Khoroshenkov V.K., Lobachevsky Y.P., et al. Improving Wear Resistance of Agricultural Machine Components by Applying Hard-Alloy Thick-Layer Coatings Using Plasma Surfacing. *Metallurgist*. 2017; 60:1290-1294. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0443-7>
17. Sidorov S.A., Lobachevskii Ya.P., Khoroshenkov V.K., et al. Wear and Breakage Resistance of Hard Alloy Coatings Strengthened with Tungsten Carbide. *Metallurgist*. 2018; 61:1023-1028. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0602-5>
18. Izmaylov A.Yu., Sidorov S.A., Khoroshenkov V.K., et al. Novel High-Alloy Boron-Containing Steels for Driven Elements of Tilling Machines. *Metal Science and Heat Treatment*. 2017; 59:208-210. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11041-017-0130-0>
19. Ryabov V.V., Motovilina G.D., Khlusova E.I., et al. Study of the Structure of New Wear-Resistant Steels for Agricultural Machinery Components After Operational Tests. *Metallurgist*. 2016; 60:839-844. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0374-8>
20. Lobachevsky Y.P., Aulov V.F., Ishkov A.V., et al. Method for Preparing an Efficient Master Alloy for Steel Boriding. *Metallurgist*. 2019; 62:986-993. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00731-z>

*Received 02.06.2020; revised 10.09.2020; published online 30.12.2020*

*About the authors:*

**Sergey A. Sidorov**, Head of the Laboratory of the Elementary Base of Tillage Machines, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: [AAN-6236-2020](https://orcid.org/0000-0002-7638-2020), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7638-2020>

**Denis A. Mironov**, Senior Researcher of the Laboratory of the Elementary Base of Tillage Machines, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9380-2026>, [mironov-denis87@mail.ru](mailto:mironov-denis87@mail.ru)

**Yuliya S. Tsench**, Deputy Director for Education and Editorial and Publishing Activities, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), Cand.Sc. (Pedagogy), Researcher ID: [H-5855-2018](https://orcid.org/0000-0002-3214-4725), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3214-4725>, [vimasp@mail.ru](mailto:vimasp@mail.ru)

**Anastasiya V. Mironova**, Researcher of the Laboratory of the Elementary Base of Tillage Machines, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1390-1812>, [timchenko-anastasia93@mail.ru](mailto:timchenko-anastasia93@mail.ru)

*Contribution of the authors:*

S. A. Sidorov – formation of the basic concept, development of calculation formulas, description of the basic research results, participation in the formation of conclusions; D. A. Mironov – fabrication and strengthening of pilot batches of working body samples, organization and conduct of field comparative operational tests, evaluation and analysis of operational test results; Y. S. Tsench – participation in the formation of research objectives, participation in experimental research, discussion of research results, participation in text writing; A. V. Mironova – participation in experimental research, participation in preparation and design of the text, participation in the analysis of research results.

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



## Цифровизация процессов восстановления сельскохозяйственной техники

Л. Л. Хорошко\*, П. М. Кузнецов  
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»  
(г. Москва, Российская Федерация)  
\*khoroshko@mati.ru

*Введение.* Целью работы является разработка основных положений цифровизации процессов организации диагностики и ремонта сельскохозяйственной техники.

*Материалы и методы.* Спецификой функционирования сельскохозяйственной техники является работа в крайне неблагоприятных условиях, таких как значительное загрязнение абразивом (элементами грунта, пылью и др.), работа в условиях незащищенности от природных условий, напряженная работа в течение смены и др. Вследствие перечисленных факторов регулярно возникает необходимость в организации профилактических и ремонтных работ. Эти факторы в значительной степени удлиняют сроки проведения ремонтно-восстановительных работ, что негативно отражается на эффективности. Проведенный обзор состояния формирования информационной среды для планирования и распределения сельскохозяйственной техники по ремонтным предприятиям показал, что этот вопрос недостаточно проработан. Авторы предлагают свой вариант решения задачи рационального распределения сельскохозяйственной техники для проведения ремонтно-восстановительных работ.

*Результаты исследования.* В данной статье установлены основные положения формирования структурных связей баз данных, используемых при нахождении рациональных решений организации ремонтно-восстановительных работ сельскохозяйственной техники. В связи с тем, что решение подобной задачи является трудоемким и осуществляется в условиях, динамически меняющихся во времени, предложена математическая модель производственной среды ремонтных организаций, которая реализуется средствами вычислительной техники. Определены требования к моделям, описывающим состояние производственной системы ремонтных организаций. Предложена модель обобщенной производственной системы.

*Обсуждение и заключение.* Разработка, представленная в данной статье, позволяет повысить уровень автоматизации процессов распределения сельскохозяйственной техники по рабочим местам производственной системы ремонтных предприятий. Реализация подхода к планированию и распределению ремонтируемой сельскохозяйственной техники по рабочим местам ремонтных предприятий позволит повысить эффективность ремонтных работ, их качественные параметры, сократить время, оптимизировать структуру технологического оборудования ремонтных предприятий.

**Ключевые слова:** ремонтные работы, технологический процесс, автоматизация, математическая модель, база данных, трудоемкость, производительность

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



*Для цитирования:* Хорошко, Л. Л. Цифровизация процессов восстановления сельскохозяйственной техники / Л. Л. Хорошко, П. М. Кузнецов. – DOI [10.15507/2658-4123.030.202004.711-722](https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.711-722) // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 711–722.

Original article

## Digitalization of Agricultural Machinery Rehabilitation

L. L. Khoroshko\*, P. M. Kuznetsov

*Moscow Aviation Institute (National Research University)  
(Moscow, Russian Federation)*

\*[khoroshko@mati.ru](mailto:khoroshko@mati.ru)

*Introduction.* The aim of the study is to develop the basic principles for digitalization of the processes of providing the diagnostics and repair of agricultural machinery.

*Materials and Methods.* The specifics of agricultural machinery functioning are work in worst-on-worst operating conditions, such as significant abrasive contamination (soil particles, dust and other substances), operation in the conditions of exposure to natural climatic conditions, intensive use during the work shift and other factors that result in a regular need for testing and repairing. These factors significantly extend the time of maintenance and repair works. The study of the information environment for planning the distribution of agricultural machinery by repair enterprises has showed that the methods of this activity are not sufficiently developed. The authors propose a solution to the problem of rational distribution of agricultural machinery for repair and rehabilitation.

*Results.* This article describes the main principles for developing structural relationships of databases used to find rational solutions for organizing repair and rehabilitation of agricultural machinery. Due to the fact that the solution of such a problem is time-consuming and is carried out under conditions that dynamically change over time, a mathematical model for the production environment of repair organizations is proposed, which is implemented by means of computer technology. The requirements for models describing the state of the production system of repair organizations are defined. A model of a generalized production system is proposed.

*Discussion and Conclusion.* The model developed by the authors allows increasing the automation level of processes of distributing agricultural machinery by repair enterprises. The implementation of a new approach to planning repair works and distributing repairable agricultural machinery by repair enterprises will increase the efficiency of repair works, improve their quality parameters, reduce time, and optimize the structure of technological equipment of repair enterprises.

**Keywords:** repair works, technological process, automation, mathematical model, database, labor input, productivity

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

**For citation:** Khoroshko L.L., Kuznetsov P.M. Digitalization of Agricultural Machinery Rehabilitation. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(4):711-722. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.711-722>

### Введение

При организации ремонтных работ сельскохозяйственной техники (комбайны, тракторы, навесное оборудование, стационарное оборудова-

ние и т. д.) в современных условиях особенно остро стоит вопрос ускорения процессов восстановления работоспособности и возвращения в эксплуатацию. Особенно важна оперативность

возврата в период страды. В этот период на первое место выходит быстрая подготовка и проведение ремонтно-восстановительных работ.

Сельскохозяйственная техника эксплуатируется в тяжелых условиях. Она подвергается действиям атмосферных осадков, на механизмы воздействуют агрессивные и абразивные среды и т. д. Вследствие специфики конструкций в большинстве случаев от их воздействия невозможно защитить подвижные части механизмов. Все это приводит к частому выходу из строя отдельных узлов и агрегатов, что в свою очередь вызывает простой сельскохозяйственной техники.

Для решения задачи увеличения периода работоспособного состояния сельскохозяйственной техники необходимо организовать работу ремонтных предприятий таким образом, чтобы заявки на проведение работ выполнялись с максимальной производительностью и с минимальной себестоимостью. Кроме того, необходимо рационально загружать оборудование ремонтных предприятий с расчетом их готовности для приема максимального количества обращений. Обобщение статистики требуемого оборудования является основополагающим условием получения информации о необходимом объеме и структуре производственных мощностей ремонтных предприятий.

### Обзор литературы

Технологический процесс является частью производственного процесса, содержащего целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда<sup>1</sup>. З. Т. Акашев описывает разработку, направленную на назначение структуры технологических процессов предприятий, их анализ и совершенство-

вание [1]. В своей работе он делает важный вывод о первостепенном значении надежности функционирования оборудования предприятий как залога эффективности их реализации. В ряде работ приводятся рекомендации по повышению эффективности предприятия с помощью созданной технологической стратегии на основе предлагаемых путей ее формирования [2; 3]. В качестве инструмента предлагается всестороннее внедрение вычислительной техники как средства повышения уровня информатизации для развития производственного потенциала промышленного предприятия. Автоматизация всех этапов жизненного цикла изделия является необходимым условием достижения высокого индустриального уровня, особенно актуальными являются этапы технического сопровождения, сервисного обслуживания и ремонта [4]. Актуальность приобретают современные средства автоматизации на основе микропроцессорной техники, например, числовое программное управление (ЧПУ) станками «АксиОМА», позволяющее обеспечить повышение производительности и снижение трудоемкости реализуемых технологических процессов [5]. Особую роль приобретает математическое моделирование систем управления технологическим оборудованием, его элементами для обеспечения заданных параметров обработки<sup>2</sup>.

Проектирование технологических процессов последовательно реализует две однозначно связанные процедуры: структурный и параметрический синтезы. Структурный синтез является трудно формализуемой процедурой, что вызывает большие сложности при автоматизации. Для преодоления возникающих трудностей в настоящее время необходимо освоение основ-

<sup>1</sup> ГОСТ 3.1109-82. Единая система технологической документации (ЕСТД). Термины и определение основных понятий (с Изменением № 1).

<sup>2</sup> Tseng G. W. G. Digital Twin Feed Drive Identification for Virtual Process Planning. Ontario: University of Waterloo, 2018. 101 p. URL: [https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/13970/Tseng\\_Ginette.pdf?sequence=5&isAllowed=y](https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/13970/Tseng_Ginette.pdf?sequence=5&isAllowed=y) (дата обращения: 18.11.2020).

ных положений проектно-операционного управления производством, что позволит объединить в единый комплекс работы по подготовке, внедрению и сопровождению реализуемых технологических процессов на предприятии [6]. Другая работа посвящена рассмотрению вопросов, связанных с формированием информационного обеспечения системы проектно-операционного управления [7].

На этом этапе большую роль играют вопросы разработки маршрутной технологии в автоматизированном режиме. Здесь необходимо отметить такие работы, как статья В. В. Борзенкова, который описал подход к формированию структур технологических процессов, опираясь на топологические свойства макроэлементов [8]. Д. Е. Максимовский предлагает формировать структуры технологических процессов для деталей класса «корпус» путем автоматизированного выбора технологических баз [9]. Работа коллектива авторов, посвященная проектированию технологических процессов изготовления деталей класса «тело вращения», дает представление о принципе автоматизированной конструкторско-технологической параметризации, что резко снижает трудоемкость проектирования [10]. Все это расширяет сферу использования автоматизации при проектировании технологических процессов.

Взятый за основу принцип выбора комплекта баз при проектировании технологических процессов механической обработки позволяет автоматизировать процессы структурного синтеза широкого диапазона класса деталей [11].

Приведена методика расчета технологического резания в автоматизированном режиме, которая и реализуется в виде подсистемы проектирования технологических процессов [12]. Предлагаемая подсистема может быть полезной при моделировании различных структурных вариантов формирования технологических процессов ремонтно-восстановительных работ.

Рассматриваются вопросы определения величины геометрических погрешностей, образующихся при обработке на металлорежущем оборудовании с ЧПУ, рассматриваются различные расчетные схемы [13].

Изучены проблемы моделирования процессов обработки с целью прогнозирования точности при использовании конкретного металлорежущего оборудования [14].

Другая работа посвящена вопросам моделирования состояния производственной системы машиностроительных предприятий, в частности ремонтных [15].

Созданию программного обеспечения подсистем операционного управления предприятиями посвящены статьи, в которых описываются основные положения работы с проектной информацией при использовании средств вычислительной техники [16; 17]. Рассмотрена оценка качества результатов конструкторско-технологического проектирования при проведении необходимых контрольных проверок [18; 19].

Перечисленные работы подтверждают необходимость решения задачи наращивания информационного обеспечения процессов производства и ремонтно-восстановительных работ, в частности сельскохозяйственных машин. Основой этих процессов является разработка математических моделей, позволяющих в режиме машинного времени обеспечить моделирование, анализ и поиск рациональной конфигурации и загрузки предприятий, включая ремонтно-восстановительные, для сельскохозяйственных машин.

Подытоживая проведенный анализ литературных источников, можно сделать вывод, что существует обширная база научных исследований, посвященных ремонтно-восстановительным работам сельскохозяйственной техники. Ее использование обеспечит снижение трудоемкости восстановительных работ и сократит простой оборудования.

### Материалы и методы

Эффективность функционирования производственной системы любого промышленного предприятия, включая ремонтно-восстановительные, определяется степенью загрузки технологического оборудования, входящего в его состав. С учетом возможного выхода из эксплуатации части технологического оборудования вследствие необходимых регламентных работ, внезапных поломок и т. д. в производственной системе ремонтного предприятия их количество выбирается с некоторым запасом.

С одной стороны, в системе присутствует избыточность производственных ресурсов, с другой, часто возникает ситуация, при которой очередная заявка оказывается отложенной ввиду отсутствия необходимого свободного оборудования. Возникает необходимость рационального распределения производственных ресурсов. Необходим обоснованный состав парка технологического оборудования. При малой загрузке производственной системы выполнение поступающих заявок происходит независимо друг от друга. Однако с увеличением их числа появляется трудность их выполнения вследствие ограниченных возможностей производственной системы предприятия. Отдельно взятое  $i$ -е ремонтное предприятие обладает объемом технологических возможностей  $VR_i$ , который определяется как:

$$VR_i = \bigcup_{j=1}^{m_i} (vr_{i,j}),$$

где  $m_i$  – количество единиц технологического оборудования в  $i$ -й ремонтной организации;  $vr_{i,j}$  – количество вариантов использования технологических возможностей  $j$ -й единицы технологического оборудования  $i$ -й ремонтной организации.

Полный объем технологических возможностей  $VD_i$  производственной системы  $i$ -го предприятия, требующийся для выполнения плановых работ:

$$VD_i = \bigcup_{j=1}^{m_i} (\bigcup_{k=1}^{h_{i,j}} vd_{i,j,k}),$$

где  $m_i$  – количество заявок, выполняемых  $i$ -м ремонтным предприятием;  $h_{i,j}$  – количество операций, необходимых для выполнения  $j$ -й заявки;  $vd_{i,j,k}$  – объем технологических возможностей для выполнения  $k$ -й операции  $m_i$  ремонтной заявки.

Если производственные возможности ремонтной организации не обеспечивают даже частичного выполнения заявки, это означает несовпадение множества технологических операций, выполняемых предприятием, и операций, требуемых согласно заявке:

$$VS_i \not\subset VD_i.$$

При частичном совпадении множеств заявка может быть выполнена также частично:

$$VS_i \cap VD_i.$$

В этом случае полное выполнение заявки возможно при использовании возможностей другого ремонтного предприятия. Объединение технологических возможностей нескольких ремонтных организаций позволяет выполнить необходимый объем требуемых работ.

В идеальном случае ремонтная организация способна выполнить весь объем работ заявки при условии совпадения требуемого объема работ и возможностей производственной системы предприятия:

$$VS_i \supset VD_i.$$

Однако и в этом случае возникают ограничения, связанные с занятостью оборудования, выполняющего работы по другим заявкам. На основании сказанного можно сделать вывод о целесообразности объединения в организационное целое свободных частей производственных систем различных ремонтных предприятий. Для реализации такого подхода

необходим оперативный информационный обмен данными между отдельными ремонтными организациями. Как показывает практика, даже внутри одной организации часто отсутствуют в достаточном объеме информационные связи и механизмы их поддержания между отдельными подразделениями.

Производственная система обладает ресурсной базой, которая представляет собой массив технологических возможностей. Совокупность оборудования, незанятая в текущий момент времени по всем ремонтным предприятиям, может рассматриваться как обобщенная производственная система. С учетом текущего планирования работ в производственной системе предприятия объем обобщенной производственной системы в каждый момент времени достаточно хорошо прогнозируется [15].

Множество технологических элементов производственной системы образует массив, характеризующий ее способность выполнять работы по ремонту сельскохозяйственной техники:

$$WO = f\left(\bigcup_{i=1}^n VD_i; K_{vs1}, K_{vs2}, \dots, K_{vsi}, \dots, K_{vsn}\right),$$

где  $K_{vsi}$  – количество одинаковых единиц технологического оборудования  $i$ -го типа.

Из этого выражения следует, что первая составляющая определяет объем разнородных типов технологических операций, тогда как вторая определяет пропускную способность по повторяющимся технологическим операциям.

Состояние обобщенной производственной системы определяется конфигурацией ее структуры и значений параметров составляющих ее элементов и изменяется скачкообразно в момент наступления очередного события. В периоды времени между наступлениями отдельных событий значения параметров могут меняться плавно и описываться аналитическими выражениями в виде их зависимостей от времени.

Событиями могут быть остановка технологического оборудования для проведения регламентных работ, поломка, поступление новой заявки.

Система мониторинга отслеживает поступление очередного события и загружает его в виде соответствующего параметра в математическую модель. В математической модели инициируется перерасчет состояния производственной системы и определяется объем и состав ее свободной части.

### Результаты исследования

При поиске рационального варианта распределения работ согласно поступающим заявкам цифровая модель позволяет верифицировать формируемые варианты загрузки. Может оказаться рациональным использование для выполнения требуемых операций технологического оборудования, непредназначенного напрямую для их проведения. В условиях, когда требуемое по разработанному технологическому процессу оборудование занято другими работами оказывается целесообразным использование оборудования, свободного в текущий период времени. Такой подход, с одной стороны, увеличивает пропускную способность производственной системы, с другой, повышает степень загрузки оборудования. Дополнительные затраты, возникающие при этом, могут оказаться ниже экономических потерь, вызванных ожиданием требуемого технологического оборудования. Общий объем затрачиваемых ресурсов в этом случае:

$$Q_1 = \sum q_{\text{баз}} + \sum q_{\text{доп}},$$

где  $q_{\text{баз}}$  – ресурсы, затрачиваемые на переналадку оборудования базового технологического процесса;  $q_{\text{доп}}$  – ресурсы, затрачиваемые на переналадку оборудования, используемого вне базового технологического процесса.

Целевая функция, описывающая затраты на выполнение ремонтно-восстановительных работ, в обобщенной

системе должна стремиться к минимальной величине:

$$Q_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n K_{1i} Q_{1i} + \sum_{j=1}^m K_{2j} Q_{2j} \min,$$

где  $Q_{\text{сум}}$  – сумма затрат на выполнение ремонтно-восстановительных работ в обобщенной производственной системе;  $Q_1$  – себестоимость проведенных в рамках поступивших заявок на проведение ремонтно-восстановительных работ;  $Q_2$  – дополнительные затраты, обусловленные невыполнением работ по поступившим заявкам в срок;  $K_1, K_2$ , – коэффициенты, отражающие степень значимости соответствующих затрат.

На следующем этапе задачей цифровой математической модели является поиск рациональной структуры производственной системы. Математическая модель построена в виде имитационной модели, структура которой варьируется в зависимости от результатов программирования ее реакции на возмущающие воздействия. Такими воздействиями являются, прежде всего, получение заявок на выполнение ремонтно-восстановительных работ, которые можно отнести к внешним, и внутренние, указанные выше. Так как варьирование параметров схемы носит нематериальный характер и осуществляется в машинном масштабе времени, то результаты моделирования получаются в короткие сроки, что позволяет организовать итерационный процесс нахождения рационального решения. Количество итераций, которые можно осуществить в установленные сроки, достаточно, чтобы получить достоверный результат.

Для обеспечения адекватности цифровой математической модели в реальной системе необходим постоянный мониторинг ключевых точек производственной системы. Для этого необходима организация автоматизированных рабочих мест административного аппарата предприятия, начиная с мастеров участков, начальников цехов и выше. Величины затрат времени на перена-

ладку технологического оборудования определяются статистическими данными или рассчитываются по нормативам. Попутно проводится обследование и совершенствование технологической оснастки для снижения трудоемкости и временных затрат. Назначение технологического оборудования проводится с учетом минимального превышения необходимого объема технологических возможностей.

Цифровая математическая модель обобщенной производственной системы обладает свойствами прогнозируемости, устойчивости, живучести, управляемости и наблюдаемости. Прогнозирование состояния производственной системы на протяжении некоторого перспективного периода времени рассматривается в одной из работ [14]. Под живучестью системы понимается ее свойство сохранять работоспособность при возникновении сценариев, при которых система теряет работоспособность в рамках допустимых условий. Такая ситуация может возникнуть в случае принятия неправильных производственных решений. Обеспечение живучести системы в данном случае достигается последовательной фиксацией промежуточных значений параметров, осуществляемой по факту наступления очередного события. Использование значения параметров предыдущих этапов позволяет вернуть систему в предшествующее состояние, из которого путем выполнения скорректированного производственного решения возможно получение рационального результата. Состояние системы до осуществления процесса управления (предшествующий момент времени) представлено в виде матрицы-столбца:

$$H^- = \begin{pmatrix} h_1^- \\ h_2^- \\ \dots \\ h_n^- \end{pmatrix},$$

где  $h_i^-$  – значение  $i$ -го параметра системы в предшествующий момент времени, на что указывает индекс «-».

Управляемость состоянием производственной системы достигается наличием информационных связей между структурными подразделениями как внутри, так и между отдельными предприятиями. Моделирование информационных связей позволяет оценить степень управляемости и обеспечивает нахождение лучшей структуры.

Если при управлении производственной системой можно сформировать управляющее воздействие  $G(t)$ , переводящее ее из текущего состояния  $H$  в желаемое состояние  $H^+$  в течение заданного интервала времени  $t_0 \leq t \leq t_1$ , такая система рассматривается как управляемая. Параметр  $G(t)$  определяется исходя из накопленного опыта и на основе итерационного подхода при имитационном моделировании.

Для обеспечения наблюдаемости протекания производственных процессов в системе предусмотрена информационная выборка из ее ключевых точек. Выборка осуществляется как в автоматическом режиме, так и через оператора, для чего он снабжен расширенным интерфейсом, позволяющим не только отражать текущее состояние параметров, но и преобразовывать информацию в виде статистических данных, представленных в виде графиков, схем и т. д. Оператор может варьировать локальные параметры части производственной системы, находящейся в его ведении, с целью выбора лучших локальных параметров без нарушения общей стратегии управления.

Значения выходных параметров  $H^+$  последующего состояния системы могут быть получены на основе имеющихся текущих значений параметров  $H$  и информационных преобразующих связей:

$$H^+ = WH.$$

Внутренние информационные связи системы могут быть представлены в виде матрицы  $W$ :

$$W = \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1i} & \dots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2i} & \dots & w_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{nq} & w_{n2} & \dots & w_{ni} & \dots & w_{nn} \end{pmatrix}.$$

При отсутствии в матрице  $W$  столбцов, содержащих элементы, равные нулю, система является наблюдаемой. Целевая функция, используемая при нахождении рационального варианта структуры информационных связей производственной системы, описывается формулой:

$$\sum_{i=1}^n \delta_i(t) = \sum_{i=1}^n (G_i(t) - H_i(t)),$$

где  $\delta_i(t)$  – величина отклонения параметров состояния производственной системы в результате осуществления процесса управления на  $i$ -м этапе;  $G_i(t)$ ,  $H_i(t)$  – заданные и реально полученные параметры системы после завершения процесса управления на  $i$ -м этапе.

Критерием успешного завершения процесса управления на  $i$ -м этапе является величина отклонения параметра целевой функции от нулевого значения. Целевая функция для  $i$ -го выходного параметра с учетом наличия обратных информационных связей имеет вид:

$$H_i(P) = G_i(P) \frac{\sum_{m=1}^j K_m W_i(P)}{W_i(P) \sum_{m=1}^j K_m + 1} \sum_{n=1}^l K_n,$$

где  $W_i(P)$  – передаточная функция изменения  $i$ -го параметра при отсутствии обратной информационной связи;  $K_m$  – показатель степени достоверности информации получаемого от  $m$ -го элемента, охваченного обратной связью;

$K_n$  – показатель степени достоверности информации от  $n$ -го элемента, не охватывающий обратной связи.

Согласно теореме о конечном значении полученное выражение можно представить как:

$$H_i(P) = G_i(P) \lim_{P \rightarrow 0} \left[ \frac{\sum_{m=1}^i K_m W_i(P)}{W_i(P) \sum_{m=1}^i K_m + 1} \sum_{n=1}^L K_n \right] = G_i(P) \sum_{n=1}^L K_n.$$

Отсюда следует, что основным путем повышения эффективности управления является развитие информационных обратных связей в совокупности с итерационным подходом при цифровом математическом моделировании. С увеличением числа итераций эффективность вырабатываемых решений управления увеличивается за счет формирования корректирующих воздействий:

$$\delta_i = G_i(P) \left[ 1 - \sum_{n=1}^L K_n \right] \rightarrow \min.$$

Эффективность управления объектом производственной системой ремонтных предприятий повышается при охватывании итерационным процессом максимального числа элементов производственной системы. Внедрение цифровой математической модели для принятия эффективных процессов управления позволяет осуществлять оптимизационные процессы

при распределении заявок на ремонтно-восстановительные работы сельскохозяйственной техники, упорядочивать их и снижать сроки выполнения.

Разработанная цифровая модель производственной системы описывает ее состояние во времени, благодаря чему появляется возможность прогнозирования ее состояния на интересующий перспективный период времени. Сравнение результатов моделирования, получаемых на различных итерационных этапах, позволяет находить и аккумулировать наиболее удачные варианты производственных решений, а также выработать предложения по обновлению парка технологического оборудования производственных систем ремонтных предприятий.

### Обсуждение и заключение

Предложенный метод является шагом к формированию комплексного подхода к организации ремонтно-восстановительных работ сельскохозяйственной техники. При таком подходе ремонтные предприятия совместно с потребителями этой техники получают возможность формирования графика регламентных работ, исходя из фактического состояния конкретных элементов техники. Одновременно накопление знаний в области удачных производственных решений позволяет упорядочить парк ремонтно-восстановительной техники ремонтных предприятий за счет более полной загрузки технологического оборудования, повышения производительности и снижения трудоемкости проводимых работ.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Акашев, З. Т. Методология совершенствования и выбора структуры технологических процессов горнодобывающих предприятий / З. Т. Акашев // Тяжелое машиностроение. – 2005. – № 12. – С. 17–19. – Рез. англ.
2. Corporate Knowledge Management in Ramp-Up Conditions: the Stakeholder Interests Account, the Responsibility Centers Allocation / J. Y. Yeleneva, A. A. Kharin, K. S. Yelenev [et al.]. – DOI [10.1016/j.cirpj.2017.12.002](https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.12.002) // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2018. – Vol. 23. – Pp. 207–216. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S175558171730072X> (дата обращения: 18.11.2020).

3. **Андреев, В. Н.** Оценка качества производственного менеджмента как инструмент формирования системы управления созданием и развитием конкурентоспособных машиностроительных предприятий / В. Н. Андреев, М. Е. Пrowseва // Главный механик. – 2010. – № 8. – С. 27–31. – Рез. англ.
4. **Ягопольский, А. Г.** Проблемы инновационного развития машиностроения России / А. Г. Ягопольский, А. А. Домнышев, Е. А. Воронцов // Инновации и инвестиции. – 2019. – № 2. – С. 7–9. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemny-innovatsionnogo-razvitiya-mashinostroeniya-rossii> (дата обращения: 18.11.2020). – Рез. англ.
5. **Martinov, G. M.** Numerical Control of Large Precision Machining Centers by the AxIOMA Control System / G. M. Martinov, N. V. Kozak. – DOI 10.3103/S1068798X15070114 // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35, Issue 7. – Pp. 534–538. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103%2F1068798X15070114> (дата обращения: 18.11.2020). – Рез. англ.
6. **Кузнецов, П. М.** Целеустремленная среда проектно-операционного управления / П. М. Кузнецов, Г. А. Цыркв // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2017. – № 4. – С. 10–14. – Рез. англ.
7. Проектно-операционное управление в машиностроительном производстве / А. В. Цыркв, П. М. Кузнецов, Г. А. Цыркв [и др.]. – DOI 10.15507/0236-2910.028.201804.511-522 // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 4. – С. 511–522. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/75-18-4/565-10-15507-0236-2910-028-201804-3> (дата обращения: 18.11.2020). – Рез. англ.
8. **Борзенков, В. В.** Автоматизированное проектирование технологического процесса обработки деталей на основе их макроэлементной структуры / В. В. Борзенков, Н. П. Дьяконова // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2005. – № 1. – С. 18–21. – URL: <http://vkit.ru/index.php/archive-rus/102-01> (дата обращения: 18.11.2020).
9. **Maksimovskii, D. E.** Automation of Process Design by Design-Technological Parameterization / D. E. Maksimovskii. – DOI 10.3103/S1068798X1109019X // Russian Engineering Research. – 2011. – Vol. 31, Issue 9. – Pp. 870–872. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068798X1109019X#citeas> (дата обращения: 18.11.2020).
10. Informational Relational Models for Calculating the Cutting Conditions in Automatic Control Systems / S. Yu. Kalyakulin, V. V. Kuzmin, E. V. Mitin, S. P. Suldin. – DOI 10.3103/S1068798X18120250 // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38, Issue 12. – Pp. 1049–1052. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103%2F1068798X18120250#citeas> (дата обращения: 18.11.2020).
11. Проектирование структуры технологических процессов на основе синтеза / С. Ю. Калякулин, В. В. Кузьмин, Э. В. Митин [и др.]. – DOI 10.15507/0236-2910.028.201801.077-084 // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 1. – С. 77–84. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/58-18-1/385-10-15507-0236-2910-028-201801-06> (дата обращения: 18.11.2020). – Рез. англ.
12. САПР при моделировании режимов технологических процессов производства элементов конструкций летательных аппаратов / В. Ю. Астапов, Л. Л. Хорошко, П. Афшари, А. Л. Хорошко // Труды МАИ. – 2016. – Вып. 87. – 20 с. – URL: [http://trudymai.ru/upload/iblock/207/astapov\\_khoroshko\\_afshari-payam\\_khoroshko\\_rus.pdf?lang=ru&issue=87](http://trudymai.ru/upload/iblock/207/astapov_khoroshko_afshari-payam_khoroshko_rus.pdf?lang=ru&issue=87) (дата обращения: 18.11.2020).
13. **Stephenson, D. A.** Metal Cutting Theory and Practice / D. A. Stephenson, J. S. Agapiou. – DOI 10.1201/9781315373119. – 3<sup>rd</sup> ed. – Boca Raton : CRC Press, 2016. – 969 p. – URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781315373119> (дата обращения: 18.11.2020).
14. **Weis, B. X.** From Idea to Innovation. A Handbook for Inventors, Decision Makers and Organizations / B. X. Weis. – DOI 10.1007/978-3-642-54171-1. – Heidelberg : Springer-Verlag Berlin, 2015. – 263 p. – URL: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-642-54171-1> (дата обращения: 18.11.2020).
15. **Кузнецов, П. М.** Цифровизация процессов восстановления дробильно-измельчительного оборудования / П. М. Кузнецов, Л. Л. Хорошко. – DOI 10.25018/0236-1493-2019-10-0-195-205 // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 10. – С. 195–205. – URL: <http://giab-online.ru/catalog/12886> (дата обращения: 18.11.2020). – Рез. англ.
16. Algorithms, Mechanisms and Procedures for the Computer-Aided Project Generation System / A. O. Butko, A. P. Briukhovetskii, D. E. Grigoriev, K. S. Kalashnikov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12, Issue 24. – Pp. 14199–14207. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/329683563\\_Algorithms\\_mechanisms\\_and\\_procedures\\_for\\_the\\_computer-aided\\_project\\_generation\\_system](https://www.researchgate.net/publication/329683563_Algorithms_mechanisms_and_procedures_for_the_computer-aided_project_generation_system) (дата обращения: 18.11.2020). – Рез. англ.

17. Бутко, А. О. Алгоритмы подсистемы автоматизации построения проектов в составе комплекса анализа организационно-технических решений / А. О. Бутко, Д. А. Колесников // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2018. – № 3. – С. 3–9. – URL: [http://izdat.ntckompas.ru/editions/magazine\\_news/detail.php?ELEMENT\\_ID=23671&SECTION\\_ID=159&ID=174](http://izdat.ntckompas.ru/editions/magazine_news/detail.php?ELEMENT_ID=23671&SECTION_ID=159&ID=174) (дата обращения: 18.11.2020). – Рез. англ.

18. Дмитриев, Б. М. Диагностика технического состояния гибкой производственной системы / Б. М. Дмитриев // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2018. – № 1. – С. 10–14. – URL: [http://www.nait.ru/journals/number.php?p\\_number\\_id=2724](http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2724) (дата обращения: 18.11.2020). – Рез. англ.

19. Self-Programming of the Tool Trajectory in CNC Lathes / V. A. Timiryazev, M. Z. Khostikoev, V. N. Konoplev, A. V. Vetyugov. – DOI 10.3103/S1068798X19020114 // Russian Engineering Research. – 2019. – Vol. 39. – Pp. 154–157. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103%2FS1068798X19020114#citeas> (дата обращения: 18.11.2020).

*Поступила 02.07.2020; принята к публикации 16.09.2020; опубликована онлайн 30.12.2020*

*Об авторах:*

**Хорошко Леонид Леонидович**, заведующий кафедрой системного моделирования и автоматизированного проектирования ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (125993, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4), кандидат технических наук, профессор, Researcher ID: P-2951-2014, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7487-8997>, Scopus ID: 14039206400, [khoroshko@mati.ru](mailto:khoroshko@mati.ru)

**Кузнецов Павел Михайлович**, профессор кафедры системного моделирования и автоматизированного проектирования ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (125993, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4), доктор технических наук, Researcher ID: K-8831-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9237-3848>, [profpol@ Rambler.ru](mailto:profpol@ Rambler.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

Л. Л. Хорошко – научное руководство, постановка задачи исследования, анализ литературных данных; П. М. Кузнецов – разработка математического аппарата моделей проектирования.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Akashev Z.T. Methodology of Improvement and Selection of the Structure of Mining Enterprises Technological Processes. *Tyazheloye mashinostroeniye* = Heavy Engineering. 2005; (12):17-19. (In Russ.)
2. Yeleneva J.Y., Kharin A.A., Yelenev K.S., et al. Corporate Knowledge Management in Ramp-Up Conditions: the Stakeholder Interests Account, the Responsibility Centers Allocation. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2018; 23:207-216. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.12.002>
3. Andreev V.N., Prosvirina M.Ye. Evaluation of Production Management Quality as a Tool for Management System Formation and Development of Competitive Machine-Building Enterprises. *Glavnyy mekhanik* = Chief Mechanical Engineer. 2010; (8):27-31. (In Russ.)
4. Yagopolskiy A.G., Domnyshev A.A., Vorontsov Ye.A. Problems of Innovative Development of Mechanical Engineering in Russia. *Innovatsii i investitsii* = Innovation and Investment. 2019; (2):7-9. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-innovatsionnogo-razvitiya-mashinostroeniya-rossii> (accessed 18.11.2020). (In Russ.)
5. Martinov G.M., Kozak N.V. Numerical Control of Large Precision Machining Centers by the AXIOMA Control System. *Russian Engineering Research*. 2015; 35(7):534-538. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X15070114>
6. Kuznetsov P.M., Tsyrov G.A. The Purposeful Environment of Project and Operational Management. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve* = Information Technologies of CAD/CAM/CAE. 2017; (4):10-14. (In Russ.)
7. Tsyrov A.V., Kuznetsov P.M., Tsyrov G.A., et al. Project and Operations Management of Machine-Building (Production). *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(4):511-522. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.511-522>

*Technologies and maintenance means in agriculture*

8. Borzenkov V.V., Dyakonova N.P. [Automated Design of Technological Process of Parts Processing on the Basis of Their Macroelement Structure]. *Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologii* = Bulletin of Computer and Information Technologies. 2005; (1):18-21. Available at: <http://vkit.ru/index.php/archive-rus/102-01> (accessed 18.11.2020). (In Russ.)
9. Maksimovskii D.E. Automation of Process Design by Design-Technological Parameterization. *Russian Engineering Research*. 2011; 31(9):870-872. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X1109019X>
10. Kalyakulin S.Yu., Kuzmin V.V., Mitin E.V., et al. Informational Relational Models for Calculating the Cutting Conditions in Automatic Control Systems. *Russian Engineering Research*. 2018; 38(12):1049-1052. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X18120250>
11. Kalyakulin S.Yu., Kuzmin V.V., Mitin E.V., et al. Designing the Structure of Technological Processes Based on Synthesis. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(1):77-84. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201801.077-084>
12. Astapov V.Yu., Khoroshko L.L., Afshari P., et al. [CAD at Modeling of Modes of Technological Processes of Manufacture of Elements of Aircraft Constructions]. *Trudy MAI* = Works of MAI. 2016; 87. 20 p. Available at: [http://trudymai.ru/upload/iblock/207/astapov\\_khoroshko\\_afshari-payam\\_khoroshko\\_rus.pdf?lang=ru&issue=87](http://trudymai.ru/upload/iblock/207/astapov_khoroshko_afshari-payam_khoroshko_rus.pdf?lang=ru&issue=87) (accessed 18.11.2020). (In Russ.)
13. Stephenson D.A., Agapiou J.S. *Metal Cutting Theory and Practice*. 3<sup>rd</sup> ed. Boca Raton: CRC Press; 2016. 969 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315373119>
14. Weis B.X. *From Idea to Innovation. A Handbook for Inventors, Decision Makers and Organizations*. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin; 2015. 263 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-54171-1>
15. Kuznetsov P.M., Khoroshko L.L. Digitization of Crushing and Milling Equipment Reconditioning. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten* = Mining Informational and Analytical Bulletin. 2019; (10):195-205. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-10-0-195-205>
16. Butko A.O., Briukhovetskii A.P., Grigoriev D.E., et al. Algorithms, Mechanisms and Procedures for the Computer-Aided Project Generation System. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017; 12(24):14199-14207. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/329683563\\_Algorithms\\_mechanisms\\_and\\_procedures\\_for\\_the\\_computer-aided\\_project\\_generation\\_system](https://www.researchgate.net/publication/329683563_Algorithms_mechanisms_and_procedures_for_the_computer-aided_project_generation_system) (accessed 18.11.2020). (In Eng.)
17. Butko A.O., Kolesnikov D.A. [Algorithms of the Subsystem of Project Construction Automation as Part of the Complex Analysis of Organizational and Technical Solutions]. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve* = Information Technologies in Design and Manufacturing. 2018; (3):3-9. Available at: [http://izdat.ntckompas.ru/editions/magazine\\_news/detail.php?ELEMENT\\_ID=23671&SECTION\\_ID=159&ID=174](http://izdat.ntckompas.ru/editions/magazine_news/detail.php?ELEMENT_ID=23671&SECTION_ID=159&ID=174) (accessed 18.11.2020). (In Russ.)
18. Dmitriyev B.M. Diagnosis of Technical State of Flex Production System. *Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya* = Repair, Reconditioning, Modernization. 2018; (1):10-14. Available at: [http://www.nait.ru/journals/number.php?p\\_number\\_id=2724](http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2724) (accessed 18.11.2020). (In Russ.)
19. Timiryazev V.A., Khostikoev M.Z., Konoplev V.N., et al. Self-Programming of the Tool Trajectory in CNC Lathes. *Russian Engineering Research*. 2019; 39:154-157. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19020114>

*Received 02.07.2020; revised 16.09.2020; published online 30.12.2020*

*About the authors:*

**Leonid L. Khoroshko**, Head of the Chair of System Modeling and Computer-Aided Design, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: P-2951-2014, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7487-8997>, Scopus ID: 14039206400, [khoroshko@mati.ru](mailto:khoroshko@mati.ru)

**Pavel M. Kuznetsov**, Professor of the Chair of System Modeling and Computer-Aided Design, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: K-8831-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9237-3848>, [profpol@rambler.ru](mailto:profpol@rambler.ru)

*Contribution of the authors:*

L. L. Khoroshko – scientific guidance, formulation of research task, literature data analysis;  
P. M. Kuznetsov – mathematical apparatus development of design models.

*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:

01.04.01 Приборы и методы экспериментальной физики

01.04.05 Оптика

01.04.13 Электрофизика, электрофизические установки

05.20.01 Технологии и средства механизации сельского хозяйства

05.20.02 Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве

05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве

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(и) (требуется указать все места работы автора, в которых выполнялись исследования (постоянное место, место выполнения проекта и др.)), должность и ученое звание, ORCID, Researcher ID, электронная почта, телефон, почтовый адрес для отправки авторского экземпляра. *Приводится на русском и английском языках.*

9. **Заявленный вклад соавторов.** В конец рукописи необходимо включить примечания, в которых разъясняется фактический вклад каждого соавтора в выполненную работу. *Приводится на русском и английском языках.*

#### 10. Техническое оформление.

1) Редакция принимает тексты, сохраненные в формате .doc, .docx, .rtf. Желательно использовать шрифт Times New Roman, кегль 14 и интервал 1,5 строки. Расстановка переносов вручную не допускается. Запрещается использовать двойные пробелы в тексте, а также выполнять отступы (красная строка), используя пробелы.

2) Формулы набираются сочетанием основного шрифта и шрифта Symbol (исключение для дробей, сумм, квадратного корня) в Microsoft Equation 3.0 (Редактор формул в Microsoft Word) или Math Type 6. Латинские знаки в формулах и обозначениях (как в тексте, так и на рисунках) набираются курсивом. Формулы нумеруются в круглых скобках. Нумеровать следует только те формулы и уравнения, на которые есть ссылка в последующем изложении.

3) Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

4) Рисунки могут быть представлены в растровом или векторном формате с разрешением не ниже 300 dpi. Они должны допускать редактирование текста и возможность изменения размеров. Все графические данные помещаются в текст статьи, а также высылаются дополнительно в виде отдельных файлов. Разнохарактерные иллюстрации необходимо приводить к единому стилю графического исполнения, соблюдая единообразие их оформления. Графики, схемы и диаграммы необходимо оформлять в Microsoft Excel.

При подаче статьи в редакцию автор соглашается с положениями прилагаемого лицензионного договора.

Важным этапом в процессе отбора статьи является рецензирование. В журнале «Инженерные технологии и системы» принято «двойное слепое» (рецензент и автор не знают имен друг друга) рецензирование статей. Рецензент на основании анализа статьи принимает решение о рекомендации ее к публикации или о ее отклонении. В случае несогласия автора статьи с замечаниями рецензента его мотивированное заявление рассматривается редакционной коллегией.

Политика редакционной коллегии журнала базируется на современных юридических требованиях в отношении клеветы, авторского права, законности и плагиата, поддерживает Кодекс этики научных публикаций, сформулированный Комитетом по этике научных публикаций, и строится с учетом этических норм работы редакторов и издателей, закрепленных в Кодексе поведения и руководящих принципах наилучшей практики для редактора журнала и Кодексе поведения для издателя журнала, разработанных Комитетом по публикационной этике.

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 в каталоге агентства «Роспечать» – 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 and Means of Agricultural Mechanization  
Electrotechnologies and Electrical Equipment in Agriculture  
Technologies and Maintenance Means in Agriculture

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.

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 in the catalogue of the agency of Rospechat 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 14.12.2020 г. Дата выхода в свет 30.12.2020 г.

Формат 70 × 100<sup>1/16</sup>. Усл. печ. л. 17,23.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 250 экз. Заказ № 1539. 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 14.12.2020. Date of publishing 30.12.2020.

Sheet size  $70 \times 100 \frac{1}{16}$ . Conventional printed sheets 17,23.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 250 copies. Order no. 1539. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation  
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)

