

DOI: 10.15507/2658-4123.031.202101 ISSN 2658-4123 (Print), 2658-6525 (Online)

**Том 31, № 1. 2021**

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

**16+**



**Vol. 31, no. 1. 2021**

SCIENTIFIC JOURNAL  
Founded in January 1990  
Issued quarterly

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

DOI: 10.15507/2658-4123

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

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

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

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

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

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

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

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

Подписной индекс – **70539**

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

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

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

## Научный журнал «Инженерные технологии и системы»

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

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

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

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

Распространение – Российская Федерация, зарубежные страны.

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

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

01.04.01 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), Committee on Publication Ethics (COPE), Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), CrossRef и международного сообщества рецензентов Publons

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



### **The scientific journal Engineering Technologies and Systems**

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

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

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

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

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

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

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

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

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



## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Вдовин Сергей Михайлович** – *главный редактор*, ректор ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат экономических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-7363-1389, rector@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 кафедры мехатроники и гидропневмоавтоматики ФГБОУ ВО «Ожно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова», доктор технических наук, ORCID: 0000-0003-4261-9840 (Новочеркасск, Российская Федерация)

**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, Scopus ID: 56662851300 (Саранск, Российская Федерация)

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

**Игумнов Леонид Александрович** – 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, ORCID: 0000-0003-3035-0119 (Нижний Новгород, Российская Федерация)

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

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

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

**Кусмарцев Федор Васильевич** – декан физического факультета Университета Лафборо, кандидат физико-математических наук, Scopus ID: 7006372417 (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** – заведующий кафедрой электроники ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», доктор технических наук, доцент, Scopus ID: 8542764000 (Москва, Российская Федерация)

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

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

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

**Салем Абдель-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, ORCID: 0000-0003-0268-6539 (Каир, Египет)

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

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

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

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



## EDITORIAL BOARD

- Sergey M. Vdovin** – *Editor in Chief*, Rector of National Research Mordovia State University, Cand.Sc. (Economics), Associate Professor, ORCID: [0000-0001-7363-1389](#), [rector@mrsu.ru](mailto: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](mailto: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](mailto:vestnik_mrsu@mail.ru) (Saransk, Russian Federation)
- Surhay Allahverdi** – Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Head of the Forest Industry Chair, Bartin University, Professor of the Ecology and Nature Management Chair, Moscow Pedagogical State University, D.Sc. (Biology), Professor (Bartın, Turkey)
- Aleksey G. Bulgakov** – Professor of the Chair of Mechatronics and Hydropneumatics, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), D.Sc. (Engineering), ORCID: [0000-0003-4261-9840](#) (Novocherkassk, Russian Federation)
- Ivan I. Chuchayev** – Dean of the Mathematics and Information Technology Faculty, National Research Mordovia State University, Cand.Sc. (Phys.-Math.), Associate Professor (Saransk, Russian Federation)
- Valeriy P. Dimitrov** – Head of the Chair of Quality Management, Don State Technical University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: [0000-0003-1439-1674](#) (Rostov-on-Don, Russian Federation)
- Leonid A. Igumnov** – Director of the Research Institute of Mechanics, Head of the Numerical Simulation of Theoretical, Computer and Experimental Mechanics Chair, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, ORCID: [0000-0003-3035-0119](#) (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 the Innovation Management Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), Editor-in-Chief, Photonics Russia, D.Sc. (Phys.-Math.), ORCID: [0000-0001-6008-1226](#) (Moscow, Russian Federation)
- Vladimir N. Kechemaykin** – Director of the Ruzaevka Institute of Mechanical Engineering, National Research Mordovia State University, Cand.Sc. (Economics) (Saransk, Russian Federation)
- Aleksandr V. Kotin** – Professor of the Chair of Mechanization of Agricultural Production Processing, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Engineering), ORCID: [0000-0001-8235-0052](#) (Saransk, Russian Federation)
- Fedor V. Kusmartsev** – Head of Physics Department, Loughborough University, Ph.D. (Phys.-Math.), Scopus ID: [7006372417](#) (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** – Head of the Electronics Chair, MIREA – Russian Technological University, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Scopus ID: [8542764000](#) (Moscow, Russian Federation)
- Konstantin N. Nishchev** – Director of Institute of Physics and Chemistry, National Research Mordovia State University, Cand.Sc. (Phys.-Math.), Associate Professor, ORCID: [0000-0001-7905-3700](#) (Saransk, Russian Federation)
- Yuriy N. Prytkov** – Director of Institute of Agriculture, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Agriculture), Professor (Saransk, Russian Federation)
- Polina A. Ryabochkina** – Scientific Director of the Laboratory of Optical Spectroscopy of Laser Materials, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, ORCID: [0000-0001-8503-8486](#) (Saransk, Russian Federation)
- Abdel-Badeeh M. Salem** – Head of Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Research Labs, Professor of Faculty of Computers and Information Sciences, Ain Shams University, D.Sc. (Computer Science), Emeritus Professor, ORCID: [0000-0003-0268-6539](#) (Cairo, Egypt)
- Tamara I. Shishelova** – Professor of the Physics Chair, Irkutsk National Research Technical University, D.Sc. (Engineering), Scopus ID: [6507978465](#) (Irkutsk, Russian Federation)
- Vladimir A. Skryabin** – Professor of the Chair of Technology and Equipment in Mechanical Engineering, Penza State University, D.Sc. (Engineering), ORCID: [0000-0001-7156-9198](#) (Penza, Russian Federation)
- Anatoliy A. Yamashkin** – Dean of Geography Faculty, 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, Scopus ID: [56662851300](#) (Saransk, Russian Federation)
- Olga Ye. Zheleznikova** – Director of Institute of Electronics and Light Engineering, National Research Mordovia State University, Cand.Sc. (Engineering), Associate Professor, Scopus ID: [56362747600](#) (Saransk, Russian Federation)



## **СОДЕРЖАНИЕ**

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

Шерьязов С. К., Попова С. А. Принцип управления свето-температурным режимом для роста тепличных растений (на англ. яз.) .....	8
Сторчак И. Г., Ерошенко Ф. В., Оганян Л. Р., Шестакова Е. О., Калашникова А. А. Возможность оценки степени развития растений озимой пшеницы в период «всходы – кущение» по данным дистанционного зондирования Земли .....	21
Рудик Ф. Я., Богатырев С. А., Ковылин А. П., Тулиева М. С. Повышение эффективности измельчения сахарной свеклы в центробежных свеклорезках .....	37

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

Скобло Т. С., Ключко О. Ю., Автухов А. К., Романченко В. Н., Плугатарёв А. В., Рыбалко И. Н. Упрочнение тонкостенных ножей азотистой плазмой .....	56
Алейников Ю. Г., Дидманидзе О. Н. Моделирование движения опоры шагающей машины с динамической устойчивостью при помощи стенда .....	80
Успенский И. А., Фадеев И. В., Алексеев В. В., Филиппов В. П. Моделирование влияния удобрений на динамику контуров увлажнения при капельном орошении .....	97
Пархоменко Г. Г., Божко И. В., Камбулов С. И., Пахомов В. И. Агротехнические и энергетические показатели почвообрабатывающих рабочих органов .....	109
Федоренко В. Ф., Таркинский В. Е., Мишуров Н. П., Трубицын Н. В. Цифровые методы обработки данных при оценке тягового усилия тракторов .....	127
Купряшкин В. Ф., Уланов А. С., Шляпников М. Г., Гусев А. Ю., Славкин В. И. Разработка подвижного модуля экспериментального стенда для определения тягово-сцепных свойств колесных движителей и результаты лабораторных исследований силы тяги на ведущих колесах мотоблока .....	143

### **ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

Жалнин Р. В., Масыгин В. Ф., Пескова Е. Е., Тишкин В. Ф. Применение метода Галеркина с разрывными базисными функциями к исследованию динамики изменения температуры и давления в пласте с нагнетательной скважиной и трещиной гидроразрыва .....	161
--	-----

Информация для авторов и читателей (на рус. яз.) .....	175
--	-----

Информация для авторов и читателей (на англ. яз.) .....	177
---	-----

## CONTENTS

### TECHNOLOGIES AND MEANS OF AGRICULTURAL MECHANIZATION

Sheryazov S. K., Popova S. A. Light and Temperature Control for Greenhouse Plant Growth .....	8
Storchak I. G., Eroshenko F. V., Oganyan L. R., Shestakova E. O., Kalashnikova A. A. Assessment of Winter Wheat Plant Development during the Seeding and Tillering Stages According to the Earth Remote Sensing Data .....	21
Rudik F. Ya., Bogatyrev S. A., Kovylin A. P., Tulieva M. S. Improving the Efficiency of Grinding Sugar Beet in Centrifugal Beet Cutters .....	37

### PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

Skoblo T. S., Klochko O. Yu., Avtukhov A. K., Romanchenko V. N., Plugatarev A. V., Rybalko I. N. Strengthening Thin-Walled Knives with Nitrogen Plasma .....	56
Aleynikov Yu. G., Didmanidze O. N. Modeling Movement of Supports of Walking Machines with Dynamic Stability by Using a Stand .....	80
Uspensky I. A., Fadeev I. V., Alekseev V. V., Philippov V. P. Modeling the Effect of Fertilizers on the Dynamics of Moisture Contours at Drip Irrigation .....	97
Parkhomenko G. G., Bozhko I. V., Kambulov S. I., Pakhomov V. I. Agrotechnical and Energy Performance of Tillage Tools .....	109
Fedorenko V. F., Tarkivskiy V. E., Mishurov N. P., Trubitsyn N. V. Digital Data Processing Methods for Estimating Tractive Force of Tractors .....	127
Kupryashkin V. F., Ulanov A. S., Shlyapnikov M. G., Gusev A. Yu., Slavkin V. I. Experimental Stand Movable Module for Determining the Traction-Linked Properties of Wheel Engines and the Results of Laboratory Researches for Determining the Traction Force of Two-Wheel Tractors .....	143

### PHYSICS AND MATHEMATICS

Zhalnin R. V., Masyagin V. F., Peskova E. E., Tishkin V. F. Application of the Discontinuous Galerkin Method to the Study of the Dynamics of Temperature and Pressure Changes in a Formation with an Injection Well and a Hydraulic Fracture .....	161
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in Russian).....</i>	<i>175</i>
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in English).....</i>	<i>177</i>

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

УДК 635.918:631.544.41

DOI: [10.15507/2658-4123.031.202101.008-020](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.008-020)

Original article



## Light and Temperature Control for Greenhouse Plant Growth

S. K. Sheryazov\*, S. A. Popova

*South Ural State Agricultural University (Chelyabinsk, Russian Federation)*

\**sakenu@yandex.ru*

**Introduction.** The article deals with the conditions for growing greenhouse plants. Supplementary lighting supports the process of plant photosynthesis and the microclimate in the greenhouse. The authors suggest the ways to reduce energy consumption in greenhouses by controlling the microclimate and process of supplementary lighting in greenhouses.

**Materials and Methods.** Special lighting and temperature are required for growing greenhouse plants. A method of efficient plant growing is light and temperature control. The development of a control algorithm requires the mathematical models that relate the process of photosynthesis to the microclimate parameters. There are given the mathematical models based on the experimental data.

**Results.** The control system and algorithm to control plant-growing conditions have been developed to maintain the greenhouse microclimate. LED lamps are used to control the lighting process. The authors present the developed block diagram of the control system, which contains four channels responsible for the main energy-intensive microclimate factors. The description of the algorithm of the greenhouse light-temperature control is given.

**Discussion and Conclusion.** In conclusion, the need to maintain the greenhouse microclimate and supplementary lighting with the different radiation spectrum for the efficient cultivation of greenhouse plants is shown. The developed structure and control algorithm for the supplementary plant lighting process and greenhouse illumination through using LED lamps help reduce energy consumption.

**Keywords:** greenhouse plants, supplementary lighting, illumination, temperature, greenhouse microclimate, radiation spectrum, control system, control algorithm, LED lamps

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

**For citation:** Sheryazov S.K., Popova S.A. Light and Temperature Control for Greenhouse Plant Growth. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(1):8-20. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.008-020>

© Sheryazov S. K., Popova S. A., 2021



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

## Принцип управления свето-температурным режимом для роста тепличных растений

С. К. Шерьязов\*, С. А. Попова

ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет» (г. Челябинск, Российская Федерация)

\*sakenu@yandex.ru

**Введение.** В статье рассматриваются условия выращивания тепличных растений, среди которых важным фактором является поддержание процесса фотосинтеза путем досвечивания растений и необходимого микроклимата в теплице. Выращивание тепличных растений с помощью снижения потребляемой электроэнергии за счет управления микроклиматом в теплице и процессом досвечивания растений является актуальной задачей.

**Материалы и методы.** Показано, что для выращивания тепличных растений требуются особые условия, поддержание освещенности теплицы и необходимой температуры. Методом эффективного выращивания растения является управление процессом контроля микроклимата и досвечивания. Показано, что для разработки алгоритма управления требуются математические модели, связывающие процесс фотосинтеза с параметрами микроклимата. Приведены математические модели, полученные на основе экспериментальных данных.

**Результаты исследования.** Для поддержания микроклимата в теплице разработана система и алгоритм управления режимами выращивания растений. Для контроля процесса досвечивания и освещенности используются LED-светильники. Приведена разработанная структурная схема системы управления, которая содержит четыре канала, отвечающие за основные энергоемкие факторы микроклимата. В статье содержится описание алгоритма управления свето-температурным режимом теплицы.

**Обсуждение и заключение.** Показана необходимость поддержания микроклимата теплицы и досвечивания растений различным спектром излучения для интенсивного роста светокультурных растений и эффективного выращивания их в условиях теплицы. Разработанные структура и алгоритм управления процессом досвечивания растений и освещенности теплицы на базе LED-светильников позволяют снизить потребление электроэнергии.

**Ключевые слова:** тепличные растения, досвечивание, освещенность, температура, микроклимат теплицы, спектр излучения, система управления, алгоритм управления, LED-светильники

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

**Для цитирования:** Шерьязов, С. К. Принцип управления свето-температурным режимом для роста тепличных растений / С. К. Шерьязов, С. А. Попова. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202101.008-020](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.008-020) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 1. – С. 8–20.

### Introduction

In modern conditions, the production of greenhouse vegetables and greens should be included in the number of important tasks planned by the state program for the development of agriculture and markets for agricultural products, raw materials and food. The program aims to increase the area of greenhouses in Rus-

sia to 5,000 ha by 2020. At the same time, the forecast increase in vegetable production should be about 1.4 million tons, and an increase in gross vegetable production over the off-season period is expected to reach 768.6 thousand tons.

Effective cultivation of greenhouse plants requires maintaining the microclimate and light-cultivated plants lighting.

In fact, maintaining the light-temperature regime for the greenhouse plants growing.

The greenhouse microclimate includes the combination of factors, but the most important of them are temperature and light. Maintaining the given microclimate is energy intensive, and it requires reduction. For this purpose, we consider the process of controlling the consumption mode of electricity depending on the specified microclimate parameters and plant lighting. At the same time, it is important that the technical means and the proposed solutions make it possible to control these processes taking into account their relationship with each other.

Nowadays, sodium lamps are used for lighting, which contain the emission spectrum closest to natural solar radiation. Recommended lighting time is about 20 hours a day. At the same time, their control is not provided due to technical difficulties and leads to a wastage of electricity.

The most promising are LED technology, which is now at the peak of development, in terms of energy conservation. The use of LED elements reduces the energy consumption for lighting various buildings. LED lamps are also successfully integrated into the lighting control system because of the possibility to control the operational level and radiation spectrum without any problems and costs.

To control the process of greenhouse plants growing, it is necessary to simulate the process itself. The development of the control algorithm according to a model characterizing the physiological needs of plants is possible but it is very difficult to produce it because it is necessary to carry out appropriate experimental studies for each light-cultivated plants or species of greenhouse plants.

All existing experimental researches study the individual tasks, for example, the effects on the plants development viewed only in the light levels measured in kiloluxes. Moreover, it has been experimen-

tally shown that individual emission spectra activate various growth properties of plants. It is essential to study the effect of individual emission spectra on the growth of the greenhouse plants.

Insufficient researches in the field of growing greenhouse plants, in particular the influence of light-temperature modes on plant growth conditions, inhibits the development of this branch. Under the circumstances, there is a need to combine research results and to determine the best conditions for growing greenhouse plants as well as to find new engineering solutions acceptable for the entire amount of received scientific information. The development of the necessary energy-saving mode control system is required.

Thus, researches have established the influence of not only light-temperature regimes on plant growing, but also radiation spectra, which are successfully assimilated by plants. Then the development of a control system to maintain the necessary regimes for the greenhouse plants growing is an urgent task. Meanwhile, the popularity of LED irradiators for greenhouse plants lighting has become obvious.

### Literature Review

Certain emission spectra of LED elements are recognized useful for the plant [1–4]. So, the researches show the effect of the blue-red spectrum on the geometry of the plant stem [5–8]. The experimental data prove that the irradiation in the red spectrum influences on the length of the plant's stem and the blue spectrum affects the diameter of the stem [9–11].

The graphs shown in Figure 1 prove that their combined influence on the development of the stem is not unambiguous [12]. These dependences are presented in the form of coded values of the red  $X_1$  and blue  $X_2$  irradiation spectra of LED lamps. These dependences were obtained from the experimental data on the genetically homogeneous material of potatoes grown from meristem cells.



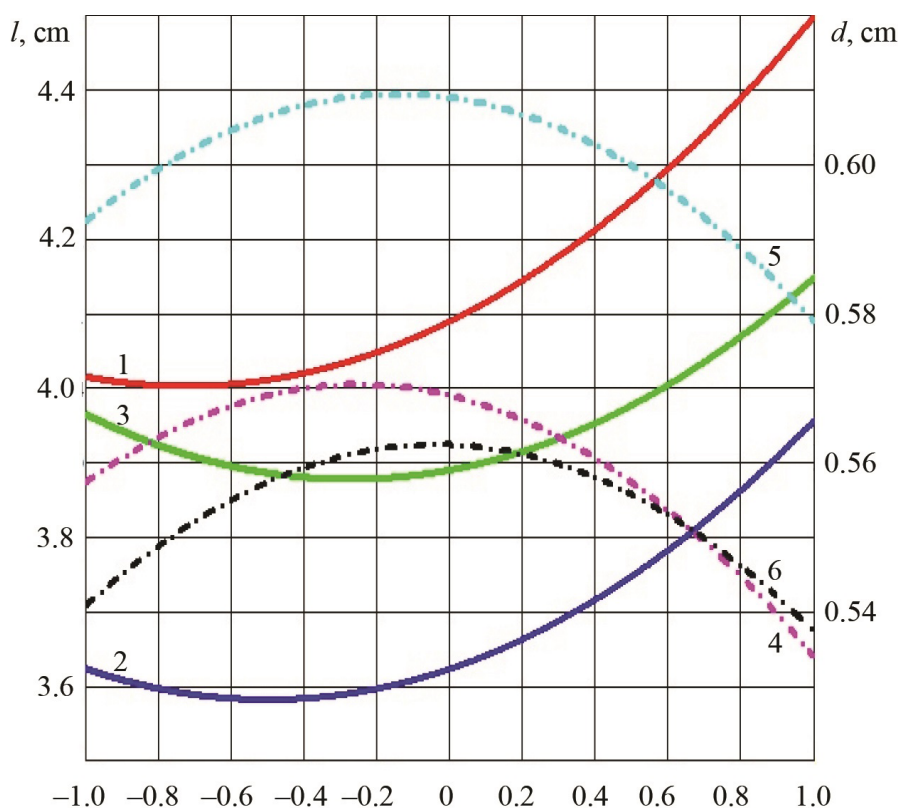


Fig. 1. The dependence of the growth of the stem length  $l$  and the diameter of the greenhouse plants under the irradiation of LED lamps red  $X_1$  and blue  $X_2$  spectra: for  $l$ : 1 –  $X_2 = -1$ ; 2 –  $X_2 = 0$ ; 3 –  $X_2 = +1$ ; for  $d$ : 4 –  $X_2 = -1$ ; 5 –  $X_2 = 0$ ; 6 –  $X_2 = +1$

The analysis of the presented data shows that the growth length of the plant stem has a minimum, and the diameter of this section has a maximum at the same values of the red spectrum irradiation level (Fig. 1,  $X_1$ ). Depending on the combination of levels of blue and red spectra, the curves are shifted in the coordinate axes, but do not have an acceptable general solution, which requires the task of finding the optimal solution.

The task solution requires the development of a mathematical model that describes the growth of the stem geometry to control the regimes of lighting in the greenhouse complexes. Therefore,

the length  $l$  and the diameter  $d$  were taken as a response in the study of the efficiency of the blue-red spectrum on the growth of seed potato plants [12]. The result of the study is the mathematical model of the growth of the length and the diameter of the plant stem:

$$l_{\text{stem}} = 3.622 + 0.167X_1 - 0.1X_2 + 0.167X_1^2 - 0.075X_1X_2 + 0.366X_2^2; \quad (1)$$

$$d_{\text{stem}} = 0.609 - 0.007X_1 - 0.003X_2 - 0.023X_1^2 + 0.005X_1X_2 - 0.043X_2^2. \quad (2)$$

The plants were grown from genetically identical material, which is valuable because the plants reacted equally to environmental conditions and obtained from the research materials, the mathematical models were definitely adequate. However, potatoes do not belong to the standard greenhouse crops; they grow primarily cucumbers, peppers, tomatoes and leafy greens. Nevertheless, the result shows the effect of the individual irradiation spectra on the growth of the greenhouse plants, and for the other plants, the mathematical models of their growth can be obtained.

The development of the mathematical model is also required, linking the conditions for growing plants with the parameters affecting their growth to control the process of maintaining the greenhouse microclimate. The main parameters of the greenhouse microclimate are the light and the temperature.

Thus, growing greenhouse plants is a complex and energy-intensive process. The study of the greenhouse plants growing and the modeling their growth to control this process is an urgent task for reducing energy consumption.

### Materials and Methods

It is possible to control the process of growing greenhouse plants based on special algorithms. Although, it is necessary to maintain the specified microclimate and light parameters related to the photosynthesis indices and plant growth.

The greenhouse plants such as cucumbers and tomatoes belong to the light cultivated plants when a 20-hour lighting is necessary and the duration of their vegetation reaches 10–12 months. During this time, the stems of plants are stretched to 10–12 meters and according to the technology of the growing they are turned into peculiar bays. Here, of course, the geometry of the stem is important, but it is difficult to take into account the amount of radiation received by the plant in a particular spectrum. The result of the lighting is

the unsteady lighting especially along the height of the plant and the light weakly penetrates into the lower level.

Different sources of radiation can be used for plants lighting. Thus, lighting can be received naturally by solar radiation and artificially by lamps, lighting plants in height, upper and lower light for inter-row irradiation, if any.

The lighting in height is required for the plants growth. It will be necessary to control the modes of artificial lighting by various lamps located at both the upper and middle levels in such circumstances.

Currently, sodium lamps that contain the necessary radiation spectrum carry out the upper lighting. In this case, the duration and the control of the lighting process are important, since under general favorable microclimate conditions, photosynthesis quickly decays, as can be seen from the diagram (Fig. 2) obtained experimentally [13–15].

Night lighting of plants with powerful sodium lamps leads to environmental pollution, which, in turn, affects the health of people and animals, flora and insects in the vicinity of the greenhouse complexes [16; 17]. As a result, it becomes important to use LED light sources instead of sodium lamps. The use of new light sources will make it possible to reduce the time of lighting reasonably in the nighttime and the lower location among plants at an average productive level will reduce the environmental impact of light sources.

It is LED sources that can form the optimum effective luminous flux of the necessary spectrum. In combination with the solar, blue-red spectrum of LED lamps will provide the required conditions for the development of the necessary geometry of the light cultivated plants.

The mathematical models like (1) and (2) and already obtained for other plants will allow us to determine the necessary values of red and blue radiation, which should be included as the sources of light-

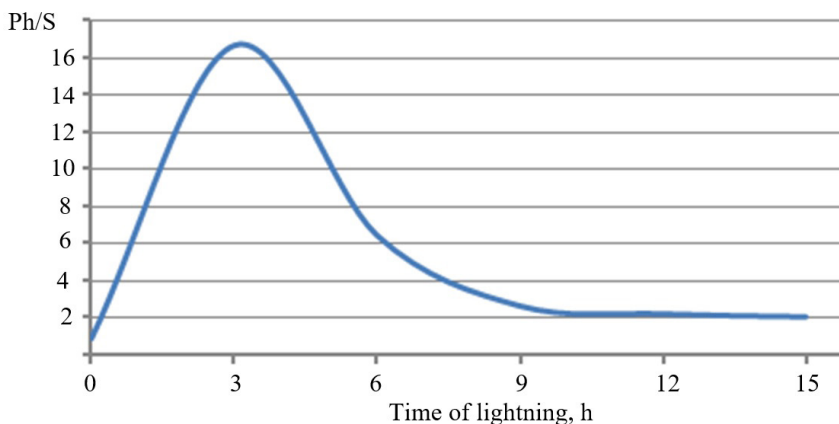


Fig. 2. The dynamics of changes in the intensity of the photosynthesis if  $E = 30$  klx and  $T_1 = 35$  °C

ting, if the natural source of radiation does not provide the necessary plant growth. Moreover, if the lamps for lighting are divided into the upper and middle levels, then the upper light should be turned off after a 12-hour photoperiod to protect the environment. The average level of lighting with LED elements, can be turned on at night without any harm for the environment and the nearest residential areas [18].

The intensity of daytime photosynthesis is the other parameter responsible for the plants response to the changes in environmental factors and most often used by researchers [19; 20]. The intensity of photosynthesis can be fixed using gas analyzers of various designs. These devices are complex and are rarely used as sensors. However, having obtained a mathematical model of the intensity of photosynthesis of a particular culture according to the main factors such as light and temperature, we can use it to develop the algorithm to control light lamps.

Figures 3 and 4 show the dependences of the photosynthesis intensity on the energy-intensive parameters of the environment, the temperature and the light [19].

The Figures 3 and 4 show data at fixed humidity values for the curve: 1 –  $\varphi_1 = 50$  %; 2 –  $\varphi_1 = 60$  %; 3 –  $\varphi_1 = 70$  %;

4 –  $\varphi_1 = 80$  %. In this case, the night temperature was taken equal to  $T_2 = 23$  °C and the duration of the photoperiod  $\tau_1 = 8$  h at the plants age  $\tau_2 = 24$  days. Figure 3 shows the curves under different lighting conditions.

Figure 4 shows the curves under different day temperature conditions

The mathematical model of the following form presents the obtained dependence of cucumber photosynthesis:

$$\begin{aligned}
 Ph = & a_0 + a_1 E_1 + a_2 t_1 + a_3 T_2 + a_4 \tau_1 + a_5 \tau_2 + \\
 & + a_6 \varphi_1 + a_{11} E_1^2 + a_{12} E_1 + a_{13} E_1 T_2 + a_{14} E_1 \tau_1 + \\
 & + a_{15} E_1 \tau_2 + a_{16} E_1 \varphi_1 + a_{22} t_1^2 + a_{23} t_1 T_2 + \\
 & + a_{24} t_1 \tau_1 + a_{25} t_1 \tau_2 + a_{26} t_1 \varphi_1 + a_{33} T_2^2 + \\
 & + a_{34} T_2 \tau_1 + a_{35} T_2 \tau_2 + a_{36} T_2 \varphi_1 + a_{44} \tau_1^2 + \\
 & + a_{45} \tau_1 \tau_2 + a_{46} \tau_1 \varphi_1 + a_{55} \tau_2^2 + a_{56} \tau_2 \varphi_1 + a_{66} \varphi_1^2, \quad (3)
 \end{aligned}$$

where  $t_1$  – the current value of the daily temperature in the greenhouse, °C;  $E_1$  – the current value of light, klx;  $T_2$  – the average temperature of the previous night, °C;  $\tau_2$  – the plants age, days;  $\varphi_1$  – the current value of humidity in the greenhouse, %;  $\tau_1$  – the duration of the photoperiod (the duration of the light factor), h;  $a_0, a_1, a_2$  and so on – the coefficients of the mathematical model of photosynthesis intensity.

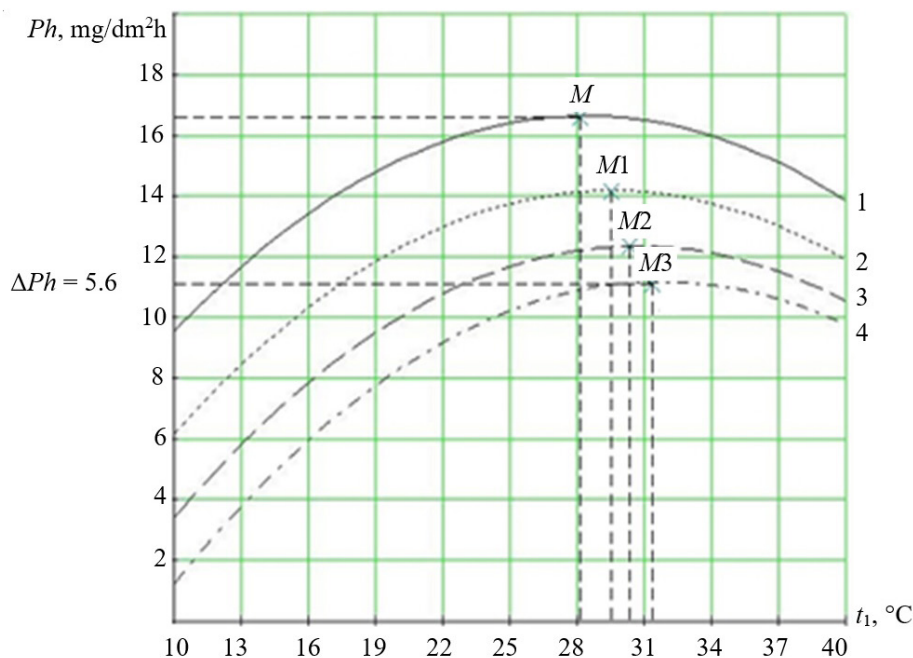


Fig. 3. The dependence of the photosynthesis intensity from the temperature at optimal values of light:  
1 –  $E_{opt} = 38.6$  klx; 2 –  $E_{opt} = 33.8$  klx; 3 –  $E_{opt} = 38.6$  klx; 4 –  $E_{opt} = 38.6$  klx

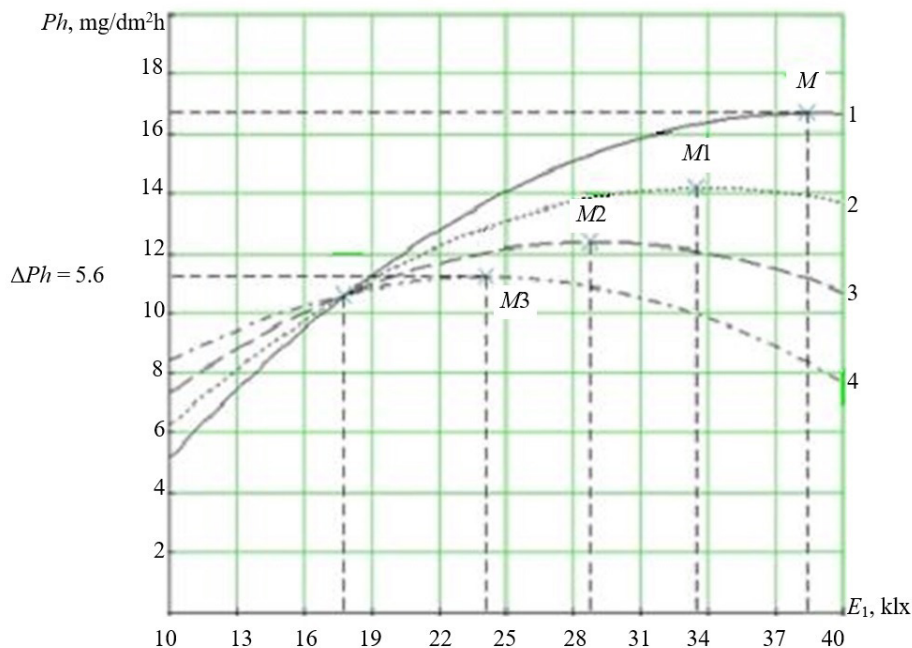


Fig. 4. The dependence of the photosynthesis intensity from the light at the optimal values of temperature: 1 –  $t_{opt} = 28.4$  °C; 2 –  $t_{opt} = 29.5$  °C; 3 –  $t_{opt} = 30.6$  °C; 4 –  $t_{opt} = 31.7$  °C

The analysis of the given dependences shows that the photosynthesis process has an optimum at a certain temperature and light of the plant environment. It is necessary to find derivatives according to these parameters based on solving the system of equations to optimize the temperature and the light:

$$\begin{cases} \frac{dPh}{dE} = 0 \\ \frac{dPh}{dt} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

As a result of solving the system, we can derive expressions for the optimal values of lighting  $E_{\text{opt}}$  and day temperature  $t_{\text{opt}}$ :

$$t_{\text{opt}} = A_1 T_2 + A_2 \tau_1 + A_3 \tau_2 + A_4 \varphi_1 + A_5, \quad (5)$$

$$E_{\text{opt}} = B_1 T_2 + B_2 \tau_1 + B_3 \tau_2 + B_4 \varphi_1 + B_5, \quad (6)$$

where  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$  – multidimensional reduced coefficients of photosynthesis intensity which take the following values after solution the system of equations ( $A_1 = -0.127$ ;  $A_2 = -0.302$ ;  $A_3 = -0.738$ ;  $A_4 = -0.492$ ;  $A_5 = 86.25$ );  $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5$  – multidimensional reduced coefficients of photosynthesis intensity which take the following values after solution the system of equations ( $B_1 = -0.003$ ;  $B_2 = -0.299$ ;  $B_3 = -0.215$ ;  $B_4 = 0.116$ ;  $B_5 = 29.63$ ).

Thus, the recommended mathematical model can realize the control system of the photosynthesis process. Therefore, this model can be applied to develop the light control algorithm.

### Results

It is necessary to manage the process of growing greenhouse plants in order to save energy. In this case, it is essential to maintain the greenhouse light and temperature microclimate and to light it up with a certain radiation spectrum for plant growth.

Combined lighting for greenhouse plants is recommended due to natural and artificial light. Artificial lighting serves

to light up the plants, and lighting is possible at different plant heights with different light sources.

We can use sodium lamps containing the entire natural radiation spectrum to light up the plants at the upper level. It is recommended to light up the plants only with LED sources located at an average level during the daily dark period.

A control system has been developed to control the microclimate and the lighting of plants. Figure 5 shows the structural scheme of the control system.

The given control scheme contains the channels responsible for the four main energy-intensive factors of the microclimate and the plant lighting. Moreover, these factors are interrelated.

The day temperature control channel  $t_1$  allows keeping the optimal temperature due to the change in the task and corresponding to the lighting  $E$  that is established due to the natural solar radiation and lighting. The control channel circuit contains a PMT 1 measuring sensor which compares the temperature  $t_1$  measured in the greenhouse with the set temperature at CE 1 and the mismatch signal through the element of the amplifier-regulator AR is transmitted to the executive mechanism EM 1 that controls the regulator R on the greenhouse heating system.

The control channel of the upper lighting lamps, for example, sodium, allows us to turn on the upper light with the lack of natural radiation and turn it off after receiving the total plants phytoactivity for the light period  $Q_\Sigma$ . The task  $Q_{\Sigma\text{set}}$  is formed by the computer setter CS according to the recommendations of agronomists and compared on CE 4 with the current measured and calculated as the sum for the past period of PMT 4. The signal through the amplifier SA enters the commutator-switcher, the purpose of which is to turn off the upper light with the end of the photoperiod  $\tau_1$  or according to the light sensor signal (not shown in the diagram) if the natural light exceeds the set one.

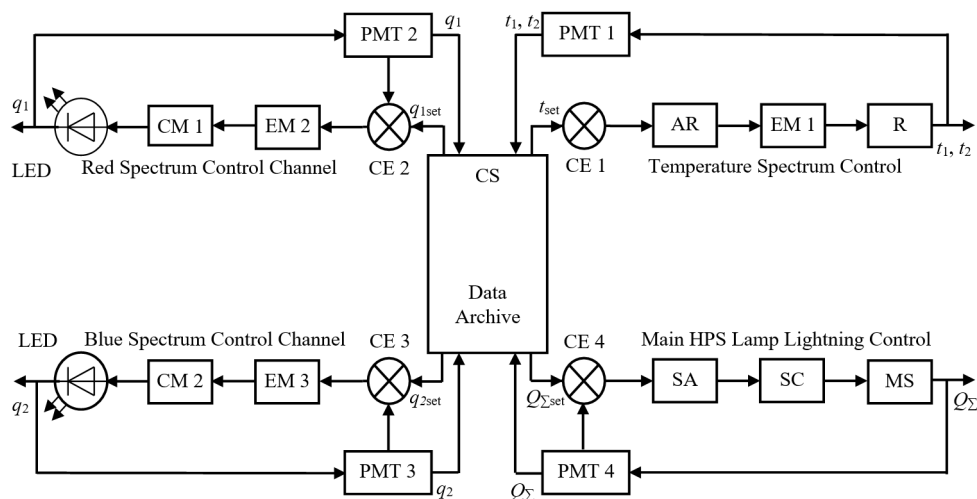


Fig. 5. Structural scheme of Automatic Control System (ACS) with main light-temperature parameters: CS – computer setter; SA – signal amplifier; AR – amplifier regulator; EM 1 ... EM 3 – executive mechanisms; R – regulator; MS – magnetic starter for turning on the HPS lamps; SC – switch commutator; PMT 1 ... PMT 4 – primary measuring transducers of environmental parameters (sensors); CM 1, CM 2 – control modules for LED equipment; LED 1, LED 2 – light-emitting diode equipment; CE 1 ... CE 4 – comparison elements;  $t_1, t_2$  – greenhouse temperature day and night;  $t_{set}$  – temperature set by the computer;  $q_1, q_2$  – energy expended on lighting up with red and blue spectrum LEDs;  $q_{1set}, q_{2set}$  – energy set by the computer for lighting up with red and blue spectrum LEDs;  $Q_{\Sigma}$  – total radiation measured in the greenhouse by the sensor during the photoperiod;  $Q_{\Sigma set}$  – energy set by the computer necessary for the optimal plant life;  $\tau_1$  – photoperiod duration (duration of the light factor)

The channels that control LED elements of a different spectrum should contain a special control module that does not connect all the elements at once but the required number at a given time providing the necessary energy of red  $q_1$  and blue  $q_2$  spectra.

Two control channels of LED elements work identically and are used to light up plants with red and blue emission spectra on the midline of planting where the sun-rays penetrate weakly. At this level, PMT 2 and PMT 3 sensors are placed by the signal of which they determine the radiation imperfections in any spectrum, comparing the signals from the sensors and the  $q_{1set}$  and  $q_{2set}$  tasks coming from the CS to the comparison elements CE 2 and CE 3. EM 2 and EM 3 devices include control units CM 1 and CM 2, the purpose of which is to control the work of LED equipment.

The mathematical model of photosynthesis intensity (3) makes it possible to optimize two parameters: lighting up  $E$  with a dimension of klx and air temperature  $t$ . For this purpose, we find the partial derivatives in compliance with these two parameters and after solving the resulting system of equations (4), worked out on the basis of equation (3), calculate the optimal parameters  $E_{opt}$  and  $t_{opt}$  which can then be worked in the system as a task  $E_{set}$  and  $t_{set}$  for controlling. The algorithm for controlling the greenhouse microclimate is shown in Figure 6.

According to the control algorithm, a signal is set based on the calculated optimal  $E_{set}$  that is sent to the comparison element 5, where it is compared with the measured one, using the light sensor  $I$ . In the case when two signals are equal, which means that the light entering the green-



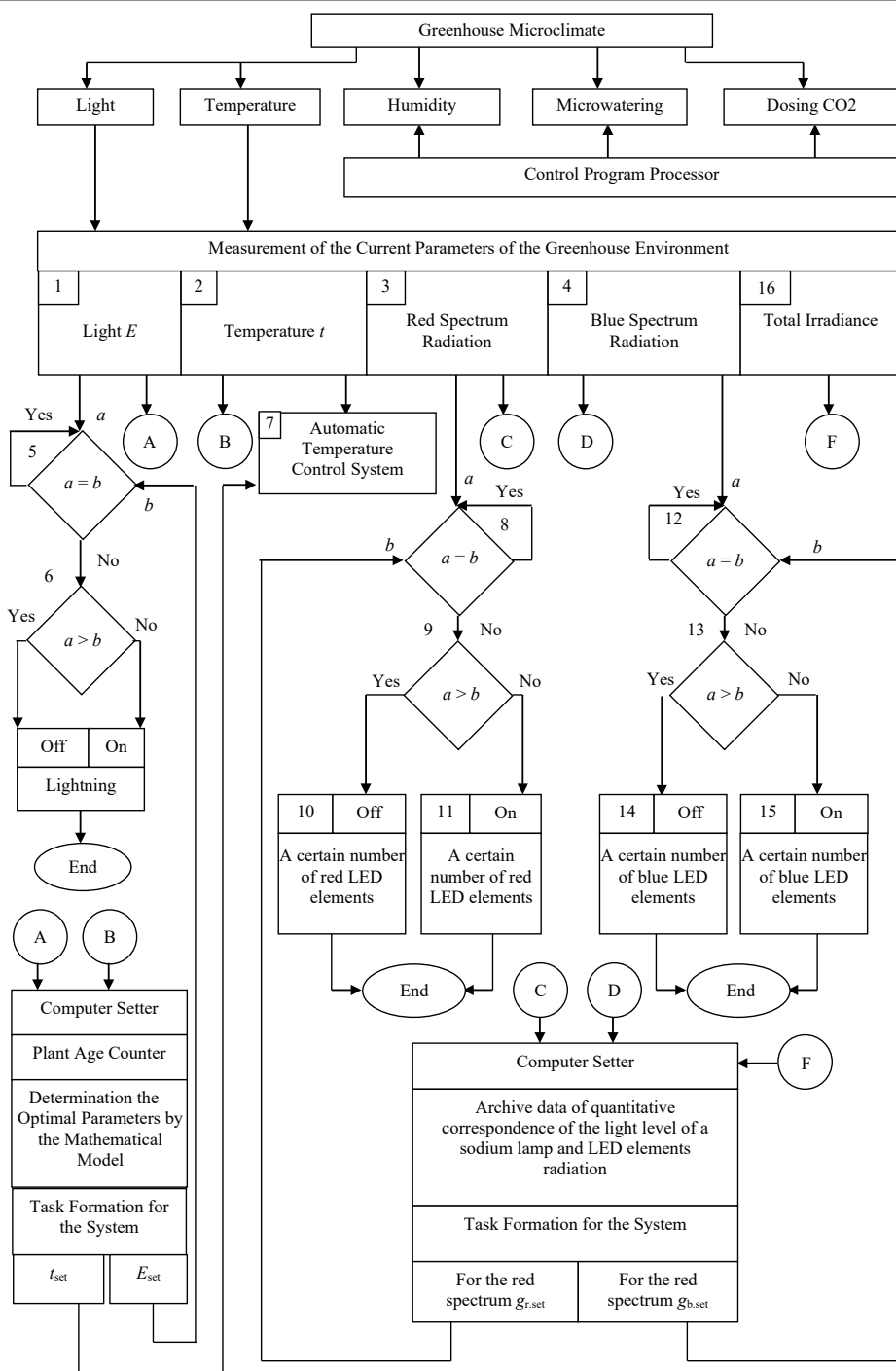


Fig. 6. The algorithm for controlling the greenhouse microclimate:  $g_{r.set}$ ,  $g_{b.set}$  – energy set by the computer for lighting up with red and blue spectrum LEDs;  $t_{set}$  – temperature set by the computer;  $E_{set}$  – light set by the computer

house is sufficient, the system is waiting for the next commands. If the signals are not equal as reported by element 6, then, given that the signal measured by the sensor is less than the specified value, the upper level lighting equipment is turned on, and if it is more, the lighting is turned off.

The next important parameter is the temperature, the optimal value of which is set after the calculation according to the equation (5). The task is formed on the basis of it and realized by the temperature control of ACS channel, block 7.

The structural scheme (Fig. 5) also contains additional control channels for the lighting equipment of the red and blue spectrum LED lamps that are located at the middle level of the plant. Each irradiation spectrum can be controlled by determining what level of lighting  $E$  of the red and blue spectrum should be.

The archive data of the setter CS contains the data of the preliminary experiment, the values of the blue and red radiation spectrum, constructed by HPS lamps with different luminosities. For example, with lighting  $E_{\text{opt}} = 40, 35, 30, 20$  klx and so on, certain levels of red and blue spectrum correspond.

If necessary, the blue and red spectrum values extract from the archive data as a task. The specified values  $q_{1\text{set}}$  fall into the comparison block 8, where the comparison is made with the current level of the same factor from the sensor 3. If the values are equal, the system is waiting, if not, then the next block 9, determines what actions the system should take, or turn on additional LED elements (block 11), or they will turn them off (block 10).

Similar actions are performed by the blue spectrum elements of the control channel. According to the formed task  $q_{2\text{set}}$ , the comparison block 12 compares it with the sensor data 4 and either expects the next time period, or if the values are

not equal, block 13 turns on (block 15) or turns off (block 14) additional light elements of the blue spectrum.

As a result of controlling the greenhouse microclimate and the greenhouse plants lighting up according to the proposed method, two goals are achieved: the energy saving due to switching off the upper level of lighting and turning on LED equipment, which consumes significantly less energy; the reduction of the light influence on the greenhouse areas at night.

### Discussion and Conclusion

The important factor for the growth and the development of greenhouse plants is the maintenance of the greenhouse microclimate and the lighting with the different radiation spectrum. This is especially important for light cultivated plants that include cucumbers and tomatoes requiring 20 hour lighting during 10–12 months. It is necessary to support the process of photosynthesis during the lighting, which tends to decrease after 4 hours lighting that subsequently leads to an excessive consumption of electricity.

Under these conditions, it is necessary to control the level and the duration of lighting, to maintain the required lighting and temperature for the greenhouse microclimate. Therefore, the necessity is to use the most perspective LED lamps, the radiation spectrum of which is close to the natural light instead of high-pressure sodium lamps.

Light-temperature automatic control system of the main parameters has been developed to maintain the greenhouse microclimate. In these circumstances, optimal parameters are set for the lighting and the air temperature. It is possible to provide greenhouse plants growing with minimal energy costs by controlling the lighting according to a given value and the spectrum of its radiation on the basis of the experimental data.

## REFERENCES

1. Guzhov S., Polishchuk A., Turkin A. Concept of Use of the LED Luminaires Along with the Traditional Light Sources. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii* = Contemporary Technologies in Automation. 2008; (1):14-18. Available at: <https://www.cta.ru/cms/f/368162.pdf> (accessed 20.01.2021). (In Russ.)
2. Hogewoning S.W., Trouwborst G., Maljaars H., et al. Blue Light Dose-Responses of Leaf Photosynthesis, Morphology, and Chemical Composition of Cucumis Sativus Grown under Different Combinations of Red and Blue Light. *Journal of Experimental Botany*. 2010; 61(11):3107-3117. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erq132>
3. Dong C., Fu Y., Liu G., et al. Growth, Photosynthetic Characteristics, Antioxidant Capacity and Biomass Yield and Quality of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Exposed to LED Light Sources with Different Spectra Combinations. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2014; 200(3):219-230. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1111/jac.12059>
4. Hanyu H., Shoji K. Acceleration of Growth in Spinach by Short-Term Exposure to Red and Blue Light at the Beginning and at the End of the Daily Dark Period. In: IV International ISHS Symposium on Artificial Lighting, ISHS Acta Horticulturae. 2002; 580:145-150. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.580.17>
5. Kondratieva N.P., Filatov D.A., Terentiev P.V., et al. Comparative Assessment of Sodium and LED Greenhouse Irradiators Main Characteristics. *Selskokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2020; 14(1):50-54. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-1-50-54>
6. Kondratieva N.P., Terentyev P.V., Filatov D.A. Comparative Experimental Analysis of Pulsation Coefficient of Discharge and LED Light Sources for Plant Production. *Vestnik NGIEI* = Bulletin NGIEI. 2019; (9):46-56. Available at: <https://clck.ru/SsYA9> (accessed 20.01.2021). (In Russ.)
7. Dougher T.A.O., Bugbee B. Long-term Blue Light Effects on the Histology of Lettuce and Soybean Leaves and Stems. *Journal of the American Society of Horticultural Science*. 2004; 129(4):467-472. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.21273/JASHS.129.4.0467>
8. Sheriazov S.K., Popova S.A., Karimov I.I. The Control of Lighting up Regime of Greenhouse Plants with LED Irradiators. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019; 791. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/791/1/012074>
9. Hirai T., Amaki W., Watanabe H. Action of Blue or Red Monochromatic Light on Stem Internodal Growth Depends on Plant Species. In: V International Symposium on Artificial Lighting in Horticulture, ISHS Acta Horticulturae. 2006; 711:345-350. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.711.47>
10. Yerokhin M.M., Kamshilov V.G., Terekhov V.G., et al. [Research on the Characteristics of LEDS for Phyto-Irradiators]. *Svetotekhnika* = Light & Engineering. 2019; (5):42-48. Available at: <https://l-e-journal.com/journals/zhurnal-svetotekhnika-5-2019/zhurnal-svetotekhnika-5-2019-elektronnaya-versiya/> (accessed 20.01.2021). (In Russ.)
11. Pchelin V.M., Makarova I.E. [Assessment of the Status and Prospects for the Development of Irradiation Systems in Modern Greenhouse Complexes]. *Svetotekhnika* = Light & Engineering. 2018; (1):23-27. (In Russ.). Available at: <https://l-e-journal.com/journals/zhurnal-svetotekhnika/otsenka-sostoyaniya-i-perspektiv-razvitiya-sistem-oblucheniya-v-sovremennykh-teplichnykh-kompleksakh/> (accessed 20.01.2021). (In Russ.)
12. Galiullin R.R., Karimov I.I. Efficiency LED Lamps in Greenhouses. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* = Electrical and Information Complexes and Systems. 2016; 1(12):34-39. Available at: <https://clck.ru/SsZWS> (accessed 20.01.2021). (In Russ.)
13. Popova S.A. Substantiation of Intermittent Supplementary Lighting of Greenhouse Plants with LED-Irradiators. *Vestnik IRGSKhA* = Irkutsk State Agricultural Academy Bulletin. 2017; 80:118-125. Available at: <http://vestnik.irsau.ru/files/v80.pdf> (accessed 20.01.2021). (In Russ.)
14. Karimov I.I., Popova S.A. Experimental Phitocamera for Investigation of Factors of Plants Growth in the Conditions of Closed Soil. *Vestnik IRGSKhA* = Irkutsk State Agricultural Academy Bulletin. 2017; 81/1:153-160. Available at: <http://vestnik.irsau.ru/files/v81-1.pdf> (accessed 20.01.2021). (In Russ.)

15. Xu Y., Chang Y., Chen G., et al. The Research on LED Supplementary Lighting System for Plants. *Optik*. 2016; 127(18):7193-7201. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.05.056>
16. Gaston K.J., Visser M.E., Hölker F. The Biological Impacts of Artificial Light at Night: The Research Challenge. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2015; 370(1667). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0133>
17. Barmasov A.V., Barmasova A.M., Yakovleva T.Yu. The Biosphere and the Physical Factors. Light Pollution of the Environment. *Uchenyye zapiski rossiysskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* = Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University. 2014; (33):84-101. Available at: <http://www.rshu.ru/university/notes/archive/issue33/uz33-84-101.pdf> (accessed 20.01.2021). (In Russ.)
18. Dueck T.A., Janse J., Eveleens B.A., et al. Growth of Tomatoes under Hybrid LED and HPS Lighting. In: International Symposium on Advanced Technologies and Management Towards Sustainable Greenhouse Ecosystems: Greensys 2011, ISHS Acta Horticulturae. 2012; 952:335-342. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.952.42>
19. Popova S.A. Mathematical Modeling of Plant Efficiency as the Means for Energy-Saving Efficiency Increase. *Vestnik KrasGAU = Bulletin of KrasGAU*. 2010; (7):141-145. Available at: <https://clck.ru/Ssb4G> (accessed 20.01.2021). (In Russ.)
20. Sysoeva M.I., Markovskaya E.F. Temperature Regulation of the Rate of Development of Cucumber Plants in Ontogenesis. *Vestnik Bashkirskogo universiteta* = Bashkir University Bulletin. 2001; (2):164-165. (In Russ.)

*Submitted 18.09.2020; approved after reviewing 15.10.2020; accepted for publication 22.10.2020*  
*Поступила 18.09.2020; одобрена после рецензирования 15.10.2020; принята к публикации 22.10.2020*

#### *About the authors:*

**Saken K. Sheryazov**, Professor of the Chair of Energy and Automation of Technological Processes, South Ural State Agricultural University (75 Prospekt Lenina, Chelyabinsk 454080, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: T-6388-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8795-5114>, Scopus ID: 57194205093, sakenu@yandex.ru

**Svetlana A. Popova**, Associate Professor of the Chair of Energy and Automation of Technological Processes, South Ural State Agricultural University (75 Prospekt Lenina, Chelyabinsk 454080, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0360-2288>

#### *Contribution of the authors:*

S. K. Sheryazov – project management, analyzing and supplementing the article.

S. A. Popova – collecting material, writing the draft.

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

#### *Об авторах:*

**Шерязов Сакен Койшыбаевич**, профессор кафедры энергообеспечения и автоматизации технологических процессов ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет» (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 75), доктор технических наук, Researcher ID: T-6388-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8795-5114>, Scopus ID: 57194205093, sakenu@yandex.ru

**Попова Светлана Александровна**, доцент кафедры энергообеспечения и автоматизации технологических процессов ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет» (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 75), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0360-2288>

#### *Заявленный вклад соавторов:*

С. К. Шерязов – общее руководство проектом, анализ и дополнение текста статьи.

С. А. Попова – сбор материала, написание и подготовка текста.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*



## Возможность оценки степени развития растений озимой пшеницы в период «всходы – кушение» по данным дистанционного зондирования Земли

И. Г. Сторчак\*, Ф. В. Ерошенко, Л. Р. Оганян,

Е. О. Шестакова, А. А. Калашникова

ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр» (г. Михайловск, Российская Федерация)

\*[snish.storchak@gmail.com](mailto:snish.storchak@gmail.com)

**Введение.** Важность контроля этапов органогенеза заключается в том, что появляется возможность воздействовать на растения посредством уходовых мероприятий для создания благоприятных условий в периоды формирования определенных элементов структуры урожая и влиять на качество зерна. Цель работы – установить связь данных дистанционного зондирования Земли с состоянием растений озимой пшеницы в начальный период их роста и развития.

**Материалы и методы.** Объектом исследований стали посевы озимой пшеницы. На опытном поле поделочно высевали пшеницу следующих сортов: «Одиссея», «Олимп», «Нива Ставрополя», «Виктория 11», «Настя» и «Фируза 40». На производственных посевах озимой пшеницы проводились исследования по оценке состояния растений в фазу кушения в 2012–2013, 2013–2014 и 2015–2016 сельскохозяйственных годах. Данные дистанционного зондирования Земли получены с помощью сервиса «ВЕГА» ФГБУН «ИКИ РАН».

**Результаты исследования.** Полученная функция зависимости NDVI посевов озимой пшеницы от высоты растений и соответствующей фазы их развития представляет собой полином третьей степени и характеризуется высокой точностью ( $R_{\text{corr}} = 0,98$ ). Анализ данных NDVI, RED и NIR полей в даты, близкие к датам проведения отборов растительных образцов, показал достаточно высокий уровень сопряжения между вегетационным индексом NDVI и высотой растений озимой пшеницы. В 2013 г. был получен коэффициент корреляции 0,60, в 2014 – 0,66, а в 2016 – 0,80, в среднем за 2013–2016 гг. – 0,85.

**Обсуждение и заключение.** Исследования показали, что для оценки состояния и степени развития посевов озимой пшеницы в период «всходы – кушение», в том числе в производственных условиях, могут быть использованы данные дистанционного зондирования Земли. Для повышения точности такой оценки лучше применять значения спектральной яркости в инфракрасной области спектра.

**Ключевые слова:** данные дистанционного зондирования, нормализованный разностный вегетационный индекс, коэффициент спектральной яркости, озимая пшеница, этапы органогенеза

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

**Для цитирования:** Возможность оценки степени развития растений озимой пшеницы в период «всходы – кушение» по данным дистанционного зондирования Земли / И. Г. Сторчак, Ф. В. Ерошенко, Л. Р. Оганян [и др.]. – DOI 10.15507/2658-4123.031.202101.021-036 // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 1. – С. 21–36.

© Сторчак И. Г., Ерошенко Ф. В., Оганян Л. Р., Шестакова Е. О., Калашникова А. А., 2021



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

# Assessment of Winter Wheat Plant Development during the Seeding and Tillering Stages According to the Earth Remote Sensing Data

I. G. Storchak\*, F. V. Eroshenko, L. R. Oganyan,

E. O. Shestakova, A. A. Kalashnikova

*North Caucasus Federal Agricultural Research Centre (Mikhailovsk, Russian Federation)*

\**sniish.storchak@gmail.com*

**Introduction.** The importance of controlling the organogenesis stages is that it provides the opportunity to create favorable conditions during the development of certain elements of the yield structure by caring crops and influence the grain quality. The objective of the work is to define a connection between the Earth remote sensing data and the state of winter wheat plants in the initial period of their growth and development.

**Materials and Methods.** The object of the study was the winter wheat plantings. The wheat varieties “Odiseya”, “Olympus”, “Niva Stavropolya”, “Victoria 11”, “Nastya” and “Firuza 40” were sown by plot in the experimental field. The industrial crops of winter wheat were studied to assess the state of the plants in the tillering stage in 2012–2013, 2013–2014 and 2015–2016 agricultural years. The Earth remote sensing data were obtained using the “VEGA” service of FBSI “Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences”.

**Results.** The obtained function of the dependence of NDVI of winter wheat crops on the height and development stage of plants is a polynomial of the third degree and is characterized by high accuracy ( $R_{\text{corr}} = 0.98$ ). The analysis of the NDVI, RED and NIR data of fields on dates close to the dates of collecting plant samples showed a considerable degree of relationship between the vegetation index NDVI and height of winter wheat plants. In 2013, the correlation coefficient was 0.60, in 2014 – 0.66, in 2016 – 0.80, and in 2013–2016 on average about 0.85.

**Discussion and Conclusion.** The studies have shown that the Earth remote sensing data can be used to assess the state and degree of the development of winter wheat crops during the seeding and tillering stages, including in the production conditions. To improve the accuracy of the assessment, it is better to use the spectral brightness values in the infrared region of the spectrum.

**Keywords:** remote sensing data, normalized difference vegetation index, spectral brightness ratio, winter wheat, stages of organogenesis

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

**For citation:** Storchak I.G., Eroshenko F.V., Oganyan L. R., et al. Assessment of Winter Wheat Plant Development during the Seeding and Tillering Stages According to the Earth Remote Sensing Data. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(1):21-36. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.021-036>

## Введение

Очень важное значение для формирования будущего урожая имеет контроль состояния посевов и степени развития растений в самый начальный период роста озимой пшеницы [1]. Это позволяет эффективно планировать уходные мероприятия (боронование, ремонт посевов, при необходимости их пересев и т. д.),

вносить коррективы в рекомендации по ранневесенней азотной подкормке (дозы, сроки и очередность применения), а также оценивать потенциальные возможности посевов по формированию урожая и качества зерна [2–5].

Оценка состояния посевов и развития растений должна быть максимальной объективной и оперативной. Такими



свойствами характеризуются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса [6; 7]. К сожалению, исследования по выявлению связи ДЗЗ с оценочными характеристиками роста и развития растений озимой пшеницы в литературе практически отсутствуют.

### **Обзор литературы**

Из литературных источников известно, что в течение вегетации растения озимой пшеницы проходят следующие основные фазы роста и развития: всходы, кущение, выход в трубку, колошение, цветение и созревание [8; 9]. Фенологические наблюдения фиксируют лишь фазовые изменения в жизни растений, которые не раскрывают всю сложность процессов образования органов в онтогенезе [10; 11].

Органогенез – процесс формирования органов растения в их эмбриональном зачаточном состоянии (происходит дифференцирование клеток). Органы растений в процессе своего развития проходят несколько этапов органогенеза. Например, у озимой пшеницы, по Ф. М. Куперман, их 12<sup>1</sup>. Важность контроля этапов органогенеза заключается в том, что появляется возможность воздействовать на растения посредством уходовых мероприятий для создания благоприятных условий в периоды формирования определенных элементов структуры урожая (продуктивный стеблестой, озерненность колоса и колосков, масса 1 000 зерен и т. д.), а также на формирование качества зерна (содержание элементов минерального питания в органах растений, их реутилизация, аттракция и т. д.).

Существует соответствие между этапами органогенеза и фазами развития растений. Поэтому применение тех или иных технологических приемов выращивания в определенные фазы развития растений позволяет управлять

ходом формирования урожая и качеством зерна озимой пшеницы [12; 13].

Необходимо разработать методы, позволяющие давать объективную оценку степени развития посевов не только отдельного поля, но и сельскохозяйственного предприятия в целом. Такие методы могут быть разработаны на основе данных ДЗЗ, которые в последнее время стали широко использоваться в сельском хозяйстве [14–16].

Системы спутникового мониторинга активно применяются для контроля состояния растительности сельскохозяйственных посевов в течение вегетации. Главными преимуществами такого наблюдения являются оперативность (получение снимков возможно несколько раз в сутки), полимасштабность (информация как о небольших объектах (поле), так и о более крупных (край или область)), объективность (космоснимки показывают действительное состояние исследуемых объектов), экономичность (минимальные финансовые затраты) [17; 18]. Поэтому необходимо использовать специализированные сервисы пространственного разрешения, содержащие данные различного типа, и иметь многолетние архивы наблюдений. Одним из таких сервисов является «ВЕГА-Science», созданный в Институте космических исследований Российской академии наук [19].

Цель работы – установить связь данных ДЗЗ с состоянием растений озимой пшеницы в начальный период их роста и развития.

### **Материалы и методы**

Объектом исследований были посевы озимой пшеницы. На опытном поле поделочно высевали пшеницу следующих сортов: «Одиссея», «Олимп», «Нива Ставрополя», «Виктория 11», «Настя» и «Фируза 40». Предшественники: 1) пар; 2) озимая пшеница. Фоны

<sup>1</sup> Куперман Ф. М. Биологические основы культуры пшеницы: в 3-х ч. Ч. 2. М., 1953. 300 с.

минерального питания: контроль (без удобрений); 2) удобренный фон (НРК по 60 кг/га по д.в. при посеве и ранневесенняя азотная подкормка 30 кг/га по д.в.). Повторность трехкратная. Площадь одной делянки 25 м<sup>2</sup>. Кроме того, в 2013, 2014 и 2016 годах в ЗАО «СХП «Родина»» (Шпаковский р-н, Ставропольский край) на производственных посевах озимой пшеницы (рис. 1) в рамках НИОКР по научному обеспечению производства зерна озимой пшеницы проводились исследования по оценке состояния растений в фазу кущения.

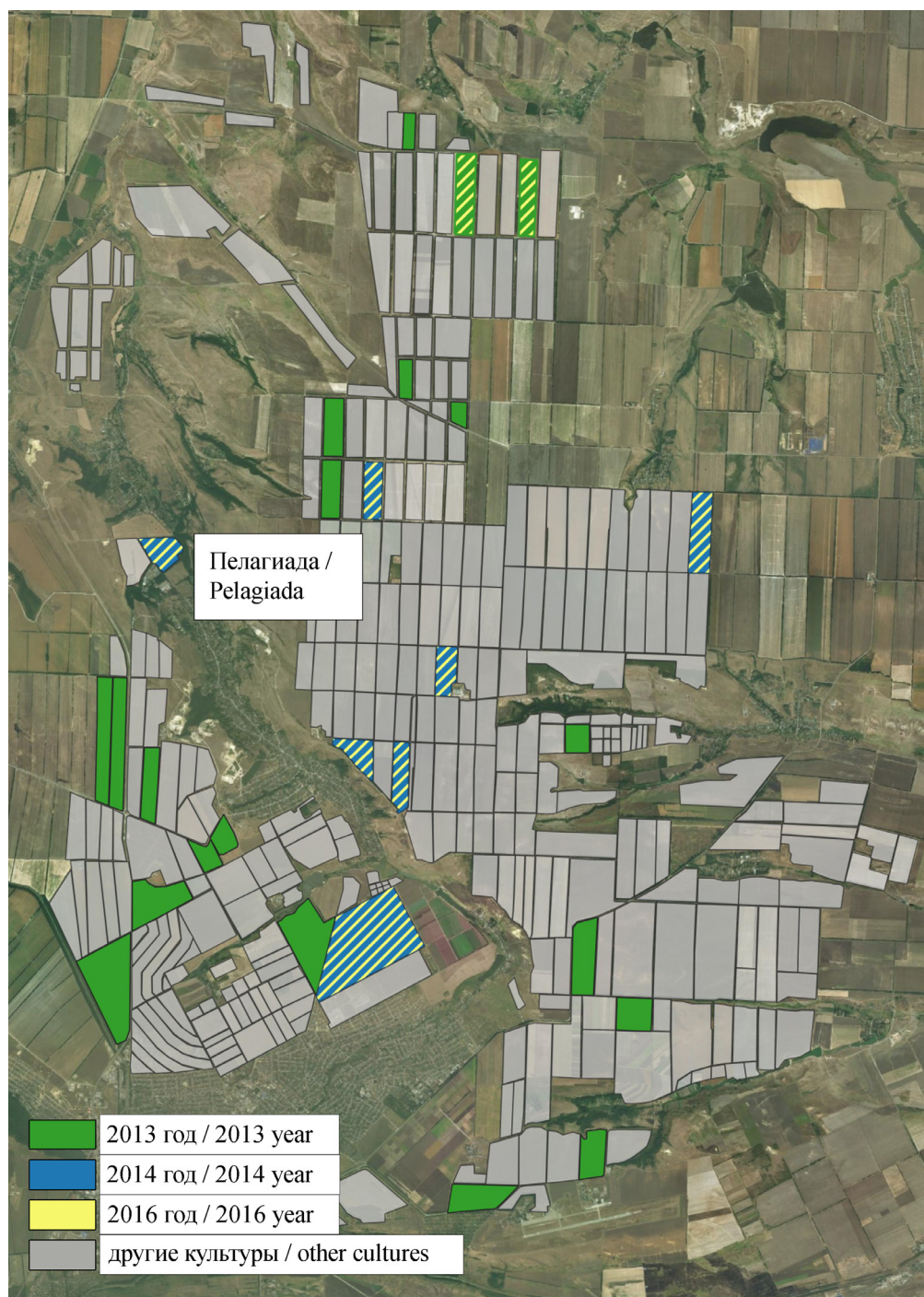
На рост и развитие большое влияние оказывают условия выращивания: почвенно-климатические и технологические. Вторые включают в себя: предшественника, сорт, фон минерального питания, сроки и нормы посева. Растения являются индикатором условий выращивания, поэтому, в зависимости от технологических приемов, наблюдается различная степень их роста и развития на определенных этапах органогенеза. Все это оказывает влияние на оптико-биологические свойства посевов и, как следствие, на данные дистанционного зондирования.

Погодные условия осеннего периода 2012–2013 сельскохозяйственного года были неблагоприятными для сева и появления всходов озимой пшеницы. Температура воздуха сентября была выше климатической нормы на 12,5 %, осадков при этом выпало всего 11 мм (норма 49 мм). Температурный режим октября был превышен на 4,6 °С при значительном недоборе осадков (85 %). Выпавшие осадки в первой декаде ноября и повышенные температуры всего месяца способствовали хорошему развитию посевов. Недобор осадков в зимний период составил 43 %, а температура воздуха была на 1,5 °С выше климатической нормы. Возобновление весенней вегетации началось в среднем на 15 дней раньше среднелетних

значений. В марте температура воздуха была выше климатической нормы на 2,2 °С, осадков выпало 53 мм. В апреле при повышенном температурном режиме наблюдался недобор осадков. В мае температура воздуха была выше климатической нормы на 3,3 °С с дефицитом осадков 7,6 %. В июне температура воздуха была в пределах нормы, за месяц выпало 134 мм осадков.

Агроклиматические условия осени и зимы 2013–2014 сельскохозяйственного года сложились в целом благоприятно для роста и развития растений озимой пшеницы. Возобновление весенней вегетации началось на 14 дней раньше обычного срока. Температура воздуха в марте превышала значения климатической нормы на 2 °С, суммарное количество выпавших осадков за месяц составило 39 мм. Среднемесячная температура апреля была равна 9,3 °С, осадков выпало 61 мм. Температура воздуха в мае была выше среднелетних значений на 2 °С, осадков выпало 135 мм. Поэтому сложившиеся погодные условия не оказали отрицательного воздействия на формирование урожая озимой пшеницы. Достаточное количество выпавших осадков в весенний период компенсировало их нехватку в июне, тем более что температура воздуха была близка к климатической норме. Сложившиеся условия положительно отразились на формировании урожая зерна.

Теплообеспеченность растений озимой пшеницы в 2015 году в период сева и осенней вегетации была выше климатической нормы на 1,9–3,5 °С. Температура воздуха в феврале и марте 2016 года превышала среднелетнюю на 5,8 и 2,5 °С. В августе, сентябре и октябре 2015 года отмечалась засуха. Выпавшие осадки в ноябре превышали климатическую норму на 12 мм, в декабре – на 53 мм, в январе – на 22 мм, что привело к улучшению влагообеспеченности посевов.



Р и с. 1. Поля, занятые под посевы озимой пшеницы в ЗАО «СХП «Родина»»

F i g. 1. Fields for winter wheat plantings in the Rodina Agricultural Company



Поэтому климатические условия весеннего периода в 2016 году были в целом благоприятными для роста и развития растений озимой пшеницы.

Вегетационный индекс Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) на опытных делянках определяли с помощью ручного прибора GreenSeeker (Trimble, США). Измерения проводили каждые 2-3 дня (не менее четырех замеров на каждой повторности). Одновременно с этим определяли высоту побегов и кустистость растений. По полученным данным была построена зависимость, где  $y$  – NDVI,  $x$  – высота растений.

Данные ДЗЗ (NDVI, NIR и RED) в период осенне-весеннего кушения посевов ЗАО «СХП «Родина»» получали с помощью сервиса «БЕГА» ФГБУН «ИКИ РАН». В этот период на посевах отбирали образцы и определяли высоту растений и их кустистость по методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур (1989).

### Результаты исследования

Спутниковый сервис «БЕГА» позволяет использовать информацию, полученную с общедоступных данных дистанционного зондирования [20]. Значения нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI сельскохозяйственных культур получены по данным спутника «Терра» (MODIS) [21].

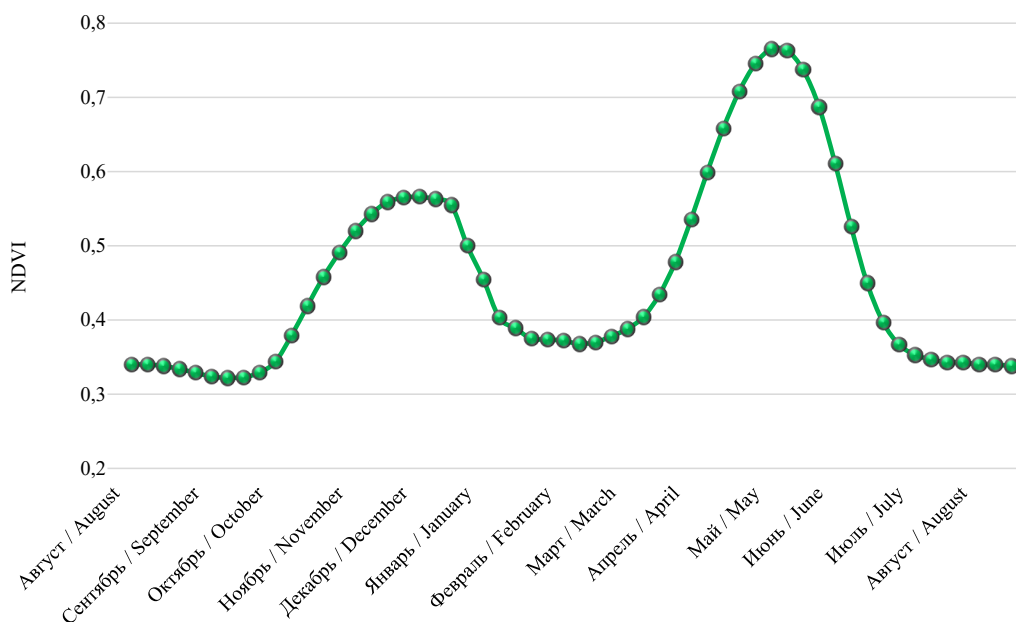
Динамика вегетационного индекса NDVI посевов озимой пшеницы в Ставропольском крае представляет собой кривую с двумя максимумами (рис. 2). Наличие первого максимума, который наблюдается перед уходом в зиму, объясняется нарастанием биомассы в период осеннего кушения. Далее, в зимний период растения под действием отрицательных температур частично теряют листовую аппарат, что ведет к снижению NDVI. С возобновлением весенней вегетации отмечается рост биомассы и, как следствие, ве-

гетационного индекса NDVI, который продолжается вплоть до начала фазы колошения. Далее, наблюдается уменьшение значения NDVI, главным образом за счет уменьшения количества хлорофилла в растениях.

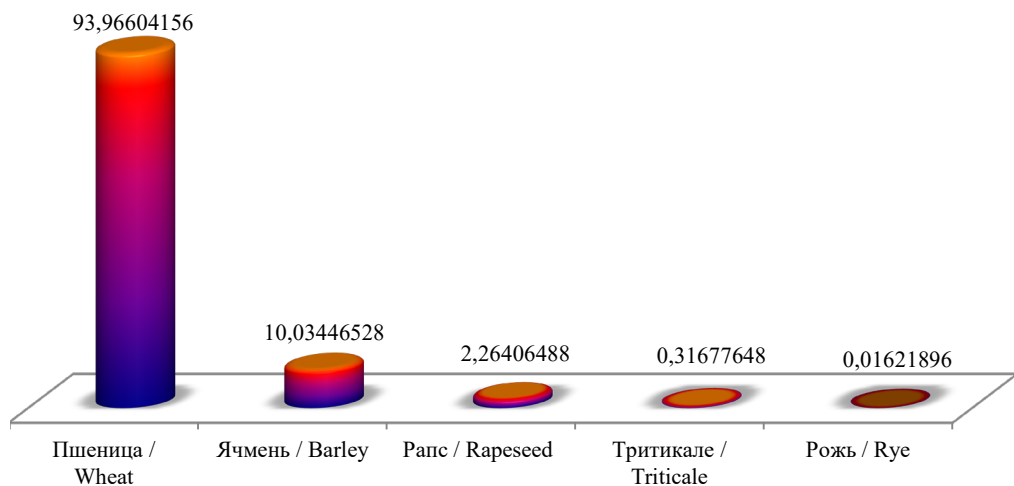
На рисунке 2 представлены усредненные значения вегетационного индекса NDVI озимых культур в Ставропольском крае. Их мы применили для озимой пшеницы. Правильность такого подхода объясняется тем, что более 90 % посевных площадей в крае занимают посевы озимой пшеницы, около 10 % – ячменя, который по биологическим особенностям схож с пшеницей (рис. 3).

Была изучена связь значений NDVI со степенью развития растений озимой пшеницы в начальный период ее роста и развития. Для этого с помощью ручного сканера в осенний период определяли NDVI посевов опытных делянок и сравнивали их с биометрическими показателями. Исследования показали, что в начальный период роста растений озимой пшеницы (шильца), когда их высота увеличивается от 0 до 5 см, наблюдается рост NDVI, который обусловлен выходом из почвы побегов, их утолщением и появлением первых листьев (рис. 4).

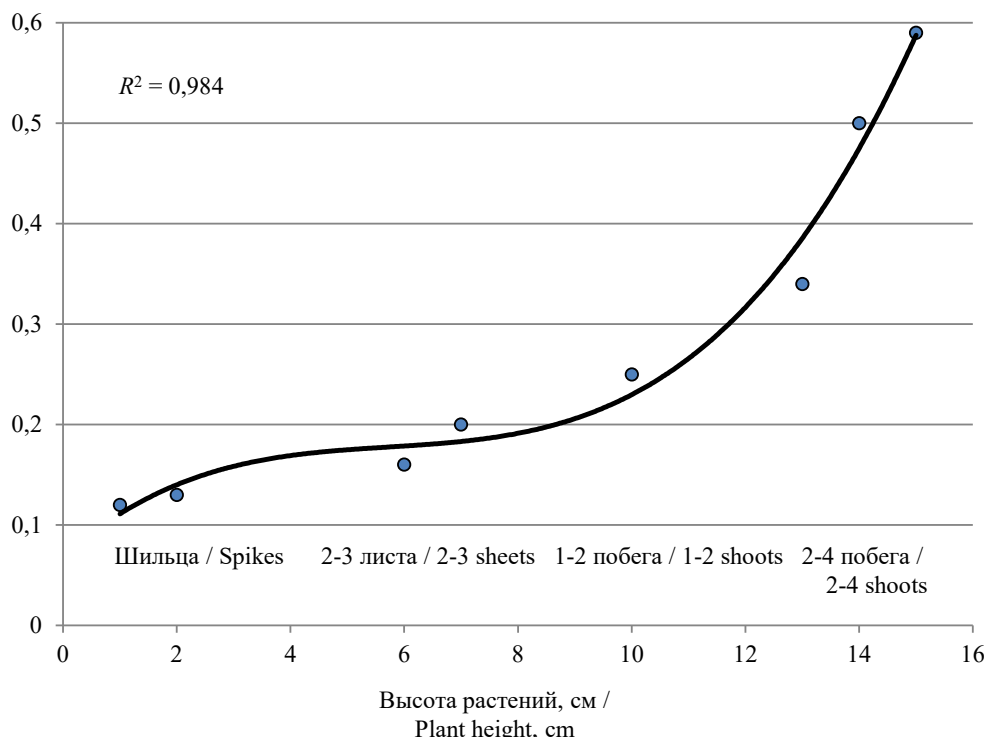
Далее рост вегетационного индекса замедляется. При этом развитие растений соответствует фазе 2-3 листьев, а их высота варьируется в довольно широких пределах 5–10 см. Такое поведение динамики NDVI объясняется тем, что в этот период основные изменения в растениях связаны с увеличением высоты побега, в то же время проективное покрытие почвы посевом почти не изменяется. С началом осеннего кушения (10–12 см) наблюдается резкий рост вегетационного индекса, который обусловлен увеличением площади покрытия почвы за счет появления новых побегов.



Р и с. 2. Динамика вегетационного индекса NDVI озимых в Ставропольском крае, 2001–2020 гг.  
 F i g. 2. Dynamics of the NDVI vegetation index for winter crops in the Stavropol Krai, 2001–2020 years



Р и с. 3. Структура посевных площадей озимых культур в Ставропольском крае, 2019 г.  
 F i g. 3. The structure of the areas under winter crops in the Stavropol Krai, 2019 year



Р и с. 4. Зависимость NDVI посева от степени его развития в осенний и ранневесенний периоды  
F i g. 4. Dependence of NDVI of sowing on the degree of its development in the autumn and early spring periods

Полученная функция зависимости NDVI посевов озимой пшеницы от высоты растений и соответствующей фазы их развития представляет собой полином третьей степени и характеризуется довольно высокой точностью (коэффициент корреляции равен 0,98, коэффициент аппроксимации – 0,91).

Таким образом, результаты наших исследований позволяют сделать вывод о том, что вегетационный индекс NDVI может быть использован при разработке способа оценки физиологического состояния посевов озимой пшеницы в начальный период роста и развития.

Чтобы проверить возможность использования данных дистанционного зондирования для оценки состояния растений в производственных усло-

виях, были проанализированы результаты исследований, полученные при изучении полей в осенне-весенний период в ЗАО «СХП «Родина» Шпаковского района, расположенного в зоне неустойчивого увлажнения Ставропольского края. Они были проведены в рамках выполнения хозяйственных работ по научному обеспечению производства зерна озимой пшеницы (2013, 2014 и 2016 годов). Нами была выполнена оцифровка всех полей с озимой пшеницей в каждый год исследований. С помощью сервиса «ВЕГА» ФГБУН «ИКИ РАН» были получены данные ДЗЗ соответствующих полей и в даты, близкие к датам проведения отборов растительных образцов (NDVI, RED и NIR).



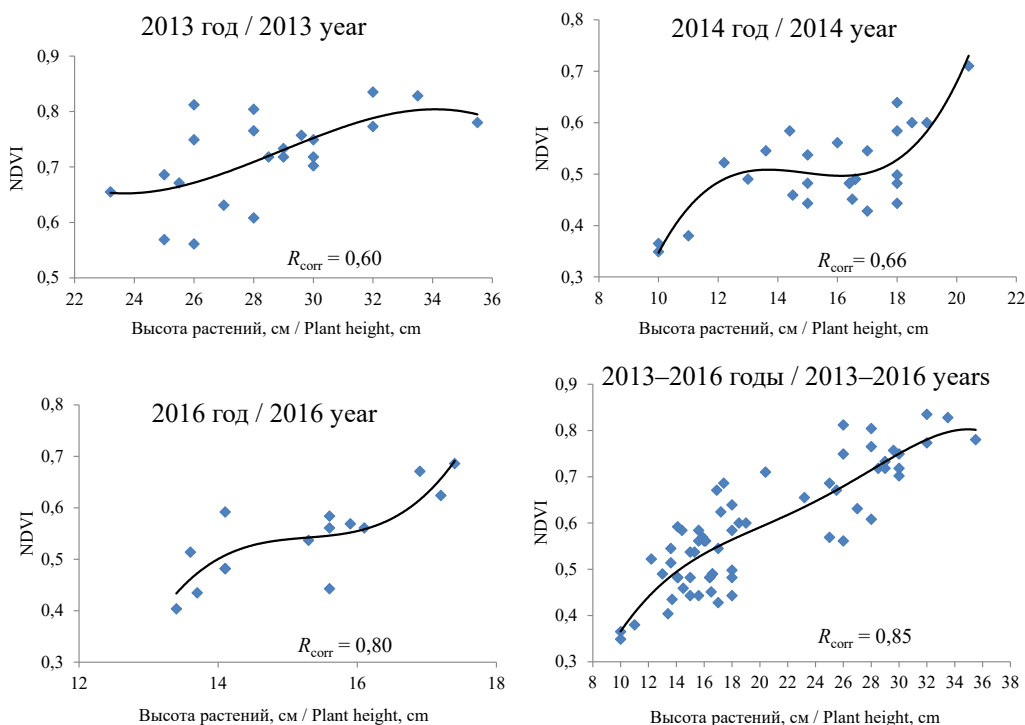
Анализ полученных данных показал достаточно высокий уровень сопряжения между вегетационным индексом NDVI и высотой растений озимой пшеницы (рис. 5).

Так, в 2013 году был получен коэффициент корреляции, значимый для  $p = 0,05$  (0,60), в 2014 – для  $p = 0,05$  (0,66), а в 2016 – для  $p = 0,01$  (0,80). Более высокий коэффициент корреляции 0,85 между значениями NDVI и высотой растений в начальный период роста и развития был получен при анализе усредненных данных за 3 года.

Несколько разный характер зависимости NDVI от высоты растений по годам объясняется влиянием погодных условий, складывающихся как перед посевами озимой пшеницы, так и в период начального роста и развития.

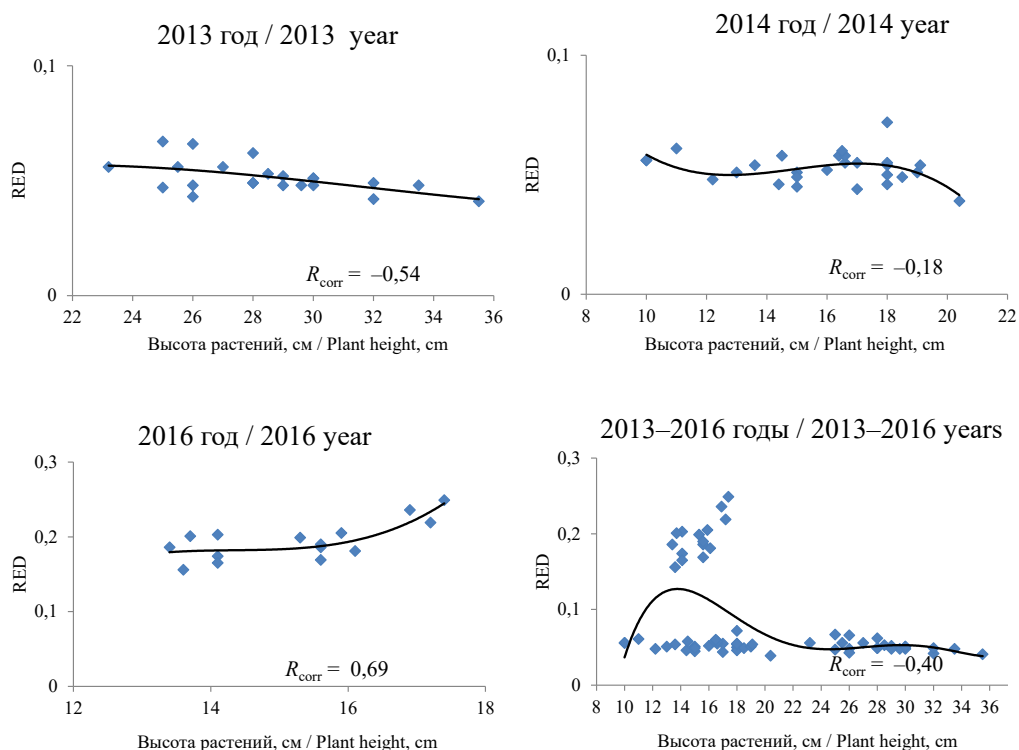
Полученные нами зависимости схожи с теми, которые были вычислены для опытных делянок с использованием ручного сканера GreenSeeker. Следовательно, вегетационный индекс NDVI может быть использован для оценки высоты растений озимой пшеницы в период «всходы – кущение».

Также была проанализирована связь высоты растений с NIR и RED (коэффициентами спектральной яркости в инфракрасной и в красной областях спектра электромагнитных волн). Так как RED напрямую связан с максимумом поглощения хлорофилла, а у растений нет прямой зависимости их высоты от количества зеленых пигментов, то ожидаемо не получена взаимосвязь между степенью развития и спектральной яркостью в красной области посевов (рис. 6).



Р и с. 5. Зависимость NDVI посевов от высоты растений озимой пшеницы. ЗАО «СХП «Родина»»

F i g. 5. Dependence of NDVI of crops on the height of winter wheat plants. Rodina Agricultural Company



Р и с. 6. Зависимость RED посевов от высоты растений озимой пшеницы. ЗАО «СХП «Родина»»  
F i g. 6. Dependence of RED of crops on the height of winter wheat plants. Rodina Agricultural Company

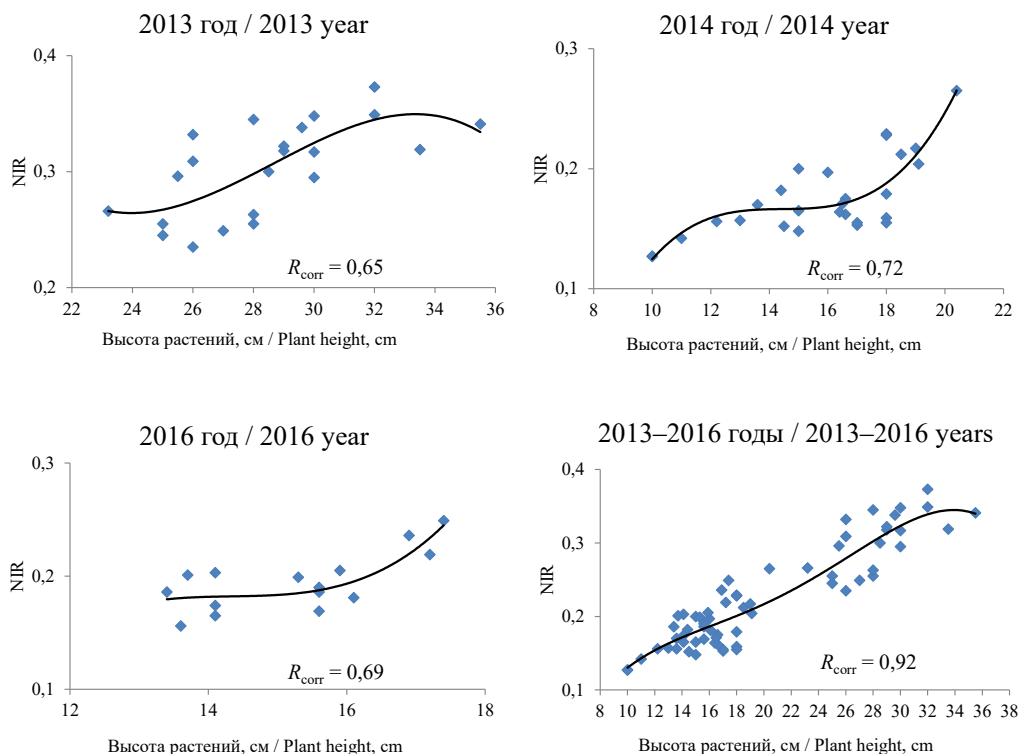
Степень развития посевов, особенно в начальный период роста озимой пшеницы, напрямую связана с биомассой и, как следствие, с площадью ассимиляционной поверхности и с высотой растений. Поэтому чем лучше развит посев, тем большую отражающую площадь растений он имеет. Как следствие, при использовании в наших анализах данных NIR были получены наилучшие результаты по взаимосвязи высоты растений озимой пшеницы с данными ДЗЗ (рис. 7).

Нами также был рассчитан коэффициент корреляции между высотой растений и их кустистостью. Полученные результаты свидетельствуют о высокой степени сопряжения между характе-

ристиками развития растений озимой пшеницы – коэффициент корреляции составляет 0,72 (табл. 1).

### Обсуждение и заключение

Анализ полученных данных показал достаточно высокий уровень сопряжения между вегетационным индексом NDVI и высотой растений озимой пшеницы: в 2013 г. коэффициент корреляции был равен 0,60 (значимый для  $p = 0,05$ ), в 2014 г. – 0,66 (значимый для  $p = 0,05$ ), а в 2016 г. – 0,80 (значимый для  $p = 0,01$ ). Наиболее тесная связь между этими показателями в начальный период роста и развития растений получена при анализе объединенных данных за 2013–2016 гг., когда коэффициент корреляции составил 0,85.



Р и с. 7. Зависимость NIR посевов от высоты растений озимой пшеницы. ЗАО «СХП «Родина»  
F i g. 7. Dependence of NIR of crops on the height of winter wheat plants. Rodina Agricultural Company

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

**Связь высоты растений озимой пшеницы с коэффициентом кущения в период  
«всходы – кущение»**

**Relationship between the height of winter wheat plants and the tillering coefficient during the  
seeding and tillering stages**

Коэффициент кущения / Tillering coefficient	1,0–1,5	1,5–2,0	2,0–2,5	2,5–3,0	3,0–3,5	3,5–4,0	4,0–5,0
Высота растения, см / Plant height, cm	5–10	10–13	13–16	16–20	20–25	25–30	>30
Коэффициент корреляции / Correlation coefficient	0,72						

При анализе связи высоты растений и коэффициентов спектральной яркости в красной области спектра электромагнитных волн (RED) коэффициенты корреляции

составили значения  $-0,54$  в 2013 г.,  $-0,18$  в 2014 г. и  $0,69$  в 2016 г., по объединенным данным за период 2013–2016 гг. – минус  $0,40$ . Это объясняется тем, что RED

напрямую связан с максимумом поглощения хлорофилла, а у растений нет прямой зависимости их высоты от количества зеленых пигментов.

Проанализировав коэффициенты корреляции между спектральной яркостью в инфракрасной области спектра электромагнитных волн (NIR) и высотой растений озимой пшеницы, мы получили наилучшие результаты: коэффициент корреляции равнялся 0,65 в 2013 г., 0,72 в 2014 г., 0,69 в 2016 г. По данным за все годы исследований коэффициент корреляции составил 0,92.

При расчете коэффициента корреляции между высотой растений и кусти-

стостью нами были получены результаты, которые свидетельствуют о высокой степени сопряжения между этими характеристиками степени развития растений озимой пшеницы, коэффициент корреляции составляет 0,72.

Таким образом, наши исследования показали, что для оценки состояния и степени развития посевов озимой пшеницы в период «всходы – кущение», в том числе в производственных условиях, могут быть использованы данные ДЗЗ. Для повышения точности такой оценки лучше применять значения спектральной яркости в инфракрасной области спектра.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Влияние сорта, предшественника, уровня минерального питания, сроков и норм высева на относительное содержание хлорофилла в растениях озимой пшеницы / Е. О. Шестакова, Л. Р. Оганян, И. В. Чернова, Е. А. Бильдиева. – DOI 10.25930/2218-855X/122.3.12.2019 // Новости науки в АПК. – 2019. – № 3 (12). – С. 487–490. – URL: <http://dois.fnac.center/2218-855X/3.12.2019/122.pdf> (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.
2. Чернова, И. В. Оценка качества зерна озимой пшеницы в Ставропольском крае по данным дистанционного зондирования Земли / И. В. Чернова, Е. О. Шестакова, Е. А. Бильдиева. – DOI 10.25930/2218-855X/121.3.12.2019 // Новости науки в АПК. – 2019. – № 3 (12). – С. 482–486. – URL: <http://dois.fnac.center/2218-855X/3.12.2019/121.pdf> (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.
3. Менькина, Е. А. Влияние предшественников и удобрений на урожайность озимой пшеницы, возделываемой по технологии No-till на обыкновенном черноземе Ставропольского края / Е. А. Менькина, Н. Н. Шаповалова, А. А. Воропаева. – DOI 10.25930/n5cv-wa92 // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2018. – № 3 (71). – С. 55–59. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35173225> (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.
4. Артемьев, А. А. Эффективность возделывания озимой пшеницы при дифференцированном использовании минеральных удобрений / А. А. Артемьев, А. М. Гурьянов. – DOI 10.24411/0235-2451-2020-10405 // Достижения науки и техники АПК. – 2020. – Т. 34, № 4. – С. 26–31. – URL: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10405> (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.
5. Гостев, А. В. Условия формирования зерна высокого качества в высокопродуктивных ресурсосберегающих агротехнологиях ЦЧР / А. В. Гостев. – DOI 10.24411/0044-3913-2019-10604 // Земледелие. – 2019. – № 6. – С. 16–20. – URL: <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2019-10604> (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.
6. Selecting the Optimal NDVI Time-Series Reconstruction Technique for Crop Phenology Detection / W. Wei, W. Wu, Zh. Li [et al.]. – DOI 10.1080/10798587.2015.1095482 // Intelligent Automation & Soft Computing. – 2016. – Vol. 22, Issue 2. – Pp. 237–247. – URL: <http://agri.ckcest.cn/ass/NK005-20161128004.pdf> (дата обращения: 22.01.2021).
7. Мониторинг состояния растительного покрова территории центрального Ирака с использованием спутниковых данных Landsat-8 / О. С. Токарева, О. А. Пасько, С. М. Маджид, П. Кабраль. – DOI 10.18799/24131830/2020/6/2671 // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 6. – С. 19–31. – URL: <http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/2671> (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.



8. Подлесных, Н. В. Особенности прохождения этапов органогенеза, фаз роста и развития, урожайности и качества озимой твердой и мягкой пшеницы в условиях лесостепи Воронежской области / Н. В. Подлесных // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2015. – № 3 (46). – С. 12–22. – URL: <http://vestnik.vsau.ru/wp-content/uploads/2015/10/12-22.pdf> (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

9. Ториков, В. Е. Фотосинтетический потенциал посевов и накопление сухой биомассы озимой пшеницы в зависимости от сроков посева и уровня минерального питания / В. Е. Ториков, И. Н. Романова, Н. В. Птицына // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 3. – С. 8–12. – URL: <https://clck.ru/SvQ7m> (дата обращения: 22.01.2021).

10. Савиченко, Д. Л. Изучение потенциальной и реализованной продуктивности главного колоса коллекционных образцов озимой пшеницы, обладающих признаком «многоцветковость» / Д. Л. Савиченко, Л. В. Цаценко, Н. Н. Нецадим. – DOI 10.25637/TVAN.2018.03.11. // Таврический вестник аграрной науки. – 2018. – № 3 (15). – С. 99–108. – URL: [http://tvan.niishk.ru/data/documents/11\\_2.pdf](http://tvan.niishk.ru/data/documents/11_2.pdf) (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

11. Бондаренко, Е. В. Фенологические наблюдения за растениями озимой пшеницы при реализации технологий координатного земледелия / Е. В. Бондаренко, М. А. Белик // АгроФорум. – 2019. – № 8. – С. 107–111. – URL: <https://clck.ru/SvQjd> (дата обращения: 22.01.2021).

12. Using Physiologically Active Substances into the Technology for Winter Wheat Cultivation in the Zone of Unstable Moistening of the Stavropol Region / F. V. Eroshenko, T. V. Simatin, E. I. Godunova [et al.]. – DOI 10.25930/gwmmr-ad54 // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2018. – Vol. 9, Issue 5. – Pp. 2121–2128. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36304807> (дата обращения: 22.01.2021).

13. Влияние физиологически активных веществ на продуктивность озимой пшеницы в условиях Ставропольского края / Т. В. Симатин, Е. А. Бильдиева, И. В. Чернова, Е. О. Шестакова. – DOI 10.25930/2218-855X/116.3.12.2019 // Новости науки в АПК. – 2019. – № 3 (12). – С. 460–465. – URL: <http://dois.fnac.center/2218-855X/3.12.2019/116.pdf> (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

14. Дистанционная оценка озимых культур урожая 2017 года в Российской Федерации / С. А. Барталев, Е. С. Елкина, Е. А. Лулян [и др.]. – DOI 10.21046/2070-7401-2017-14-4-275-280 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14, № 4. – С. 275–280. – URL: [http://d33.infospace.ru/d33\\_conf/sb2017t4/275-280.pdf](http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2017t4/275-280.pdf) (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

15. Степанов, А. С. Влияние климатических характеристик и значений вегетационного индекса NDVI на урожайность сои (на примере районов Приморского края) / А. С. Степанов, Т. А. Асеева, К. Н. Дубровин. – DOI 10.32417/1997-4868-2020-192-1-10-19 // Аграрный вестник Урала. – 2020. – Т. 192, № 1. – С. 10–19. – URL: <https://usau.editorum.ru/ru/nauka/article/34557/view> (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

16. Получение временных рядов LAI сельскохозяйственных культур для прогнозирования урожайности / Е. В. Федотова, Ю. А. Маглинец, Р. В. Брежнев, А. Г. Вырвинский. – DOI 10.21046/2070-7401-2020-17-4-195-203 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17, № 4. – С. 195–203. – URL: [http://d33.infospace.ru/d33\\_conf/sb2020t4/195-203.pdf](http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2020t4/195-203.pdf) (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

17. Лысенко, С. А. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутникового мониторинга динамики углерода в наземных экосистемах / С. А. Лысенко. – DOI 10.31857/S0205-96142019448-59 // Исследование Земли из космоса. – 2019. – № 4. – С. 48–59. – URL: <https://journals.eco-vector.com/0205-9614/article/view/15714> (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

18. Dynamic Model of Crops' Normalized Difference Vegetation Index in Central Federal District Environment / A. G. Bukhovets, E. A. Semin, M. V. Kucherenko, S. I. Yablonovskaya. – DOI 10.1088/1755-1315/548/4/042019 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 548. – 7 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/548/4/042019> (дата обращения: 22.01.2021).

19. Информационные технологии в системе точного земледелия / А. В. Акинчин, Л. В. Левшаков, С. А. Линков [и др.] // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 9. – С. 16–21. – URL: <http://www.journal-kgsha.ru/data/documents/2017-09.pdf> (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

20. Развитие метода автоматического распознавания озимых культур на основе спутниковых данных для оценки их состояния на территории республики Крым / Д. Е. Плотников, Е. С. Ёлкина, Е. А. Дунаева [и др.]. – DOI [10.33952/2542-0720-2020-1-21-64-83](https://doi.org/10.33952/2542-0720-2020-1-21-64-83) // Таврический вестник аграрной науки. – 2020. – № 1 (21). – С. 64–82. – URL: [http://tvan.niishk.ru/data/documents/7\\_11.pdf](http://tvan.niishk.ru/data/documents/7_11.pdf) (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

21. Использование сервиса спутникового мониторинга «БЕГА-Science» для оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур / С. А. Линков, А. В. Акинчин, И. С. Донченко, А. А. Попов. – DOI [10.25930/77n0-vw24](https://doi.org/10.25930/77n0-vw24) // Новости науки в АПК. – 2018. – № 2-2 (11). – С. 16–19. – URL: <https://fnac.center/> (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

*Поступила 11.08.2020; одобрена после рецензирования 10.09.2020; принята к публикации 24.09.2020*

*Об авторах:*

**Сторчак Ирина Геннадьевна**, старший научный сотрудник отдела физиологии растений ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр» (356241, Российская Федерация, г. Михайловск, ул. Никонова, д. 49), Researcher ID: [AAB-4142-2020](https://orcid.org/0000-0001-8741-6882), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8741-6882>, [sniish.storchak@gmail.com](mailto:sniish.storchak@gmail.com).

**Ерошенко Федор Владимирович**, заведующий отделом физиологии растений ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр» (356241, Российская Федерация, г. Михайловск, ул. Никонова, д. 49), доктор биологических наук, Researcher ID: [AAB-4769-2020](https://orcid.org/0000-0003-0238-3861), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0238-3861>, [yer-sniish@mail.ru](mailto:yer-sniish@mail.ru)

**Оганян Лусине Робертовна**, научный сотрудник отдела физиологии растений ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр» (356241, Российская Федерация, г. Михайловск, ул. Никонова, д. 49), Researcher ID: [AAB-4805-2020](https://orcid.org/0000-0002-0019-8956), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0019-8956>, [oganyan@inbox.ru](mailto:oganyan@inbox.ru)

**Шестакова Елена Олеговна**, научный сотрудник отдела физиологии растений ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр» (356241, Российская Федерация, г. Михайловск, ул. Никонова, д. 49), Researcher ID: [AAB-4741-2020](https://orcid.org/0000-0001-5764-0576), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5764-0576>, [shestakova.e.o@yandex.ru](mailto:shestakova.e.o@yandex.ru)

**Калашникова Анастасия Александровна**, аспирант отдела физиологии растений ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр» (356241, Российская Федерация, г. Михайловск, ул. Никонова, д. 49), Researcher ID: [AAE-8789-2021](https://orcid.org/0000-0002-3422-2256), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3422-2256>, [anaskar@mail.ru](mailto:anaskar@mail.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

И. Г. Сторчак – проведение исследований, подготовка начального варианта текста с последующей доработкой, подготовка и первичный анализ литературных данных.

Ф. В. Ерошенко – научное руководство, формулирование основной концепции, анализ и доработка текста.

Л. Р. Оганян – проведение исследований.

Е. О. Шестакова – проведение исследований.

А. А. Калашникова – проведение исследований.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Shestakova E.O., Oganyan L.R., Chernova I.V., et al. Effect of Variety, Predator, Level of Mineral Nutrition, Timing and Normal Seeding Rates on the Relative Content of Chlorophyll in Winter Wheat Plants. *Novosti nauki v APK = News of Science in the Agroindustrial Complex*. 2019; (3):487-490. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25930/2218-855X/122.3.12.2019>





2. Chernova I.V., Shestakova E.O., Bildieva E.A. Assessment of the Quality of Grain of Winter Wheat in the Stavropol Territory under Data Protection of the Earth. *Novosti nauki v APK* = News of Science in the Agroindustrial Complex. 2019; (3):482-486. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25930/2218-855X/121.3.12.2019>
3. Menkina Ye.A., Shapovalova N.N., Voropaeva A.A. Influence of Predecessors and Fertilizers on the Yields of Winter Wheat Cultivated by Using the No-Till Technology on Common Chernozem Soil in Stavropol Region. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Orenburg State Agrarian University Bulletin. 2018; (3):55-59. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25930/n5cv-wa92>
4. Artemjev A.A., Guryanov A.M. Efficiency of Winter Wheat Cultivation with the Differentiated Application of Mineral Fertilizers. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AIC. 2020; 34(4):26-31. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10405>
5. Gostev A.V. Conditions for the Formation of High-Quality Grain in Highly Productive Resource-Saving Agricultural Technologies in the Central Chernozem Region. *Zemledelie* = Agriculture. 2019; (6):16-20. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2019-10604>
6. Wei W., Wu W., Li Zh., et al. Selecting the Optimal NDVI Time-Series Reconstruction Technique for Crop Phenology Detection. *Intelligent Automation & Soft Computing*. 2016; 22(2):237-247. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/10798587.2015.1095482>
7. Tokareva O.S., Pasko O.A., Majid S.M., et al. Monitoring Vegetation State in the Central Iraq Using Landsat-8 Satellite Data. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2020; 331(6):19-31. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/6/2671>
8. Podlesnykh N.V. Peculiarities of Stages of Organogenesis, Growth and Development Phases, Crop Yield and Quality of Hard and Soft Winter Wheat under the Conditions of the Forest-Steppe of Voronezh Oblast. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Voronezh State Agrarian University Bulletin. 2015; (3):12-22. Available at: <http://vestnik.vsu.ru/wp-content/uploads/2015/10/12-22.pdf> (accessed 22.01.2021). (In Russ.)
9. Torikov V.E., Romanova I.N., Ptitsyna N.V. Dependence of Photosynthetic Crop Potential and Dry Biomass Accumulation of Winter Wheat on the Sowing Dates and Mineral Nutrition Level. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy. 2017; (3):8-12. Available at: <https://clck.ru/SvQ7m> (accessed 22.01.2021). (In Russ.)
10. Savichenko D.L., Tsatsenko L.V., Neshchadim N.N. Comparative Characteristic of Potential and Real Productivity of the Main Ear of Collection Samples of Winter Wheat Having a "Multiflorous Effect" Feature. *Tavrisheskiy vestnik agrarnoy nauki* = Tavrida Bulletin of Agrarian Science. 2018; (3):99-108. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25637/TVAN.2018.03.11>
11. Bondarenko Ye.V., Belik M.A. [Phenological Observations of Winter Wheat Plants in the Implementation of Coordinate Farming Technologies]. *AgroForum* = AgroForum. 2019; (8):107-111. Available at: <https://clck.ru/SvQjd> (accessed 22.01.2021). (In Russ.)
12. Eroshenko F.V., Simatin T.V., Godunova E.I., et al. Using Physiologically Active Substances into the Technology for Winter Wheat Cultivation in the Zone of Unstable Moistening of the Stavropol Region. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2018; 9(5):2121-2128. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.25930/gwmr-ad54>
13. Simatin T.V., Bildieva E.A., Chernova I.V., et al. The Influence of Physiologically Active Substances on the Productivity of Winter Wheat in the Conditions of Stavropol Region. *Novosti nauki v APK* = News of Science in the Agroindustrial Complex. 2019; (3):460-465. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25930/2218-855X/116.3.12.2019>
14. Bartalev S.A., Elkina E.S., Loupian E.A., et al. Remote Sensing of 2017 Winter Crops in the Russian Federation. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space. 2017; 14(4):275-280. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-4-275-280>
15. Stepanov A.S., Aseyeva T.A., Dubrovin K.N. The Influence of Climatic Characteristics and Values of NDVI at Soybean Yield (On the Example of the Districts of the Primorskiy Region). *Agrarnyy Vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Ural. 2020; 192(1):10-19. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2020-192-1-10-19>

16. Fedotova E.V., Maglinets Yu.A., Brezhnev R.V., et al. Obtaining Time Series of LAI to Predict Crop Yield. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space. 2020; 17(4):195-203. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-4-195-203>
17. Lysenko S.A. Crop Yield Forecasting Based on the Satellite Monitoring of Carbon Dynamics in Terrestrial Ecosystems. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* = Exploring the Earth from Space. 2019; (4):48-59. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019448-59>
18. Bukhovets A.G., Semin E.A., Kucherenko M.V., et al. Dynamic Model of Crops' Normalized Difference Vegetation Index in Central Federal District Environment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 548. 7 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/4/042019>
19. Akinchin A.V., Levshakov L.V., Linkov S.A., et al. Information Technologies in the System of Precision Farming. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskohozyaystvennoy akademii* = Vestnik of the Kursk State Agricultural Academy. 2017; (9):16-21. Available at: <http://www.journal-kgsha.ru/data/documents/2017-09.pdf> (accessed 22.01.2021). (In Russ.)
20. Plotnikov D.E., Elkina E.S., Dunaieva Ie.A., et al. Development of the Method for Automatic Winter Crops Mapping by Means of Remote Sensing Aimed at Crops State Assessment over the Republic of Crimea. *Tavricheskiy vestnik agrarnoy nauki* = Tavrida Bulletin of Agrarian Science. 2020; (1):64-82. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.33952/2542-0720-2020-1-21-64-83>
21. Linkov S.A., Akinchin A.V., Donchenko I.S., et al. The Use of Satellite Monitoring Service "Vega-Science" to Assess the Status of Crops. *Novosti nauki v APK* = News of Science in the Agroindustrial Complex. 2018; (2):16-19. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25930/77n0-vw24>

*Received 11.08.2020; approved after reviewing 10.09.2020; accepted for publication 24.09.2020*

*About the authors:*

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

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

**Lusine R. Oganyan**, Researcher of the Department of Plant Physiology, North Caucasus Federal Agricultural Research Centre (49 Nikonov St., Mikhailovsk 356241, Russian Federation), Researcher ID: AAB-4805-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0019-8956>, [oganyan@inbox.ru](mailto:oganyan@inbox.ru)

**Elena O. Shestakova**, Researcher of the Department of Plant Physiology, North Caucasus Federal Agricultural Research Centre (49 Nikonov St., Mikhailovsk 356241, Russian Federation), Researcher ID: AAB-4741-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5764-0576>, [shestakova.e.o@yandex.ru](mailto:shestakova.e.o@yandex.ru)

**Anastasiya A. Kalashnikova**, Postgraduate Student of the Department of Plant Physiology, North Caucasus Federal Agricultural Research Centre (49 Nikonov St., Mikhailovsk 356241, Russian Federation), Researcher ID: AAE-8789-2021, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3422-2256>, [anaskar@mail.ru](mailto:anaskar@mail.ru)

*Contribution of the authors:*

I. G. Storchak – research, preparation of the initial version of the text with subsequent revision, preparation and primary analysis of literary data.

F. V. Eroshenko – scientific guidance, formulation of the research concept, analysis and revision of the text.

L. R. Oganyan – research.

E. O. Shestakova – research.

A. A. Kalashnikova – research.

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



## Повышение эффективности измельчения сахарной свеклы в центробежных свеклорезках

Ф. Я. Рудик<sup>1</sup>, С. А. Богатырев<sup>1\*</sup>, А. П. Ковылин<sup>2</sup>,  
М. С. Тульева<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (г. Саратов, Российская Федерация)

<sup>2</sup>ООО «Анастасьинское» (с. Анастасьино, Российская Федерация)

<sup>3</sup>НАО «Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана» (г. Уральск, Республика Казахстан)

\*tettet@inbox.ru

**Введение.** Измельчение сахарной свеклы должно осуществляться с минимальными потерями в центробежных свеклорезках ножами особой конструкции, обеспечивающими частое и постоянное хаотичное продольно-поперечное изрезание кольцевых проводящих сучков свеклы. Используемые ножи с ромбовидной режущей кромкой обладают низкими показателями безотказности и долговечности. Значительные динамические нагрузки, приходящиеся на режущие грани ножа от ударов измельчаемой свеклы, ведут к усталостным разрушениям граней и изнашиванию режущих кромок. Неудовлетворительные показатели безотказности ножей приводят к ухудшению на 28 % качественных составляющих стружки и к потерям сахарозы. Поломки и ежесменные перезаточки режущих кромок способствуют снижению прочностных характеристик ножей. Целью работы является повышение надежности ножей центробежных свеклорезок путем конструктивно-технологического упрочнения в процессе их производства и восстановления.

**Материалы и методы.** Рациональные параметры измельчения оценивались двумя показателями: толщиной и длиной стружки. Состояние режущих кромок ножей определялось микрометром износа и деформации граней. Физико-механические показатели анализировались на основании величин износостойкости, микротвердости, выносливости на изгиб.

**Результаты исследования.** В результате анализов дефектного состояния ножей центробежных свеклорезок и теоретических исследований процесса измельчения были сформулированы факторы, влияющие на проникаемость стружки и эффективность ее измельчения ножами специальной ромбовидной конструкции. Экспериментальные исследования позволили установить динамически обоснованные конструктивные параметры усовершенствованного ножа, изготовленного накаткой.

**Обсуждение и заключение.** Была проведена производственная проверка качества измельчения сахарной свеклы в зависимости от технического состояния ножей. Предложенные меры обеспечили повышение показателей долговечности ножей на 27–30 %, износостойкости режущих кромок на 20 %, предела выносливости режу-

щих граней на 25 % и посменное увеличение длины стружки на 18–20 % с повышением ее проницаемости на 16–18 %.

**Ключевые слова:** сахарная свекла, измельчение, стружка, режущая грань, режущая кромка, дефектное состояние, технология, восстановление, изготовление, износостойкость, выносливость на изгиб, безотказность, долговечность

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

**Для цитирования:** Повышение эффективности измельчения сахарной свеклы в центробежных свеклорезках / Ф. Я. Рудик, С. А. Богатырев, А. П. Ковылин, М. С. Тулиева. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202101.037-055](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.037-055) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 1. – С. 37–55.

*Original article*

## Improving the Efficiency of Grinding Sugar Beet in Centrifugal Beet Cutters

F. Ya. Rudik<sup>a</sup>, S. A. Bogatyrev<sup>a\*</sup>, A. P. Kovylin<sup>b</sup>,  
M. S. Tulieva<sup>c</sup>

<sup>a</sup>*Saratov State Agrarian University (Saratov, Russian Federation)*

<sup>b</sup>*Anastasinskoe LLC (Anastasino, Russian Federation)*

<sup>c</sup>*Zhangir Khan University (Uralsk, Republic of Kazakhstan)*

\*[tettet@inbox.ru](mailto:tettet@inbox.ru)

**Introduction.** Grinding sugar beet should be carried out with minimal losses in centrifugal beet cutters with specially designed knives that provide frequent and constant chaotic longitudinal-lateral cutting of circular conductive beet knots. The objective of the work is to increase the reliability of the knives of centrifugal beet cutters by structural and technological strengthening in the process of their production and restoration.

**Materials and Methods.** The state of the cutting edges of the knives was determined by using the micrometric measurement of the wear and deformation of the edges. Physical and mechanical indicators were analyzed based on the values of wear resistance, microhardness, and bending endurance.

**Results.** The analyzes of the defective state of the knives of centrifugal beet cutters and theoretical studies of the grinding process have allowed formulating the factors affecting the permeability of the beet chips and the efficiency of their grinding with knives of a special diamond-shaped design. Experimental studies have made it possible to establish dynamically substantiated design parameters of an improved knurled knife.

**Discussion and Conclusion.** The proposed measures ensured an increase in the durability of knives by 27–30%, the relative wear resistance of cutting edges by 20%, the limit of endurance of cutting edges for bending by 25% and a shift increase in the length of chips by 18–20% with an increase in its permeability by 16–18%.

**Keywords:** sugar beet, grinding, chips, cutting edge, cutting hem, defective condition, technology, restoration, production, wear resistance, bending endurance, reliability, durability

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

**For citation:** Rudik F.Ya., Bogatyrev S.A., Kovylin A.P., et al. Improving the Efficiency of Grinding Sugar Beet in Centrifugal Beet Cutters. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(1):37-55. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.037-055>

## Введение

Сахар необходим для обогащения организма человека углеводами. Годовое потребление этого продукта питания в России составляет порядка 5,5 млн т [1; 2]. В стране в настоящее время действует около 100 сахарных заводов с различными производственными мощностями. При этом слабым технологическим звеном при производстве сахара является процесс измельчения сахарной свеклы в стружку, от которого зависит массоотдача глюкозы и фруктозы в диффузионном аппарате [3; 4]. Качество измельчения сахарной свеклы оценивается формой и размерами измельченных частиц в центробежной свеклорезке, а они, в свою очередь, обеспечиваются использованием ножей специальной конструкции. Значительные динамические нагрузки от ударных воздействий корнеплодов свеклы на ножи и их последующее инерционное измельчение ведут к поломкам и выкрашиванию режущих граней, что в итоге ведет к значительным потерям сахарозы, достигающим до 28–30 %.

Цель работы заключается в повышении показателей безотказности и долговечности ножей центробежных свеклорезок путем конструктивно-технологического упрочнения при их производстве и восстановлении.

Задачи исследования: теоретически и экспериментально установить особенности работы и причины дефектного состояния ножей центробежных свеклорезок во взаимосвязи с качественными показателями измельчаемой стружки; усовершенствовать конструкцию режущих граней ножа с повышенными показателями выносливости на изгиб и износостойкости; разработать технологию изготовления и восстановления ножей методами объемной пластической деформации и накатки; исследовать качественные показатели свекловичной стружки в зависимости от наработки ножей.

## Обзор литературы

Перерабатывающие технологии продукции растениеводства и животноводства во многом зависят от операций ее измельчения. Причем процесс измельчения зависит от биологического строения, физико-механических свойств и иных составляющих продукта измельчения [5; 6]. Качество измельчения влияет на продуктивную ценность, ресурсосбережение, себестоимость и прочие показатели производства продуктов питания [7].

Необходимость изучения технологии измельчения сахарной свеклы обусловлена прежде всего ее биологическим строением. В корнеплоде природой заложены концентрические кольца проводящих пучков, а между ними имеется рыхлая паренхимная ткань, в которой и откладываются сахара. Эта особенность строения сахарной свеклы и вызывает затруднения в высвобождении свекловичного сока с растворенной в нем сахарозой [8; 9]. Отсюда и возникли особые требования к измельчающим свеклу ромбовидным режущим инструментам, совершающим частое продольно-поперечное перемещение. При этом установлены качественные показатели свекловичной стружки: длина 11–14 м в 100 г навески измельченного продукта и площадь поперечного сечения, которая должна составлять от 1,5 до  $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ . Соблюдение вышеуказанных параметров стружки позволяет получить ее максимальную проницаемость и, соответственно, выход сахара в диффузионной камере [10; 11]. Однако применяемые в настоящее время на сахарных заводах технологические операции измельчения свеклы в центробежных свеклорезках обладают нестабильными и низкими показателями выхода сахара [12]. Исследователями процесса измельчения корнеплодов установлены энергосиловые



взаимодействия сахарной свеклы с неподвижным цилиндром и с ножевыми рамами свеклорезок [13]. При этом установлены усилия, действующие на ножи, что дало возможность характеризовать процесс измельчения как динамически жесткий [14]. В последующих исследованиях были установлены режимные показатели измельчения корнеплодов (табл. 1) [15].

Данные таблицы 1 указывают на доминирующие нагрузки, приходящиеся на нож.

Расчетно-опытным путем установлено, что нагрузки, приходящиеся на режущие грани и кромки свеклорезного ножа (рис. 1), ведут к образованию дефектов: невозстанавливаемым (деформациям и поломкам граней) и восстанавливаемым (износу режущих кромок). Износ устраняется перезаточкой режущих кромок, число которых, вследствие укорачивания длины режущих граней и изменения в связи

с этим характера резания, ограничено 4-5 заточками [16].

На этом основании предложено конструктивно-технологическое совершенствование ножей, заключающееся в изменении конструкции режущих граней с повышением их прочности на изгиб и износостойкости режущей кромки за счет внесения корректировок в технологию изготовления [17].

В работе В. Б. Морозова приводятся данные о низких показателях работоспособности ножей и о необходимости повышения их прочности [18]. Конструкция ножа с гребенчатыми режущими гранями предложена более века назад и подвергалась только незначительным совершенствованиям.

Конструкции ножа с клиновидными режущими элементами не получили широкого распространения по причинам низкого качества свекловичной стружки и сложности изготовления инструмента [19; 20].

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

### Показатели рабочего процесса измельчения сахарной свеклы в центробежной свеклорезке

### Indicators of the working process of grinding sugar beet in centrifugal beet cutting

Показатель / Indicator	Обозначение / Designation	Единица измерения / Unit	Значение / Value
Угловая скорость улитки / Angular velocity	$\omega$	рад/с / rad/s	9,42
Скорость резания / Cutting speed	$V$	м/с / m/s	6,59
Сменная производительность / Productivity	$P$	т/сут / t/d	388–423
Число ударных воздействий на 1 нож в сутки / The number of impacts on 1 knife per day	$N$	цикл/сут / cicle/d	35 255–53 887
Общее усилие резания / Cutting force	$F$	Н / N	1 836,36–3 096,79
Момент от резания свеклы / Cutting moment	$M$	Н·м / N·m	1 285,46–2 167,75
Усилие прижатия свеклы при скольжении по граням ножа / The force of pressing beet when sliding on the edges of the knife	$F_n$	Н / N	8 427,88–9 193,95
Удельное давление свеклы при инерционном движении по режущим кромкам / Specific pressure of beet during inertial movement along cutting edges	$f$	Н/м / N/m	16 594,38–18 102,96



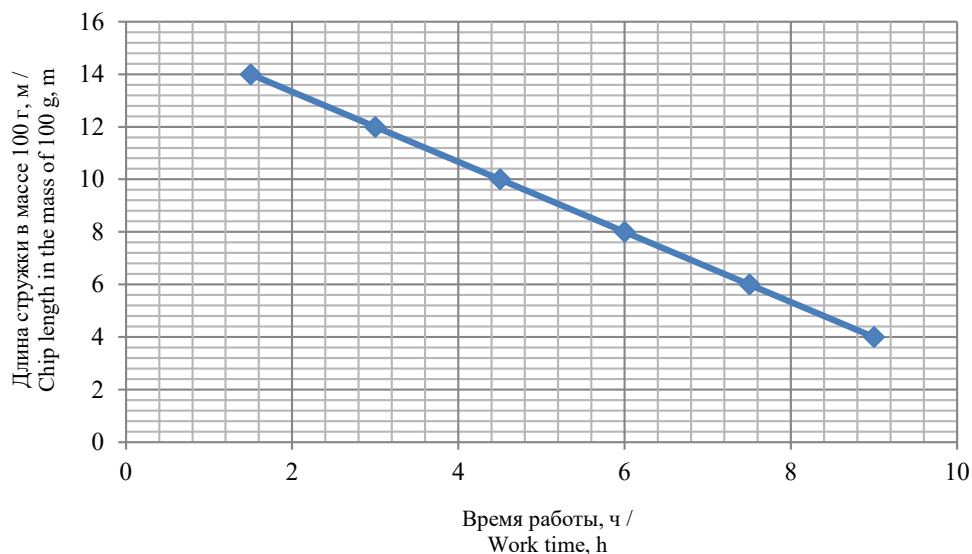


Р и с. 1. Нож свеклорезный 1011-В

F i g. 1. Beet cutter knife 1011-B

Экспериментально установлено, что только путем повышения показателей выносливости на изгиб и износостойкости можно повысить

параметры безотказности, обеспечивающие высокое качество измельчения свеклы в течение сменной работы (рис. 2).



Р и с. 2. Изменение длины свекловичной стружки в течение смены

F i g. 2. Change the length of beet chips during the shift

В соответствии с графиком, представленным на рисунке 2, резкое снижение качества стружки наблюдается уже после 5-6 часов наработки в смену, что приводит к потере 20–28 % сахарозы. Следовательно, отказы ножа по функциональным признакам, ведущим к изменению размеров и формы стружки, и по параметрическим, связанным с ухудшением проницаемости стружки, начинают проявляться уже в середине сменной наработки. В этой связи возникает необходимость продления наработки на отказ ножей до приемлемого срока, ограниченного временем окончания смены и устранения отказа, путем перезаточки ножей.

Увеличить ресурс ножей можно за счет повышения прочности режущих кромок на изгиб. Оригинальность и обоснованность применения метода пластической деформации для изготовления и восстановления режущего инструмента, используемого в перерабатывающих отраслях промышленности, приведены в изобретениях ученых ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» [21–24]. В ряде работ доказано, что режущий инструмент, используемый в пищевых производствах на предприятиях АПК и изготовленный методами горячей пластической деформации, обладает повышенной износостойкостью (на 15–20 %) и высокими показателями ресурсосбережения (коэффициент использования металла достигает 0,90–0,95) [25–27]. Перечисленные достоинства предлагаемой технологии подтверждают перспективность ее дальнейшего широкого использования.

### Материалы и методы

Качество свекловичной стружки определялось уровнем проницаемости в процессе экстрагирования сахарозы, зависящей, в свою очередь, от длины стружки в 100 г навески, оптималь-

ная длина которой должна находиться в пределах от 8 до 14 мм, при этом количество брака не должно превышать 3 %.

Микрометражом определялись величины износов режущих граней по длине после каждой сменной наработки центробежной установки, а также после каждой перезаточки кромок ножей. Факты наличия короблений, выкрашиваний и усталостных поломок устанавливались визуально.

Процесс упрочнения режущих граней при их формировании методами горячей пластической деформации в штамповой оснастке и в накатном устройстве исследовался методом оценки микротвердости по глубине слоя режущих граней по срезам с интервалом 0,25 мм. Для оценки микротвердости образцов путем замера увеличенного отпечатка от алмазной пирамиды использовался прибор ПМТ-3.

Физические процессы упрочнения металла граней ножей оценивались показателями остаточных напряжений расширения или сжатия, а также плотностью дислокаций, образованных после воздействия пластической деформации. Для этих целей использовались методы рентгеноструктурных исследований.

Подсчет микронапряжений осуществлялся методом аппроксимации.

Износостойкость граней ножей исследовалась по циклу ускоренных испытаний методом моделирования условий внешнего воздействия на машине трения.

При испытаниях на выносливость на изгиб режущие грани ножа подвергались вибрационным нагрузкам на установке ВУ 5 / 5 000 с режимными характеристиками, сходными с условиями измельчения сахарной свеклы: диапазон изменения частоты колебаний от 5 до 5 000 Гц, ускорение устойчивости на изгиб 20 Н/см<sup>2</sup>, максимальная амплитуда ускорений 1,8 мм, масса испытуемых образцов до 5 кг.

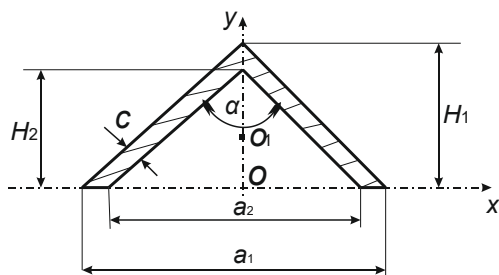
Результаты экспериментальных исследований обрабатывались с использованием стандартных прикладных программ Mathcad, Eureka, Excel.

### Результаты исследования

При измельчении сахарной свеклы в центробежной свеклорезке возникают значительные инерционные силы трения свеклы о режущие кромки ножей. Измельчение сахарной свеклы представляет собой процесс резания с участием касательной силы с наличием скольжения при продольном перемещении. Процесс резания ужесточается за счет циклического ударного воздействия свеклы о режущие грани. В первом случае инерционное перемещение свеклы по граням ножа вызывает повышенный износ режущих граней, что после устранения следов износа и заточки режущих кромок вызывает уменьшение длины граней и, соответственно, ухудшение качества стружки. А во втором случае ударные нагрузки вызывают деформации граней и порождают знакопеременные колебания, ведущие к усталостным поломкам.

Дефектное состояние ножей ведет к недобору сахарозы по причине ухудшения качества стружки и необходимости частого устранения отказов.

С целью обоснования целесообразности повышения износостойкости и стойкости на изгиб исследовались динамические нагрузки, приходящиеся на режущие грани ножа (рис. 3).



Р и с. 3. Сечение режущей грани ножа

F i g. 3. Section of the cutting edge of the knife

Исходя из приведенной схемы, момент инерции при резании стружки определяется из выражения:

$$j_x = \frac{a_1 H_1^3}{12} - \frac{a_2 H_2^3}{12} - S, \quad (1)$$

где  $a_1$  и  $a_2$  – шаг грани и ширина полости грани соответственно, мм:

$$a_2 = a_1 - 2 \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (2)$$

$H_1$  и  $H_2$  – высота грани и высота полости грани соответственно, мм;  $S$  – площадь сечения стружки, мм<sup>2</sup>:

$$S = \frac{C}{2} \left( a_1 \cos \frac{\alpha}{2} + 2H_1 \sin \frac{\alpha}{2} - 2C^2 \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \right), \quad (3)$$

где  $C$  – толщина грани ножа, мм.

Момент инерции равен:

$$j_x = \frac{a_1 H_1^3}{12} - \frac{(a_1 - 2C^2 \sin \frac{\alpha}{2})(H_1 - 2C^2 \sin \frac{\alpha}{2})}{12} - \frac{H_1^2}{9} \cdot \frac{C}{2} \left( a_1 \sin \frac{\alpha}{2} + 2H_1 \sin \frac{\alpha}{2} - 2C^2 \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \right). \quad (4)$$

Тогда напряжения, приходящиеся на грани ножа при инерционном резании, описываются выражением:

$$\sigma_{\text{гр}} = -\frac{P_y l}{3j} - \frac{P_x}{S}, \quad (5)$$

где  $P_y$  – усилие на грани ножа от прижатия свеклы, Н;  $P_x$  – усилие на

преодоление реакции свеклы на внедрение в нее граней ножа, Н;  $l$  – длина стружки, мм.

На режущие грани ножа действуют следующие нагрузки:

1. Сила реакции на внедрение свеклы в режущие грани:

$$N_x = \pi R [\sigma_{сж}] \frac{2H_1}{\cos \frac{\alpha}{2}}, \quad (6)$$

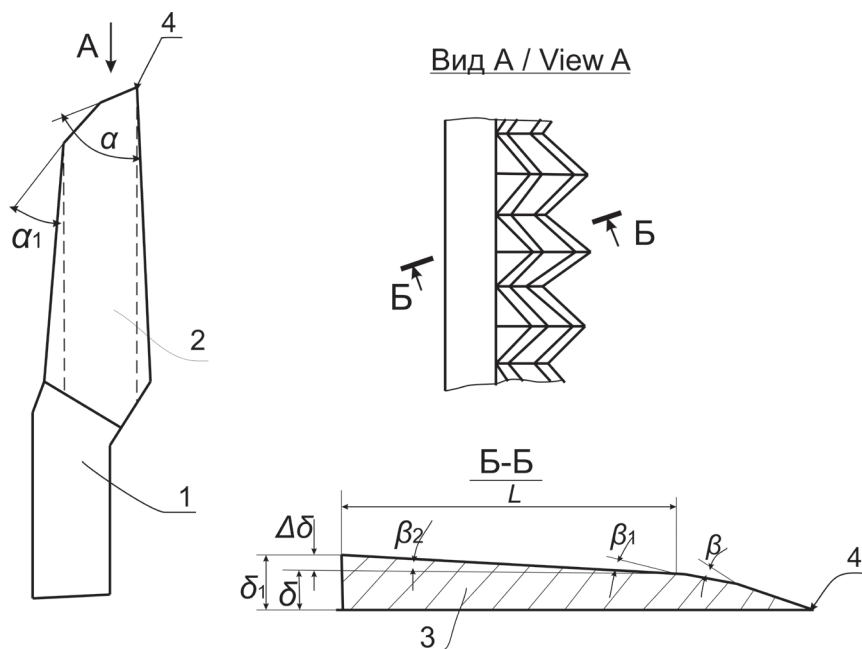
где  $R$  – условный радиус свеклы, мм;  $[\sigma_{сж}]$  – напряжение сжатия свеклы, Н.

2. Сила преодоления режущей гранью изгиба стружки:

$$N_\beta = \frac{1}{2} [\sigma_{сж}] l \cdot a_2 = \frac{1}{2} [\sigma_{сж}] l (a_1 - 2 \sin \frac{\alpha}{2}). \quad (7)$$

Исходя из данных расчетов усилий, приходящихся на грани ножа при измельчении сахарной свеклы в центробежной свеклорезке, принято решение о повышении усталостной прочности путем конструктивного усовершенствования граней ножей (рис. 4) [28].

Упрочнение режущей грани ножа обеспечивается за счет создания переменного угла заострения от режущей кромки к основанию грани. Конструктивно грань ножа 3 подвергается утолщению путем приращения заострения от основного угла  $\beta = 8-10^\circ$  с последующим утолщением стенки на углы  $\beta_1$ , создающие дополнительное заострение на  $4-5^\circ$  с вершиной 4 на расстоянии 1,5–2,0 толщины сечения грани от начального состояния. Режущая кромка подвергается заострению основного  $\alpha$  и дополнительного  $\alpha_1$  углов. Дополнительный угол заострения  $\beta_2$  относи-



Р и с. 4. Конструкция ножа с упрочненными дном и вершиной грани:  
1 – привалочная плоскость; 2 – кромка ножа; 3 – грань ножа; 4 – вершина

F i g. 4. Knife design with reinforced bottom and edge:

1 – mating plane; 2 – sharp edge; 3 – edge of knife; 4 – pointed top

тельно  $\beta$  и  $\beta_1$  повышает толщину грани в опасном сечении на  $\delta = 1,2\text{--}1,5$  мм, подвергаемом активному воздействию напряжений на изгиб граней по длине грани  $l$ . Данное утолщение режущих граней позволит повысить их выносливость на изгиб. Дополнительное упрочнение режущих граней и повышение их износостойкости обеспечивается за счет использования горячей пластической деформации заготовки в штамповой оснастке. Формообразование граней ножа осуществляется по схеме, представленной на рисунке 5.

Нагретая до  $1\ 000\ ^\circ\text{C}$  пластина заготовки  $1$  фиксируется штифтами  $2$  в полости зубчатой матрицы  $3$ . Пуансон штампа с зубьями, выполненными зеркально зубьям матрицы  $4$ , при срабатывании траверсы прессы формирует режущие грани ножа. Финишная обработка граней ножа осуществляется многофрезерной оснасткой в два прохода по каждой стороне ножа.

В разработанной оснастке, наряду со штамповкой профиля ножа при их изготовлении, возможно восстановление деформированных при работе режущих граней за счет использования дополнительных сменных формообразующих элементов матрицы и пуансона штампа.

Формообразование режущих граней и привалочной плоскости ножа обеспечивается прилагаемым к пуансону уси-

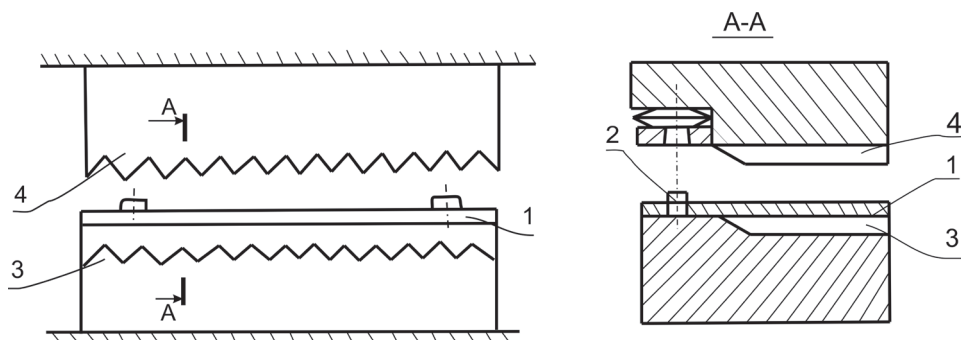
лием деформации. С учетом особенностей конструкции ножа усилие деформации рассчитывается выражением (8):

$$P = 2,87\sigma_s \sin \frac{\alpha}{2} S \cdot n, \quad (8)$$

где  $\sigma_s$  – напряжение текучести материала заготовки, зависящее от температуры ее нагрева (рекомендуемая температура  $950\text{--}1\ 000\ ^\circ\text{C}$ ), МПа;  $\alpha$  – угол режущей грани ножа, град;  $S$  – площадь поперечного сечения одного сектора режущей грани,  $\text{м}^2$ ;  $n$  – количество режущих граней ножа, шт.

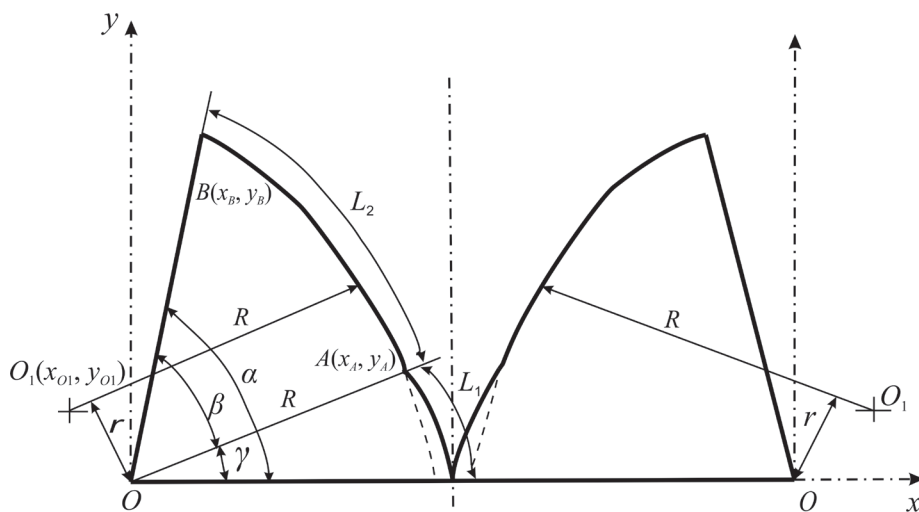
Для формообразования режущей части упрочненной конструкции ножа с переменным углом по длине грани предложена схема прокатки заготовки, полученной штамповкой, в установке со смещенными геометрическими осями валцов (рис. 6).

Математически обоснованное смещение геометрических осей валцов по предложенной схеме позволяет формировать постепенное с нарастающей по длине грани приращение ее толщины. Смещение геометрических осей валцов от точки  $O$  в точку  $O_1$  обеспечивает получение лекальной деформирующей кривой на накатной установке с начальным радиусом от оси  $O$  с постепенным приращением радиуса кривизны на расстоянии  $L_1$  с координатами  $A(x_A, y_A)$ ,



Р и с. 5. Схема формообразования ножей в штампе

F i g. 5. The scheme of forming knives in the stamp



Р и с. 6. Расчетная схема смещения осей валцов и деформируемых поверхностей

Fig. 6. Scheme for shifting the axes of the rollers and deformable surfaces

формирующим угол  $\beta$  на рисунке 4. Перемещение оси  $O$  в точку  $O_1$  сохраняет неизменным радиус  $R$ , передвигая при этом деформирующую кривую на угол  $\beta_1$ , что в последующем от координаты  $B(x_B, y_B)$  обеспечивает приращение стенок граней на участке  $L_2$ , соответствующее конструктивному углу  $\beta_2$  на рисунке 4.

Исходя из схемы, приведенной на рисунке 6, размеры граней формируются за счет нового деформирующего профиля накатной поверхности, образуемого на расстоянии  $r$ , равном размеру смещения центра  $O$  в точку  $O_1$ , и появляющихся при этом углов  $\alpha, \beta$  и  $\gamma$ . Координата точки  $O_1(x_{O1}, y_{O1})$  описывается уравнением окружности:

$$\begin{cases} (x_A + x_{O1})^2 + (y_A + y_{O1})^2 \\ (x_B + x_{O1})^2 + (y_B + y_{O1})^2 \end{cases} \quad (9)$$

Отсюда с учетом размера радиуса  $R$  координата  $y_{O1}$  определяется выражением:

$$y_{O1} = y_A \pm \sqrt{R^2 - (x_A - x_{O1})^2}. \quad (10)$$

Координаты точек  $A$  и  $B$  определяются выражениями:

$$\begin{aligned} x_A &= R \sin \gamma; y_A = R \cos \gamma; \\ x_B &= -R(R + r) \sin \beta; \\ y_B &= (R + r) \cos \beta. \end{aligned} \quad (11)$$

Тогда длины дуг  $L_1$  и  $L_2$  по рисунку 6 равны:

$$L_1 = \frac{\pi R \alpha}{180^\circ}; L_2 = \frac{\pi(R + r) \beta}{180^\circ}. \quad (12)$$

А углы  $\alpha, \beta$  и  $\gamma$  принимают зависимости:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{(L_1 + L_2)180^\circ}{\pi R}; \gamma = \frac{L_1 180^\circ}{\pi R}; \\ \beta &= \frac{L_2 180^\circ}{\pi(R + r)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Построение деформирующей кривой накатных валцов по предложенной методике позволяет осуществлять прокатку режущих граней ножа за один проход. При этом для установки заго-



товки в вальцы в устройстве предусмотрены их отвод в замкнутом состоянии и сведение при деформации.

В соответствии с поставленными целью и задачами в работе исследовались физико-механические и структурные характеристики свеклорезных ножей с конструктивно упрочненными режущими гранями. Основные показатели, обуславливающие процесс упрочнения и повышение безотказности и долговечности, представлены в таблице 2.

В соответствии с представленными в таблице 2 данными упрочнение режущих граней ножей обеспечивается не за счет конструктивного утолщения их дна и высоты, а за счет приложения направленных усилий деформации с образованием тангенциальных линий скольжения при штамповке и накатке и, соответственно, сдвигов и двойникования структуры металла. Наряду с этим дендритное состояние макроструктуры металла при деформации превращается в мелкозернистое строение, непрерывное по всему профилю грани. Показатели плотности дислокации подтверждают факт сдвига и двойникования с искажением кристаллической решетки. Все это свидетельствует о повышении износостойкости и выносливости на изгиб режущих граней.

При проведении производственных испытаний на предмет исследования процессов изнашивания и разрушения граней ножа использовался регламент работ сахарных заводов, когда заточка и замена разрушенных ножей осуществлялись после сменной наработки центробежной свеклорезки. Данные испытаний сведены в график, представленный на рисунке 7.

Из данного графика следует, что за счет эффекта упрочнения и повышения износостойкости режущих кромок граней экспериментального ножа величина износа уменьшается на 0,1 мм

и при этом из-за отсутствия выкрашивания кромки на отдельных гранях эта величина относительно постоянна. По этой причине для выравнивания граней необходимо снять 0,3 мм металла по длине режущей грани. В то же время неравномерность износа по длине традиционного ножа ведет к необходимости съема 0,5 мм, интенсивность износа и, соответственно, укорачивания длин режущих граней после наработки для различных смен непостоянна. Низкая износостойкость ведет к тому, что после 56 часов наработки ресурс ножей по параметру длины граней исчерпан полностью. При этом за тот же период наработки наблюдалось разрушение граней от воздействия напряжений на изгиб у 3 ножей.

Предельного состояния экспериментальные ножи достигают после наработки 80 часов, что говорит о повышении показателя их долговечности на 27–30 %, причем за этот период разрушению подвергся 1 нож.

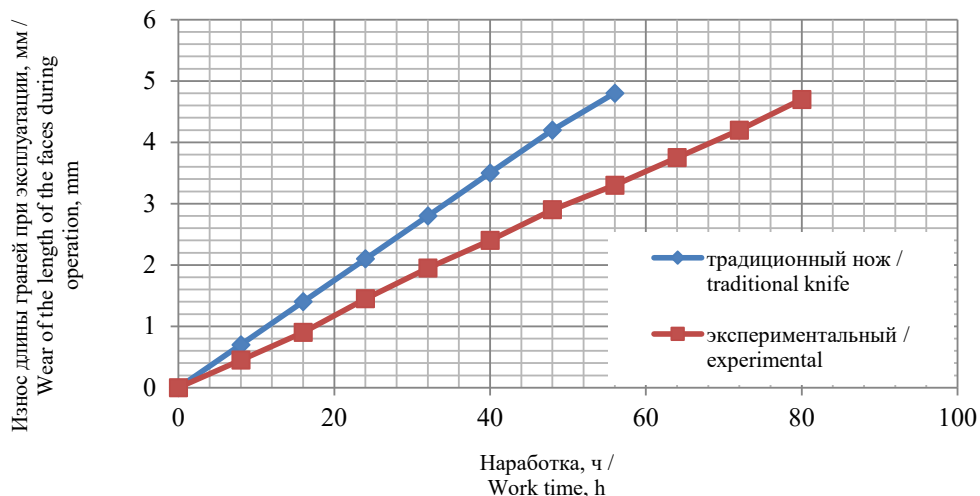
Качество измельчения стружки, являющееся основным показателем работы центробежной свеклорезки, должно обеспечивать наибольшую проницаемость и выход сахарозы в диффузионном аппарате. Продолжительность наработки режущих рамок с традиционными и экспериментальными ножами представлена на рисунках 8, 9.

Данные результатов исследования, сведенные в графики на рисунках 8 и 9, свидетельствуют о том, что усовершенствованная конструкция режущих граней ножа и принятая технология их формирования пластической деформацией ведут к повышению износостойкости режущих кромок и выносливости на изгиб граней. После ежесменной заточки наблюдается уменьшение припуска на заточку изношенной режущей кромки экспериментального ножа, после чего в следующую смену показатель длины стружки увеличивается.

Таблица 2  
Table 2

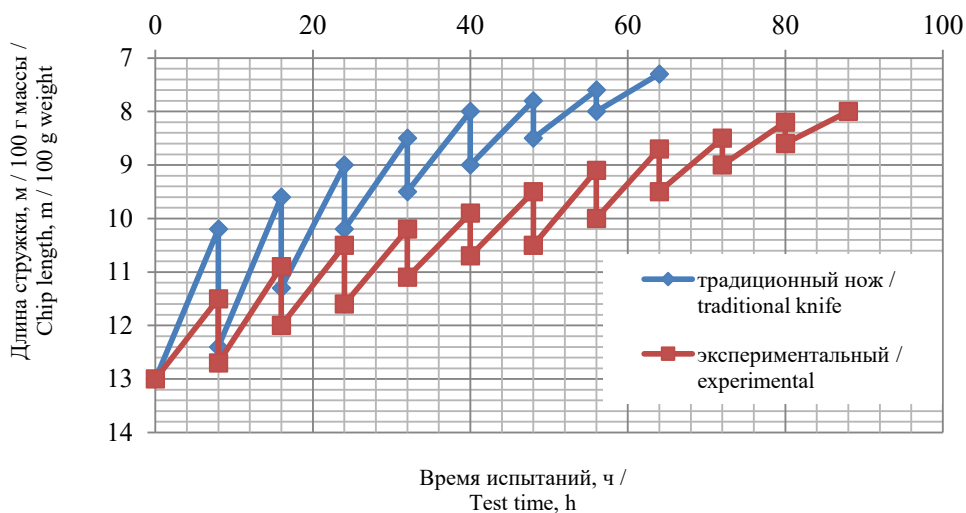
Физико-механические и структурные показатели режущих граней свеклорезных ножей  
Physico-mechanical and structural indicators of the cutting edges of beet cutters

№ п/п / No. i/o	Наименование исследуемого параметра / The name of the studied parameter	Исследуемые параметры / Indicators										Структурное состояние материала режущих граней / The structural state of the material of the cutting faces
		Микротвер- дость, МПа / Microhardness, MPa	Выносливость на изгиб, циклы / Bending endurance, load cycles	Остаточные напряжения, МПа / Residual stresses, MPa	Плотность дислокаций, 10 <sup>11</sup> см <sup>-2</sup> / Dislocation density, 10 <sup>11</sup> cm <sup>-2</sup>							
1	Традиционная технология / Traditional technology	Глубина сечения, м·10 <sup>-3</sup> / Depth of section, m·10 <sup>-3</sup>		Время испытаний, ч / Test time, h	Глубина сечения, м·10 <sup>-3</sup> / Depth of section, m·10 <sup>-3</sup>		Глубина сечения, м·10 <sup>-3</sup> / Depth of section, m·10 <sup>-3</sup>			Грубодольчатый мартенсит / Coarse needle martensite		
		1,0	0,5		1,0	0,5	1,0	0,5	1,0			
		500,0	500,0		500,0	6,5	8,0	-127,0	-9,3		-10,0	1,4
2	Экспериментальная технология / Experimental technology	570,0	550,0	570,0	7,3	10,5	-57,2	-55,1	-67,2	9,6	8,7	Скрытокристалли- ческий мартенсит с карбидами хрома / Crystalline martensite with chromium carbides



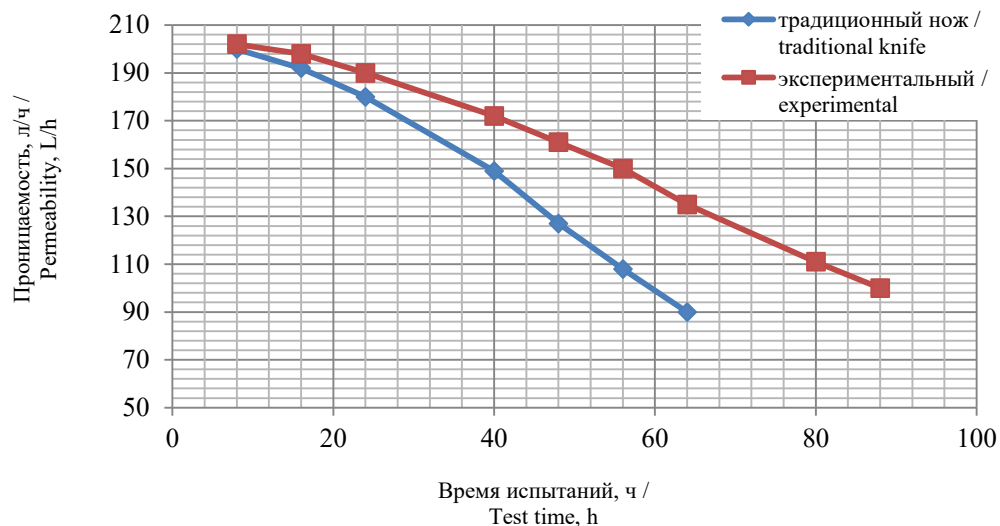
Р и с. 7. Графики влияния износного состояния длины граней на показатели безотказности в эксплуатационных условиях для традиционного и экспериментального ножей

F i g. 7. Graphs of the influence of the wear state of the length of the faces on the reliability indicators in operating conditions for traditional and experimental knives



Р и с. 8. Изменение длины свекловичной стружки от воздействия традиционного и экспериментального ножей

F i g. 8. Changing the length of beet chips from traditional and experimental knives



Р и с. 9. Изменение проницаемости свекловичной стружки от воздействия традиционного и экспериментального ножей

Fig. 9. The change in the permeability of beet chips from traditional and experimental knives

Идентичные показатели традиционного ножа значительно ниже. Установлено, что повышение износостойкости режущих кромок и выносливости на изгиб граней достигает 30–35 %. Данное обстоятельство обеспечивает повышение показателя проницаемости, полученного от измельчения свеклы экспериментальным ножом, и, соответственно, выход сахарозы в диффузионном аппарате.

### Обсуждение и заключение

В результате теоретических исследований установлены контруктивно-технологические направления повышения износостойкости режущих кромок и выносливости на изгиб граней ножей к центробежным свеклорезкам. При этом доказана гипотеза возможности повышения выхода сахарозы из свекловичной стружки за счет повышения

качества измельчения свеклы путем увеличения параметров работоспособности при устранении отказов.

Экспериментальные исследования позволили обосновать конструкции оснастки для штамповки заготовок ножей и накатки режущих граней. Проведены их производственные испытания, показавшие высокие технологические и ресурсосберегающие возможности предлагаемого метода упрочнения режущих граней свеклорезных ножей. Физико-механическими и структурными исследованиями установлено, что за счет повышения износостойкости и прочности на изгиб режущих граней повышается долговечность ножей на 27–30 %, что позволяет значительно повысить качественные показатели свекловичной стружки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Долматова, И. А. Физиологические эффекты пищевых веществ / И. А. Долматова, Т. Н. Зайцева, В. Ф. Рябова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2019. –



Т. 10, № 1. – С. 139–142. – URL: <https://magtu.ru/servisy-sajta/fajlovyj-arkhiv/send/393-aktualnye-problemy-sovremennoj-nauki-tehniki-i-obrazovaniya/9924-1-2019.html> (дата обращения: 28.01.2021).

2. **Кульнева, Н. Г.** Ресурсосберегающая технология переработки сахарной свеклы / Н. Г. Кульнева, Л. Н. Путилина, Н. А. Лазутина. – DOI 10.25802/SB.2019.28.41.006 // Сахарная свекла. – 2019. – № 10. – С. 32–36. – URL: [http://sugarbeet.ru/archive/article/\\_183/RESURSOSBEREGAYUSHAYA-TEKNOLOGIYA-PERERABOTKI-SAHARNOJ/](http://sugarbeet.ru/archive/article/_183/RESURSOSBEREGAYUSHAYA-TEKNOLOGIYA-PERERABOTKI-SAHARNOJ/) (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

3. Потери сахарозы в свеклосахарном производстве и пути их снижения / Н. Г. Кульнева, В. А. Голибин, А. М. Мантулин [и др.] // Сахар. – 2011. – № 2. – С. 42–46. – URL: [http://saharmag.com/fix/magazine/archive/archive\\_11.html](http://saharmag.com/fix/magazine/archive/archive_11.html) (дата обращения: 28.01.2021).

4. Пути повышения энергоэффективности сахарного производства / В. А. Голибин, В. А. Федорук, М. А. Лавренова, Е. А. Денисова // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2014. – № 1 (59). – С. 185–188. – URL: <https://www.vestnik-vsuet.ru/vguit/article/view/734> (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

5. **Сяпуков, Е. Е.** Ростовые процессы и динамика сахаронакопления в корнеплодах сахарной свеклы / Е. Е. Сяпуков, В. И. Костин, В. А. Исачев. – DOI 10.18286/1816-4501-2017-1-66-71 // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 1 (37). – С. 66–71. – URL: <https://vestnik.ulsau.ru/contentse/1-17-syapukov.pdf> (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

6. **Кульнева, Н. Г.** Контроль показателей сахарной свеклы различного качества при хранении / Н. Г. Кульнева, И. Г. Селезнева, И. Ю. Свешников, С. Ю. Казакевич // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2017. – № 4. – С. 32–34. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29204156> (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

7. **Кульнева, Н. Г.** К вопросу о формировании качества сахара-песка / Н. Г. Кульнева, А. А. Швецов, А. И. Шматова // Товаровед продовольственных товаров. – 2016. – № 6. – С. 48–51. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27208695> (дата обращения: 28.01.2021).

8. Пути обеспечения качества отечественного сырья для производства сахара / Н. Г. Кульнева, И. Г. Селезнева, И. Ю. Свешников, С. Ю. Казакевич // Экономика. Инновации. Управление качеством. – 2016. – № 4 (17). – С. 46–47. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28807421> (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

9. **Кульнева, Н. Г.** Альтернативный способ сенсорного анализа сахаров в сахарном производстве / Н. Г. Кульнева, Т. А. Кучменко // Сахар. – 2019. – № 4. – С. 60–65. – URL: [http://saharmag.com/fix/magazine/jotnal\\_148.html](http://saharmag.com/fix/magazine/jotnal_148.html) (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

10. **Сапронов, А. Р.** Производство и использование сахара / А. Р. Сапронов, Я. И. Альвад, Б. Г. Кривовоз // Сахар. – 2006. – № 8. – С. 44–45. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9293647> (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

11. Оптимальная переработка сахара-сырца / А. Р. Сапронов, Г. А. Вовк, Б. Г. Кривовоз, Я. И. Эльвад // Сахар. – 2006. – № 9. – С. 48–52. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9309988> (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

12. **Антипов, С. Т.** Опережающее инженерное образование и инженерия техники пищевых технологий / С. Т. Антипов, А. В. Никифоров, В. А. Панфилов. – DOI 10.29141/2500-1922-2019-4-2-7 // Индустрия питания. – 2019. – Т. 4, № 2. – С. 51–57. – URL: <http://foodindustry.usue.ru/images/11/7.pdf> (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

13. Свекловичная стружка треугольного сечения – получение и преимущества / А. Н. Люлька, В. Г. Мирончук, О. В. Адаменко, А. П. Адаменко // Сахар. – 2014. – № 1. – С. 40–43. – URL: [http://saharmag.com/fix/magazine/jotnal\\_70.html](http://saharmag.com/fix/magazine/jotnal_70.html) (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

14. **Panfilov, V. A.** Engineering of Complex Technological Systems in the Agroindustrial Complex / V. A. Panfilov, S. P. Andreev. – DOI 10.21603/2308-4057-2018-1-23-29 // Foods and Raw Materials. – 2018. – Vol. 6, Issue 1. – Pp. 23–29. – URL: <http://jfrm.ru/issues/702/709/> (дата обращения: 28.01.2021).

15. **Рудик, Ф. Я.** Анализ условий работы и износного состояния ножей центробежных свеклорезок / Ф. Я. Рудик, С. А. Богатырев. – DOI 10.28983/asj.v0i3.341 // Аграрный научный журнал. – 2018. – № 3. – С. 47–50. – URL: <https://agrojr.ru/index.php/asj/article/view/341> (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.

16. Рудик, Ф. Я. Дефектное состояние ножей к центробежным свеклорезным установкам и повышение их усталостной прочности / Ф. Я. Рудик, Л. Ю. Скрябина, А. П. Ковылин // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2014. – № 8. – С. 22–26 – URL: [http://www.nait.ru/journals/number.php?p\\_number\\_id=2064](http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2064) (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.
17. Рудик, Ф. Я. Обеспечение показателей надежности ножей для измельчения сахарной свеклы / Ф. Я. Рудик, Л. Ю. Скрябина, А. П. Ковылин // Научное обозрение. – 2012. – № 6. – С. 160–163. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18736866> (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.
18. Морозов, В. Б. Анализ технологической операции измельчения в свеклосахарном производстве / В. Б. Морозов // Известия ТулГАУ. Технические науки. – 2013. – Вып. 6, Ч. 1. – 7 с. – URL: <https://clck.ru/SzjZv> (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.
19. Патент № 2053302 Российская Федерация, МПК C13C1/08. Свеклорезный нож : № 94007840 : заявл. 01.03.1994 : опубл. 27.01.1996 / Даишев М. И [и др.] ; патентообладатели Даишев М. И., Даишева Л. М. – 7 с. – URL: [https://patents.s3.yandex.net/RU2053302C1\\_19960127.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2053302C1_19960127.pdf) (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.
20. Патент № 2156303 Российская Федерация, МПК C13C1/06. Дисковая свеклорезка : № 99120580/13 : заявл. 28.09.1999 : опубл. 20.09.2000 / Спичак В. В. [и др.] ; патентообладатель Российский научно-исследовательский институт сахарной промышленности. – 4 с. – URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2156303> (дата обращения: 28.01.2021).
21. Патент № 2087238 Российская Федерация, МПК B21H7/10. Способ изготовления режущих инструментов : № 95121387 : заявл. 18.12.1995 : опубл. 20.07.1997 / Андреев П. А. [и др.] ; патентообладатель Научно-производственный центр «Волгоагротехника». – 6 с. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2087238C1\\_19970820](https://yandex.ru/patents/doc/RU2087238C1_19970820) (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.
22. Патент № 2096120 Российская Федерация, МПК B21D 53/00. Способ изготовления свеклорезных ножей : № 96110426 : заявл. 27.05.1996 : опубл. 20.11.1997 / Богатырев С. А. [и др.] ; патентообладатель Научно-производственный центр «Волгоагротехника». – 5 с. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2096120C1\\_19971120](https://yandex.ru/patents/doc/RU2096120C1_19971120) (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.
23. Патент № 2136471 Российская Федерация, МПК B23P 6/00, B21J13/02. Штамп для восстановления крестовых ножей : № 98106326/02 : заявл. 06.04.1998 : опубл. 10.09.1999 / Богатырев С. А. [и др.]. – 6 с. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2136471C1\\_19990910](https://yandex.ru/patents/doc/RU2136471C1_19990910) (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.
24. Патент № 2533236 Российская Федерация, МПК B23P 6/00, B23P 15/28. Способ восстановления изношенного крестового ножа : № 2013138261/02 : заявл. 15.08.2013 : опубл. 20.11.2014 / Рудик Ф. Я. [и др.] ; патентообладатель Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова. – 4 с. – URL: [http://www.freepatent.ru/images/img\\_patents/2/2533/2533236/patent-2533236.pdf](http://www.freepatent.ru/images/img_patents/2/2533/2533236/patent-2533236.pdf) (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.
25. Патент № 2157734 Российская Федерация, МПК B02C 18/20. Нож куттера : № 99204382/13 : заявл. 05.03.1999 : опубл. 20.10.2000 / Рудик Ф. Я. [и др.]. – 5 с. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2157734C1\\_20001020](https://yandex.ru/patents/doc/RU2157734C1_20001020) (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.
26. Патент № 2174056 Российская Федерация, МПК B21H 7/16. Устройство для прокатки изделий с переменным профилем : № 991204201/02 : заявл. 29.09.1999 : опубл. 27.09.2001 / Рудик Ф. Я. [и др.]. – 6 с. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2174056C2\\_20010927](https://yandex.ru/patents/doc/RU2174056C2_20010927) (дата обращения: 28.01.2021). – Рез. англ.
27. Патент № 150113 Российская Федерация, МПК B21H 7/10. Устройство для изготовления режущих инструментов : № 2014116686/02 : заявл. 24.04.2014 : опубл. 27.01.2015 / Рудик Ф. Я. [и др.] ; патентообладатель Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова. – 8 с. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU150113U1\\_20150127](https://yandex.ru/patents/doc/RU150113U1_20150127) (дата обращения: 28.01.2021).
28. Патент № 130542 Российская Федерация, МПК B26D 1/00. Свеклорезный нож : № 2013105418/02 : заявл. 08.02.2013 : опубл. 27.07.2013 / Рудик Ф. Я. [и др.] ; патентообладатель Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова. – 6 с. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU130542U1\\_20130727](https://yandex.ru/patents/doc/RU130542U1_20130727) (дата обращения: 28.01.2021).

Поступила 12.08.2020; одобрена после рецензирования 21.09.2020; принята к публикации 05.10.2020





Об авторах:

**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-papsgau@rambler.ru

**Богатырев Сергей Аркадьевич**, профессор кафедры проектного менеджмента и внешнеэкономической деятельности в АПК ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (410012, Российская Федерация, г. Саратов, Театральная пл., д. 1), доктор технических наук, Researcher ID: B-3273-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7538-2937>, tettet@inbox.ru

**Ковылин Анатолий Петрович**, инженер ООО «Анастасьинское» (412468, Российская Федерация, с. Анастасьино, ул. Центральная, д. 6), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8657-5240>, kaf-papp@sgau.ru

**Тулиева Мадина Суенкалиевна**, исполняющий обязанности доцента кафедры технологии переработки пищевой продукции НАО «Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана» (090009, Республика Казахстан, г. Уральск, ул. Жангир Хана, д. 51), доктор филологии, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6552-6527>, madina81@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Ф. Я. Рудик – научное руководство, постановка задач исследований, систематизация материалов, полученных в результате проведения литературного обзора и информационного поиска, работа с литературой.

С. А. Богатырев – статистическая обработка результатов замеров износов и выявление причин возникновения дефектов ножей центробежных свеклорезок, поиск патентов, оформление статьи.

А. П. Ковылин – определение микротвердости и остаточных напряжений.

М. С. Тулиева – проведение сравнительных эксплуатационных испытаний традиционного и экспериментального ножей.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## REFERENCES

1. Dolmatova I.A., Zaytseva T.N., Ryabova V.F. [Physiological Effects of Food Substances]. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* = Current Problems of Modern Science, Technology and Education. 2019; 10(1):139-142. Available at: <https://magtu.ru/servisy-sajta/fajlovyj-arkhiv/send/393-aktualnye-problemy-sovremennoj-nauki-tekhniki-i-obrazovaniya/9924-1-2019.html> (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
2. Kulneva N.G., Putilina L.N., Lazutina N.A. Resource-Saving Technology of Sugar Beet Processing. *Sakharnaya svekla* = Sugar Beet. 2019; (10):32-36. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25802/SB.2019.28.41.006>
3. Kulneva N.G., Golibin V.A., Mantulin A.M., et al. [Sucrose Losses in Sugar Beet Production and Ways to Reduce Them]. *Sakhar* = Sugar. 2011; (2):42-46. Available at: [http://saharmag.com/fix/magazine/archive/archive\\_11.html](http://saharmag.com/fix/magazine/archive/archive_11.html) (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
4. Golybin V.A., Fedoruk V.A., Lavrenova M.A., et al. Ways to Improve Energy Efficiency of Sugar Production. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy* = Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2014; (1):185-188. Available at: <https://www.vestnik-vsuet.ru/vguit/article/view/734> (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
5. Syapukov E.E., Kostin V.I., Isaichev V.A. Growth Processes and Dynamics of Sugar Accumulation in Sugar Beet Roots. *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Vestnik of the Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2017; (1):66-71. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2017-1-66-71>

6. Kulneva N.G., Selezneva I.G., Sveshnikov I.Yu. Control of Sugar Beet Indicators of Different Quality during Storage. *Khranenie i pererabotka selkhozsiyrya* = Storage and Processing of Farm Products. 2017; (4):32-34. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29204156> (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
7. Kulneva N.G., Shvetsov A.A., Shmatova A.I. [On the Formation of the Quality of Granulated Sugar]. *Tovaroved prodovolstvennykh tovarov* = Food Merchandiser. 2016; (6):48-51. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27208695> (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
8. Kulneva N.G., Selezneva I.G., Sveshnikov I.Yu., et al. Ways to Ensure the Quality of Domestic Raw Materials for the Production of Sugar. *Ekonomika. Innovatsii. Upravlenie kachestvom* = Economics. Innovation. Quality Management. 2016; (4):46-47. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28807421> (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
9. Kulneva N.G., Kuchmenko T.A. [An Alternative Method for Sensory Analysis of Sugars in Sugar Production]. *Sakhar* = Sugar. 2019; (4):60-65. Available at: [http://saharmag.com/fix/magazine/jotnal\\_148.html](http://saharmag.com/fix/magazine/jotnal_148.html) (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
10. Saponov A.R., Alavad Y.I., Krivovoz B.G. Production and Using of Sugar. *Sakhar* = Sugar. 2006; (8):44-45. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9293647> (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
11. Saponov A.R., Vovk G.A., Krivovoz B.G., et al. Optimum Treatment of Raw Sugar. *Sakhar* = Sugar. 2006; (9):48-52. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9309988> (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
12. Antipov S.T., Nikiforov A.V., Panfilov V.A. Advanced Engineering Education and Food Technology Engineering. *Industriya pitaniya* = Food Industry. 2019; 4(2):51-57. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2019-4-2-7>
13. Lyulka A.N., Mironchuk V.G., Adamenko O.V., et al. [Beet Chips of Triangular Cross-Section: Obtaining and Advantages]. *Sakhar* = Sugar. 2014; (1):40-43. Available at: [http://saharmag.com/fix/magazine/jotnal\\_70.html](http://saharmag.com/fix/magazine/jotnal_70.html) (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
14. Panfilov V.A., Andreev S.P. Engineering of Complex Technological Systems in the Agroindustrial Complex. *Foods and Raw Materials*. 2018; 6(1):23-29. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-1-23-29>
15. Rudik F.Ya., Bogatyrev S.A. Analysis of Working and Worn Conditions of Centrifuged Sticker Knives. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = Agrarian Scientific Journal. 2018; (3):47-50 (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.v0i3.341>
16. Rudik F.Ya., Skryabina L.Yu., Kovylin A.P. Defect State of Knives for Centrifugal Beet Cutters and Increase in Their Fatigue Resistance. *Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya* = Repair, Reconditioning, Modernization. 2014; (8):22-26. Available at: [http://www.nait.ru/journals/number.php?p\\_number\\_id=2064](http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2064) (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
17. Rudik Ph.Ya., Skryabina L.Yu., Kovylin A.P. Reliability Indexes of Knives for Crushing Sugar Beet. *Nauchnoe obozrenie* = Scientific Review. 2012; (6):160-163. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18736866> (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
18. Morozov V.B. The Analysis of Technological Operation of Crushing in Sugar Production from a Beet. *Izvestiya TulGAU. Tekhnicheskie nauki* = Proceedings of the Tula State Agrarian Academy. Technical Sciences. 2013; 6(1). 7 p. Available at: <https://clck.ru/SzjZv> (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
19. Beet-Root Cutter: Patent 2053302 Russian Federation. No. 94007840; appl. 01.03.1994; publ. 27.01.1996. 7 p. Available at: [https://patents.s3.yandex.net/RU2053302C1\\_19960127.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2053302C1_19960127.pdf) (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
20. [Disc Beet Cutter]: Patent 2156303 Russian Federation. No. 99120580/13; appl. 28.09.1999; publ. 20.09.2000. 4 p. Available at: <http://www.freepatent.ru/patents/2156303> (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
21. Method of Making Cutting Tools: Patent 2087238 Russian Federation. No. 95121387; appl. 18.12.1995; publ. 20.07.1997. 6 p. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2087238C1\\_19970820](https://yandex.ru/patents/doc/RU2087238C1_19970820) (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
22. Method of Making Beet Cutting Knives: Patent 2096120 Russian Federation. No. 96110426; appl. 27.05.1996; publ. 20.11.1997. 5 p. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2096120C1\\_19971120](https://yandex.ru/patents/doc/RU2096120C1_19971120) (accessed 28.01.2021). (In Russ.)



23. Stamp for Restoration of Cross-Shaped Knives: Patent 2136471 Russian Federation. No. 98106326/02; appl. 06.04.1998; publ. 10.09.1999. 6 p. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2136471C1\\_19990910](https://yandex.ru/patents/doc/RU2136471C1_19990910) (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
24. Method to Restore Worn-Out Four-Wing Knife: Patent 2533236 Russian Federation. No. 2013138261/02; appl. 15.08.2013; publ. 20.11.2014. 4 p. Available at: [http://www.freepatent.ru/images/img\\_patents/2/2533/2533236/patent-2533236.pdf](http://www.freepatent.ru/images/img_patents/2/2533/2533236/patent-2533236.pdf) (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
25. Chopper Knife: Patent 2157734 Russian Federation. No. 99204382/13; appl. 05.03.1999; publ. 20.10.2000. 5 p. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2157734C1\\_20001020](https://yandex.ru/patents/doc/RU2157734C1_20001020) (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
26. Apparatus for Rolling Variable-Profile Products: Patent 2174056 Russian Federation. No. 991204201/02; appl. 29.09.1999; publ. 27.09.2001. 6 p. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2174056C2\\_20010927](https://yandex.ru/patents/doc/RU2174056C2_20010927) (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
27. [Device for the Production of Cutting Tools]: Patent 150113 Russian Federation. No. 2014116686/02; appl. 24.04.2014; publ. 27.01.2015. 8 p. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/RU150113U1\\_20150127](https://yandex.ru/patents/doc/RU150113U1_20150127) (accessed 28.01.2021). (In Russ.)
28. [Beet Cutter Knife]: Patent 130542 Russian Federation. No. 2013105418/02; appl. 08.02.2013; publ. 27.07.2013. 6 p. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/RU130542U1\\_20130727](https://yandex.ru/patents/doc/RU130542U1_20130727) (accessed 28.01.2021). (In Russ.)

*Submitted 12.08.2020; approved after reviewing 21.09.2020; accepted for publication 05.10.2020*

*About the authors:*

**Feliks Ya. Rudik**, Professor of the 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

**Sergey A. Bogatyrev**, Professor of the Chair of Project Management and Foreign Economic Activity in the Agroindustrial Complex, Saratov State Agrarian University (1 Theatre Sq., Saratov 410012, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: B-3273-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7538-2937>, tettet@inbox.ru

**Anatoliy P. Kovylin**, Engineer of the Anastasinskoe LLC (6 Tsentralnaya St., Anastasino 412468, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8657-5240>, kaf-papp@sgau.ru

**Madina S. Tulieva**, Associate Professor of the Chair of Food Processing Technology, Zhangir Khan University (51 Zhangir Khan St., Uralsk 090009, Republic of Kazakhstan), Ph.D., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6552-6527>, madina81@mail.ru

*Contribution of the authors:*

F. Ya. Rudik – scientific guidance, setting research objectives, systematization of materials obtained as a result of conducting a literature review and information search, work with the literature.

S. A. Bogatyrev – statistical processing of wear measurement results and identifying the causes of defects in beet cutter knives, patent search, writing the draft.

A. P. Kovylin – determination of microhardness and residual stresses.

M. S. Tulieva – conducting comparative operational tests of traditional and experimental knives.

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

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

УДК 631.356:620.178.16

DOI: 10.15507/2658-4123.031.202101.056-079

Оригинальная статья



## Упрочнение тонкостенных ножей азотистой плазмой

Т. С. Скобло, О. Ю. Клочко, А. К. Автухов,  
В. Н. Романченко, А. В. Плугатарёв, И. Н. Рыбалко\*  
*Харьковский национальный технический университет  
сельского хозяйства имени Петра Василенко  
(г. Харьков, Украина)  
\*irybalko.ua@gmail.com*

**Введение.** Выполненные разработки направлены на создание новой технологии для повышения износостойкости тонкостенного инструмента сложной конфигурации для резки свеклы на сахарных предприятиях из стали 65Г. Важнейшим требованием повышения работоспособности и долговечности такого инструмента является сохранение его профиля и режущей кромки в процессе эксплуатации. Поэтому весьма непростым является выбор технологических параметров и способа упрочнения такого сложного по конфигурации изделия.

**Материалы и методы.** Для решения этой проблемы применены новое разработанное оборудование и технологический процесс упрочнения с использованием низкотемпературной азотистой плазмы. Определены оптимальные параметры обработки, благодаря которым формируется квазиаморфная структура на поверхности трения, уменьшающая дефектность режущей кромки после ее механической обработки, а также обеспечивающая процесс самозатачивания за счет упрочнения инструмента с одной стороны.

**Результаты исследования.** Сопоставительные исследования поверхности трения изделий после эксплуатационных испытаний показали, что их стойкость существенно повышается не только при упрочнении новых, но и бывших в эксплуатации изделий. Это определяется характером формируемой квазиаморфной структуры и особым рельефом при трении на рабочей поверхности.

**Обсуждение и заключение.** Для описания нового процесса упрочнения тонкостенных изделий детально анализировалось структурообразование на поверхности трения с использованием металлографических изображений и оценкой изменчивости соотношения ее фаз оптико-математическим анализом различных зон (сжатия и разряжения), формируемых в виде полос трения. Для этого использовалось и моделирование с оценкой плотности распределения условных цветов анализируемых фрагментов.

**Ключевые слова:** свеклорезальные ножи, ионно-плазменное упрочнение, оптико-математический анализ, структурообразование, кинетика износа

© Скобло Т. С., Клочко О. Ю., Автухов А. К., Романченко В. Н., Плугатарёв А. В., Рыбалко И. Н., 2021



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

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

**Для цитирования:** Упрочнение тонкостенных ножей азотистой плазмой / Т. С. Скобло, О. Ю. Клочко, А. К. Автухов [и др.]. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202101.056-079](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.056-079) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 1. – С. 56–79.

*Original article*

## Strengthening Thin-Walled Knives with Nitrogen Plasma

**T. S. Skoblo, O. Yu. Klochko, A. K. Avtukhov,  
V. N. Romanchenko, A. V. Plugatarev, I. N. Rybalko\***  
*Kharkiv Petro Vasilenko National Technical University  
of Agriculture (Kharkiv, Ukraine)*  
*\*rybalko.ua@gmail.com*

**Introduction.** The completed developments are aimed at creating a new technology for increasing the wear resistance of a thin-walled instrument of complex configuration made of steel 65G for cutting beets at sugar enterprises. The most important requirement to improve the operability and durability of such a tool is the preservation of its profile and cutting edge during operation.

**Materials and Methods.** A new developed equipment and technological process of strengthening using low-temperature nitrogen plasma were used to solve this problem. There have been determined optimal processing parameters that ensure the formation of a quasi-morphic structure on the friction surface that reduces the defectiveness of the cutting edge after its machining and also provides a process of self-sharpening due to tool strengthening on one side.

**Results.** The comparative studies of the friction surface of products after operational tests have shown that their resistance increase significantly when strengthening both new and used products. This is determined by the nature of the quasi-morphic structure formed and the specific relief in friction on the working surface.

**Discussion and Conclusion.** To describe the new process of strengthening thin-walled products, the structure formation on the friction surface was analyzed in detail with the use of metallographic images and its phase relationship variability was estimated by the optic-mathematical analysis of various zones (compression and vacuum) formed as friction bands. This was done through modeling with the estimation of the distribution density of the conditional colors of the analyzed fragments.

**Keywords:** beet-cutting knives, ion-plasma strengthening, optical-mathematical analysis, structure formation, kinetics of wear

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

**For citation:** Skoblo T.S., Klochko O.Yu., Avtukhov A.K., et al. Strengthening Thin-Walled Knives with Nitrogen Plasma. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(1):56-79. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.056-079>

### Введение

Повышение износостойкости деталей из металлов и сплавов достигается использованием различных методов упрочняющих обработок, обеспечивающих повышение трибологических свойств их рабочих поверхностей. Поскольку основные механические

характеристики, такие как прочность, износостойкость, коррозионная стойкость определяются составом и структурой поверхностных слоев, то в последние десятилетия, наряду с традиционными методами упрочняющего объемного воздействия, все большее распространение получает поверхностная обработка

концентрированными потоками энергии [1–4]. Особенностью такой обработки деталей являются одновременно осуществляющиеся радиационное, тепловое и ударно-механическое воздействия, что обеспечивает структурно-фазовые превращения и достижение потребительских свойств (твердость, прочность, сопротивление коррозии, износостойкость и др.), а также позволяет создавать в приповерхностных слоях такие структуры, которые невозможно получить другими методами [5; 6].

### Обзор литературы

В последние годы использование плазменного упрочнения нашло применение в различных отраслях [7–9]. Плазменная дуга представляет собой концентрированный источник тепла и широко используется при сварке, резке и формовке, а также при поверхностной обработке биомедицинских материалов [10–13]. Так, например, в медицине метод плазменной обработки применяется для упрочнения операционного скальпеля, благодаря чему повышаются его режущие свойства, уменьшаются коррозия и повреждаемость тканей, обеспечивается более быстрая заживляемость [14; 15].

Возрастает потребность в более точных и прочных режущих кромках для высокопроизводительных столовых приборов, бритвенных лезвий и тонкостенных изделий. Долговечность режущей кромки может быть улучшена путем плазменного азотирования, поскольку износ режущей кромки уменьшается с увеличением времени обработки и температуры в такой среде [16; 17].

В ряде работ приведены результаты экспериментальных исследований свойств и микроструктуры образцов из стали 65Г, используемой для изготовления ножей куттеров, которые упрочнены импульсно-плазменной обработкой [18; 19]. Описана целесообразность

использования импульсно-плазменного упрочнения для повышения долговечности ножей куттеров.

На сегодняшний день использование потока плазмы позволяет наносить как однослойные покрытия, так и многослойные [20–22]. Такие технологии многослойного наплавления обеспечивают повышение устойчивости, однако, как и в предыдущих случаях, ключевая роль в применении тех или других материалов, композитов и методов упрочнения отводится конфигурации и условиям эксплуатации детали и ее материалов.

Плазменное азотирование – это процесс термохимической обработки поверхности для создания твердого износостойкого слоя на стальных поверхностях [23–25]. Традиционному плазменному азотированию на постоянном токе уже более 60 лет [26]. Сегодня он широко используется во многих областях промышленности, например в автомобильной, производстве станков и т. д. Этот процесс популярен, потому что он требует меньше газа, по сравнению с газовым азотированием, и является более экологически чистым, по сравнению с азотированием в соляной ванне.

В работе рассмотрена проблема повышения износостойкости тонкостенного сложного профиля свеклорезальных ножей при эксплуатации, в частности облучением импульсными потоками азотистой плазмы, а также вопрос формирования структуры рабочей поверхности в процессе трения. Оценка структурообразования при плазменном упрочнении поверхности трения проведена металлографическим методом и оптико-математической обработкой фотографий свеклорезальных ножей. Наличие зон с коррозионной повреждаемостью оценивалось по изменчивости доли кислорода методом микрорентгеноспектрального анализа



при электронномикроскопических исследованиях (сканирующим микроскопом JEOL JS M-6390LV) повреждений на поверхности трения.

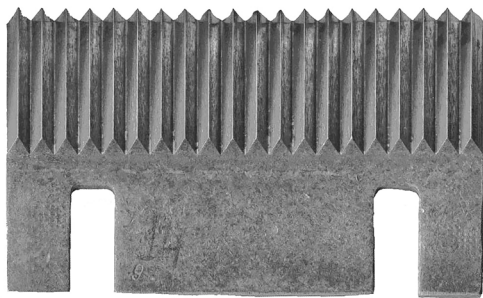
### Материалы и методы

В исследованиях использован разработанный метод импульсной плазменной обработки, который заключается в том, что упрочнение проводится только с одной стороны инструмента для приобретения им свойств и сохранения профиля режущей кромки, а также обеспечения самозатачивания при эксплуатации [27]. Ножи обрабатывались короткими плазменными импульсами для достижения быстрого расплавления и последующего сверхбыстрого охлаждения. При обработке толщина упрочненного поверхностного слоя достигала 100 мкм. Максимальный эффект был получен, когда ножи обрабатывались 3–10 импульсами продолжительностью не более 10 мкс каждый.

Упрочнение рабочей поверхности ножей проводилось на импульсном плазменном ускорителе ИФП ННЦ «Харьковский физико-технический институт» путем модифицирования азотом при облучении мощными импульсными потоками плазмы. Для ввода деталей в рабочую зону без разгерметизации вакуумной камеры использовались два шлюза. При этом для откачки их из камер применялись форвакуумный и диффузионный насосы. Рабочий вакуум соответствовал  $1 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. Используемые параметры обработки: рабочий газ – азот; разрядное напряжение и ток  $U = 10\text{--}30$  кВ,  $I = 500$  кА. Характеристика плазменных потоков: средняя энергия ионов – до 2 кэВ; плотность плазмы от  $2 \cdot 10^{14}$  до  $6 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>; средняя удельная мощность 10 МВт/см<sup>2</sup>; плотность энергии в плазме 25–40 Дж/см<sup>2</sup>; давление плазменного потока 30 атм. Метод основан на сверхбыстром охлаждении расплавленного слоя ( $\sim 10^{-6}$  с), при котором

изначально получалась квазиаморфная структура, а затем при эксплуатации она соответствовала кристаллической. Оптимальные параметры обработки были выбраны с учетом конфигурации и опыта упрочнения изделий таким способом [27].

Исследования проводились на ножах (рис. 1) центробежной двенадцатирамной свеклорезки, изготовленных из стали марки 65Г и серийно используемых в производстве, а также на сахарных заводах Украины. Состояние ножей оценивалось по результатам производственных испытаний как в процессе переналадки оборудования, так и после завершения периода их использования. Дефекты таких ножей связаны с попаданием в продукцию (свекла) твердых частиц из почвы.



Р и с. 1. Внешний вид свеклорезального ножа

F i g. 1. Original appearance of a beet-cutter knife

Для получения наиболее достоверного результата сопоставительный анализ поверхности трения ножей до и после упрочнения плазменной обработкой проводился на одной партии производства (одинаковый химический состав). Для идентификации особенностей формирования структуры на поверхности трения использован разработанный оптико-математический метод обработки металлографических изображений в соответствии с оригинальными программами на основе анализа [28–30].

## Результаты исследования

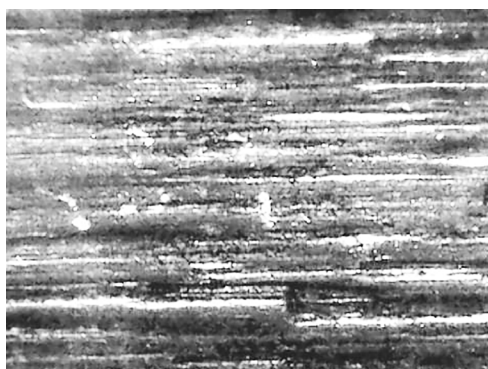
Представлена поверхность трения металла ножей после эксплуатации (рис. 2). На поверхности трения в процессе использования образуются полосы скольжения.

Сопоставительная оценка микротвердости поверхности трения сравнимых вариантов показала, что в процессе эксплуатации она возрастает до 3 раз после упрочняющей обработки, при которой формируются зоны сжатия. Они располагаются между полосами трения при переработке продукции, представляющими собой области разряжения. Такие зоны вносят существенный вклад в повышение износостойкости упрочненных ножей при дополнительном упрочнении в процессе их эксплуатации в 4-5 раз, а новых до 10 раз. Оценка износостойкости производилась по результатам промышленных испытаний. При этом сохраняется рельеф режущей кромки и обеспечивается эффект самозатачивания, повышается сопротивляемость коррозионной повреждаемости. Коррозия проявляется при наличии дефектов в ножах без дополнительной упрочняющей обработки. Наличие коррозионной повреждаемости при эксплуатации оценивалось по

содержанию доли кислорода в таких зонах. На рисунке 3 показаны зоны определения этого компонента в сопоставительном аспекте. Установлено, что на поверхности трения содержание кислорода при упрочнении во всех зонах составляет 3,52–3,84 % (рис. 3а, спектры 1 и 2), а без него (в поврежденных) достигает 19,73 %. (рис. 3б, спектр 4). В ножах без упрочнения также выявлена пленка окислов, на поверхности содержащая 2,4–8,8 % кислорода (рис. 3б, спектры 1 и 2).

Методом оптико-математического структурного анализа оценили изображения, различающиеся по их статистическим характеристикам (элементам изображения: пикселям и дивергенции, отражающей плотность в результате диффузионных процессов) в анализируемых фрагментах, которые описывали в цвете.

В работе для локального описания также рассмотрено распределение сочетаний условных цветов для 24 пикселей (точек) вокруг средней с координатами  $c_{ij}$  (или  $c_i$ ) на плоскости изображения (рис. 4а). Такой размер фрагмента (число пикселей) анализируемого изображения является оптимальным (снижает влияние цифрового шума и локальную



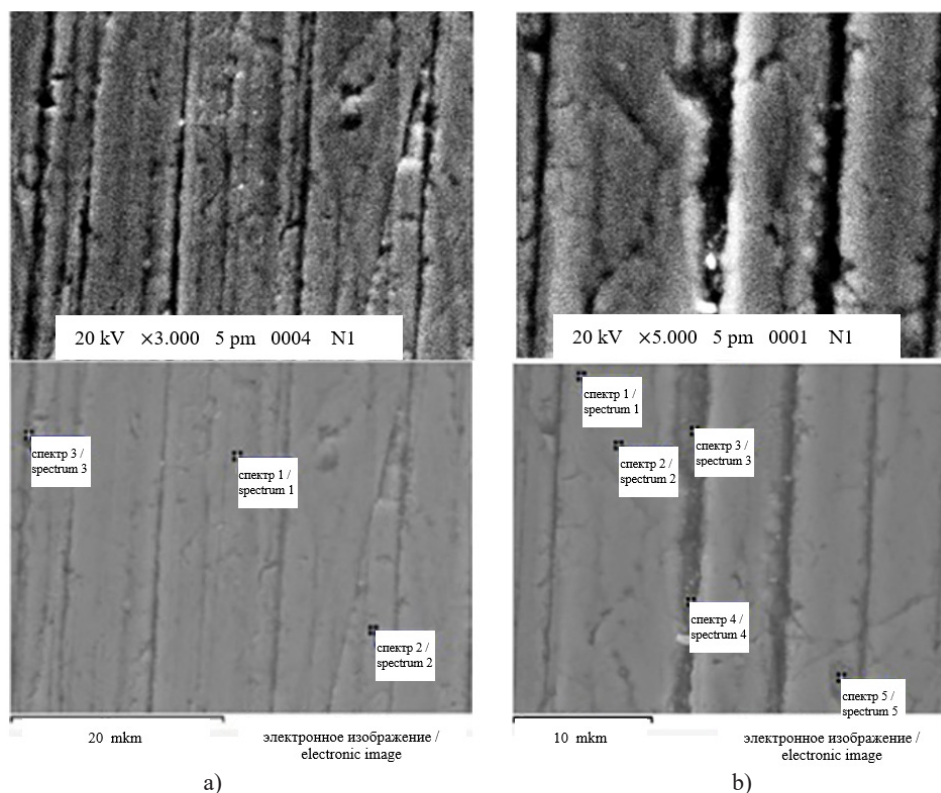
a)



b)

Р и с. 2. Характер поверхности трения свеклорезальных ножей: а) без упрочнения; б) после упрочнения плазмой,  $\times 60$

F i g. 2. Character of a friction surface of the beet-cutter knives: а) without strengthening; б) after strengthening by plasma,  $\times 60$



Р и с. 3. Поверхность трения ножей и зоны определения кислорода:  
а) с упрочнением; б) без упрочнения

F i g. 3. The friction surface of the knives and the oxygen determination zone:  
a) with strengthening; b) without strengthening

неоднородность) для наиболее достоверных результатов оценки локальной неоднородности стали 65Г. Для сокращения дальнейших записей указанным текущим элементам присвоены обозначения, как показано на рисунке 4б. Затем для общей оценки металлографического изображения использовалось сканирование такого фрагмента по всей поверхности изображения и удалось получить общую картину поверхности трения.

Каждой координате пикселя цифрового изображения соответствовало значение условного цвета, характеризующего процессы, протекающие

на поверхности исследуемых деталей при эксплуатации в условиях трения. Расчет значений условного цвета осуществлялся путем решения системы дифференциальных уравнений Навье – Стокса, представленных в переменных функции тока и вихря в конечно-разностной форме<sup>1</sup> [31]. При такой оценке условный цвет в каждой точке в результате диффузии химических элементов вычислялся через абсолютное значение оператора Лапласа (аналог абсолютного значения вихря), плотность фрагмента изображения (зоны уплотнения и разряжения) – через оператор дивергенции

<sup>1</sup> Обоснование применения понятий уравнений гидродинамики Навье – Стокса для анализа металлографических изображений / Т. С. Скобло [и др.] // Материалы VII Междунар. науч.-практич. конф. «Европейская наука XXI века», 2011. Вып. 21. С. 94.

(меру несжимаемости). Среднюю эффективную скорость изменчивости цвета в точке с координатами  $i, j$  вычисляли при помощи обобщенного градиента. По результатам получены гистограммы интегрального распределения соответствующего условного цвета для анализируемых фрагментов изображений. При помощи алгебраических гистограмм проводили качественную сопоставительную оценку структурообразования рабочих поверхностей трения ножей, упрочненных и не упрочненных азотистой плазмой, формируемых при эксплуатации в условиях производства при переработке сахарной свеклы. При анализе были введены дополнительные показатели (1)–(15) соотношения между условными цветами (соединения фаз), которые позволили выразить показатели изменчивости структурообразования в процессе эксплуатации. Их использовали для анализа по полученным изображениям, а также для построения фильтров и определения нормативных характеристик при сравнении анализируемых вариантов (исходных и упрочненных ножей).

$$r_1 = \frac{|c_2 + c_4 + c_6 + c_8 - 4c_1|}{|c_2 - c_1| + |c_4 - c_1| + |c_6 - c_1| + |c_8 - c_1|}, \quad (1)$$

где  $0 \leq r_1 \leq 1$ .

$$r_2 = c_1, \quad (2)$$

где  $r_2$  – цвет средней точки.

$$r_3 = \frac{|c_3 + c_5 + c_7 + c_9 - 4c_1|}{|c_3 - c_1| + |c_5 - c_1| + |c_7 - c_1| + |c_9 - c_1|}, \quad (3)$$

где  $0 \leq r_3 \leq 1$ .

Величины (1) и (3) являются показателями нейтральности абсолютного значения лапласиана, поскольку алгебраическая сумма лапласианов (в среднем) на достаточно большом числе точек всегда будет равна нулю.

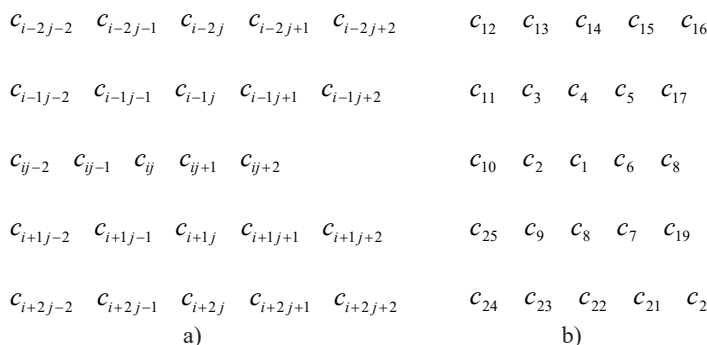
$$\sigma = \sqrt{\frac{(c_1 - \bar{c})^2 + (c_2 - \bar{c})^2 + (c_4 - \bar{c})^2 + (c_6 - \bar{c})^2 + (c_8 - \bar{c})^2}{4}}, \quad (4)$$

где  $\bar{c} = \frac{c_1 + c_2 + c_4 + c_6 + c_8}{5}$ ;  $r_4 = \sigma$  – среднеквадратическое отклонение.

$$r_5 = \frac{(c_3c_4 + c_2c_1 + c_9c_8 + c_4c_5 + c_1c_6 + c_8c_7)^2}{(c_3^2 + c_2^2 + c_9^2 + c_4^2 + c_1^2 + c_8^2)(c_4^2 + c_1^2 + c_8^2 + c_3^2 + c_6^2 + c_7^2)}, \quad (5)$$

$$r_6 = \frac{(c_3c_2 + c_4c_1 + c_9c_6 + c_2c_9 + c_1c_8 + c_6c_7)^2}{(c_3^2 + c_4^2 + c_9^2 + c_2^2 + c_1^2 + c_6^2)(c_2^2 + c_1^2 + c_6^2 + c_9^2 + c_8^2 + c_7^2)}, \quad (6)$$

где (5) и (6) – показатели однородности, описывающие корреляцию между дивергенцией и условным цветом. При



Р и с. 4. Схема расположения пикселей вокруг среднего на плоскости изображения:  
а) с номером строки  $i$  и номером столбца  $j$ ; б) упрощенная запись номеров

F i g. 4. The scheme of the arrangement of pixels around the average in the image plane:  
а) with a number of a line  $i$  and number of a column  $j$ ; б) the simplified record of numbers

одинаковых значениях цветов, входящих в формулы точек, они равны 1. В противном случае – меньше единицы.

$$r_7 = \frac{|c_2 - c_1| + |c_4 - c_1| + |c_6 - c_1| + |c_8 - c_1|}{4}, \quad (7)$$

где (7) – обобщенный (усредненный) градиент по абсолютной величине, являющийся средней эффективной скоростью изменения цвета, что соответствует интенсивности деформаций, возникающих в процессе трения.

$$r_8 = |c_2 + c_4 + c_6 + c_8 - 4c_1|, \quad (8)$$

где (8) – абсолютная величина лапласиана, описывающего диффузию химических элементов<sup>2</sup> [31].

Далее определяли максимальное значение  $r_7$  и находили условный цвет пикселя с координатами  $i, j$  по формуле:

$$c_{ij} = \frac{r_7}{r_{\max}} 255. \quad (9)$$

$$r_9 = |c_{10} - 3c_2 + 3c_1 - c_6 + c_{14} - 3c_4 + 3c_1 - c_8|. \quad (10)$$

$$r_{10} = |c_{10} - 4c_2 + 6c_1 - 4c_6 + c_{18} + c_{14} - 4c_4 + 6c_1 - 4c_8 + c_{22}|. \quad (11)$$

$$r_{11} = r_9 / (|c_{10} - c_2| + 2|c_2 - c_1| + |c_1 - c_6| + |c_{14} - c_4| + 2|c_4 - c_1| + |c_1 - c_8|). \quad (12)$$

$$r_{12} = r_{10} / (|c_{10} - c_2| + 3|c_2 - c_1| + 3|c_1 - c_6| + |c_6 - c_{18}| + |c_{14} - c_4| + 3|c_4 - c_1| + 3|c_1 - c_8| + |c_8 - c_{22}|). \quad (13)$$

$$r_{13} = |c_2 + c_4 - 2c_1|. \quad (14)$$

$$r_{14} = \frac{r_{13}}{|c_2 - c_1| + |c_4 - c_1|}. \quad (15)$$

Введенные двумерные функции (10), (11), (14) являются абсолютными

величинами дивергенции, которые характеризуют зоны уплотнения и разрежения в структуре металла; (12), (13), (15) – показатели нейтральности выражений (10), (11), (14).

В ходе исследований проанализированы цифровые изображения фрагментов формируемых структур рабочих поверхностей трения на анализируемых вариантах ножей (рис. 2). Выполнена компьютерная обработка полученных структур в формате bmp-изображений. Цифровые оценки этих фотографий представлены в формате полутоновых изображений .pgm, которые включают 256 оттенков серого цвета (в дальнейшем именуемых «цвет»: от 0 до 255) по специально разработанной программе.

На основе полученных результатов выполнен сопоставительный анализ структурообразования на поверхности трения при эксплуатации ножей без и после упрочнения плазмой.

Учитывая, что при упрочнении поверхности металла ножей резко уменьшается число зон скольжения, нужно установить, существует ли корреляционная связь между средним числом полос в сравниваемых вариантах. Для этого рассчитаны средние значения и дисперсии цветов в указанных выше вариантах (табл. 1).

В результате расчетов выявлена корреляция между средними значениями рассмотренных показателей и числом полос скольжения, образовавшихся при трении. Из таблицы 1 видно, что упрочнение способствует понижению средних характеристик лапласиана, дивергенции и градиента. Это подтверждается тем, что для упрочненного металла резко уменьшается число зон скольжения, то есть чем меньше перепад высоты микрорельефа, тем меньше первые (градиент и дивергенция) и вторая производные (лапласиан). Следовательно, вполне определенно

<sup>2</sup> Там же.



можно отметить, что снижение этих показателей соответствует уменьшению микрорельефа поверхности трения в результате упрочнения плазмой.

Некоторое увеличение максимальных значений показателей является малозначительным. Они возросли не так сильно, как уменьшились их средние значения. Выявленное увеличение максимальных значений параметров

после плазменной обработки, возможно, связано с легкой деформацией квазиаморфной структуры в первый момент эксплуатации. Для повышения точности и исключения погрешности произведены расчеты, при которых отсекались величины, имеющие крайние значения в области гистограмм распределения рассмотренных показателей и превосходящие 5, 10, 40, 60 (табл. 2).

Т а б л и ц а 1

Table 1

**Значения абсолютных величин показателей, описывающих структуру и рельеф поверхности металла ножей, формирующихся при эксплуатации, путем анализа металлографических изображений**

**Values of absolute values of indicators, describing a structure and relief of the knives metal surface, that formed during operating, by the analysis of metallography images**

Показатели / Indicators	Значения абсолютных величин показателей изношенной поверхности / Values of absolute values of indicators of the worn surface			
	не обработанной плазмой / without plasma treatment		после плазменного упрочнения / after plasma strengthening	
	Средние / Average	Максимальные / Maximum	Средние / Average	Максимальные / Maximum
Цвет / Colour	134	–	128	–
Лапласиан (вихрь) / Laplacian (vortex)	108	742	86	742
Дивергенция / Divergence	69	448	56	478
Обобщенный градиент / Generalized gradient	36	227	29	239

Т а б л и ц а 2

Table 2

**Количество точек на гистограммах распределения значений абсолютных величин показателей с учетом погрешностей построения**

**Amount of points in the histograms of values distribution of absolute values of indicators taking into account the inaccuracies of construction**

Показатели (средние) / Indicators (average)	Количество точек на изображении поверхности, для которых значения абсолютных величин показателей меньше, % / The number of points on the surface image, for which the values of the absolute values of the indicators are less, %							
	не обработанной плазмой / not plasma-treated				после плазменного упрочнения / after plasma strengthening			
	5	10	40	60	5	10	40	60
Лапласиан (вихрь) / Laplacian (vortex)	72	63	31	22	70	59	22	14
Дивергенция / Divergence	72	67	35	24	68	63	23	16
Обобщенный градиент / Generalized gradient	72	70	36	27	68	68	25	18



По результатам расчетов (табл. 1 и 2) выполнено моделирование структурообразования (рис. 5), которое показывает распределение абсолютных значений условных цветов, характеризующих диффузию химических элементов (лапласиан), плотность условного цвета по фрагментам изображения (дивергенцию), а также показатель, демонстрирующий интенсивность деформаций, возникающих в процессе трения (обобщенный градиент), на поверхности металла ножей в результате эксплуатации без и после упрочнения плазмой. При рассмотрении гистограмм распределения условного цвета для более четкого изображения рельефа использованы фильтры по абсолютным величинам лапласиана и дивергенций.

Сопоставительный анализ обработки металлографических изображений поверхности трения на ножах без упрочнения и с упрочнением плазмой показал, что на поверхности последней число зон скольжения и их микрорельеф уменьшаются в 2-3 раза.

На рельефе формируются окисленные зоны, которые выстраиваются в один ряд с полосами скольжения, что характерно для структур поверхности трения без и после упрочнения. При этом зона повышенной плотности элементов микрорельефа образуется между зонами скольжения.

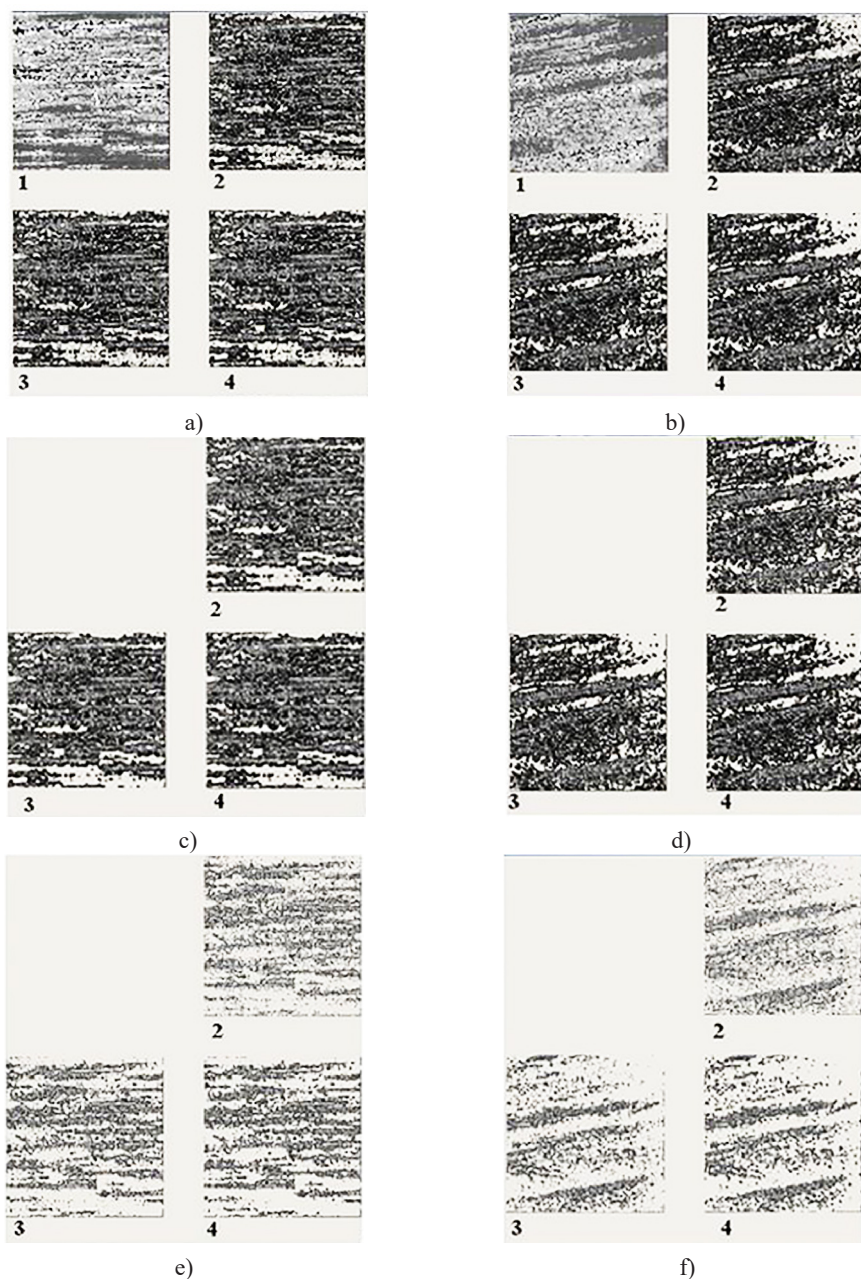
Дополнительно выполнена оценка деформационных зон между полосами скольжения при трении на ножах, предварительно упрочненных плазмой. На рисунке 6 показано распределение расчетных абсолютных значений показателей, характеризующих процесс трения на поверхности металла оцениваемого ножа, (а – после упрочнения плазмой; б – до упрочнения).

В процессе такой упрочняющей обработки происходит эффективное диффузионное воздействие ионов плазмы вглубь расплавленного слоя материала

и следующее сверхбыстрое его охлаждение, время которого может быть сопоставимым или меньшим, чем период зарождения кристаллов. Вследствие того, что энергия передается на протяжении очень короткого промежутка времени и не успевает проникать в глубину материала, нагрев концентрируется в тонком поверхностном слое. Происходит его плавление с одновременным внедрением потока ионов азота в материал мишени при градиенте температур  $\sim 10^8$  К/м.

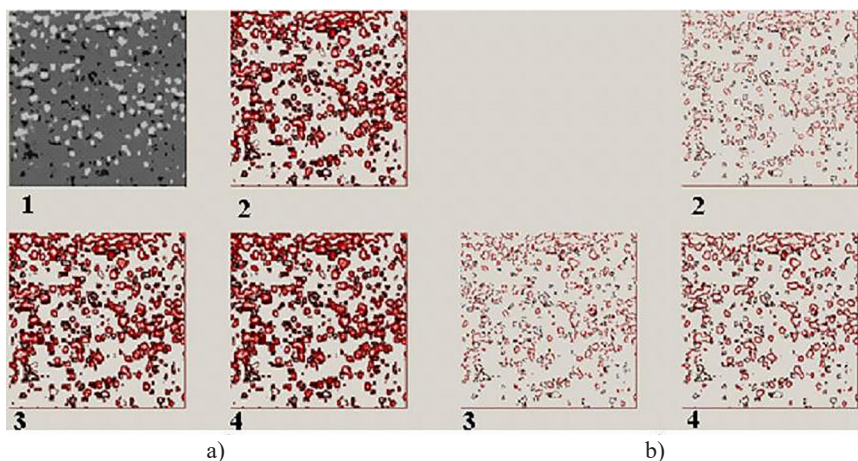
В результате проведенного анализа в деформационных зонах между полосами скольжения при трении на поверхности ножей, предварительно обработанных плазмой, наблюдается, в отличие от ножа без упрочнения, формирование мелкокристаллических ячеек дислокационной структуры, формирующейся вследствие мощных термоударов (быстрого разогрева и последующего охлаждения), что согласуется с исследованиями [2]. Эта структура препятствует образованию полос скольжения при трении, формирует значительные зоны уплотнения и обеспечивает повышение износной и коррозионной стойкости рабочей поверхности ножей.

В условиях изнашивания при трении имеют место еще два процесса, действием которых можно объяснить влияние внедрения примесных ионов азота в слой намного более толстый, чем глубина их проникновения [1]. Первый процесс – это зарождение и развитие новых дислокаций под действием высоких локальных нагрузок на пятнах контакта микронеровностей поверхности. Плотная сетка дислокаций формируется в зоне изнашивания поверхности, и атомы примесей их декорируют. Второй процесс – локальный разогрев поверхности в точках контакта. Движение подвижных примесей происходит и под действием больших температурных градиентов. Это в значительной мере препятствует формированию полос скольжения.



Р и с. 5. Распределения расчетных абсолютных значений показателей, характеризующих процесс трения на поверхности металла ножей без упрочнения (а, с, е) и после упрочнения (b, d, f): 1 – исходная фотография образца; 2 – лапласиан; 3 – обобщенный градиент; 4 – дивергенция. Значения абсолютных величин показателей меньше: а, b – 5; с, d – 10; е, f – 40

F i g. 5. Distributions of calculation absolute values of indicators, characterizing the process of friction on the knives metal surface without strengthening (a, c, e) and after strengthening (b, d, f): 1 – initial photo of a sample; 2 – laplacian; 3 – generalized gradient; 4 – divergence. Values of absolute values of indicators are lower: a, b – 5; c, d – 10; e, f – 40



Р и с. 6. Распределения расчетных абсолютных значений показателей, характеризующих процесс трения на поверхности металла образца после упрочнения плазмой (область между полосами трения): 1 – исходная фотография образца; 2 – лапласиан; 3 – обобщенный градиент; 4 – дивергенция. Значения абсолютных величин показателей: а)  $\pm 0,25$ ; б)  $\pm 0,125$  от среднего значения,  $\times 200$

F i g. 6. Distributions of calculation absolute values of indicators, characterizing the friction process on the sample metal surface after strengthening by plasma (zone between the stripes of friction):

1 – initial photo of a sample; 2 – laplacian; 3 – generalized gradient; 4 – divergence. Values of absolute values of indicators: a)  $\pm 0.25$ ; b)  $\pm 0.125$  from the average value,  $\times 200$

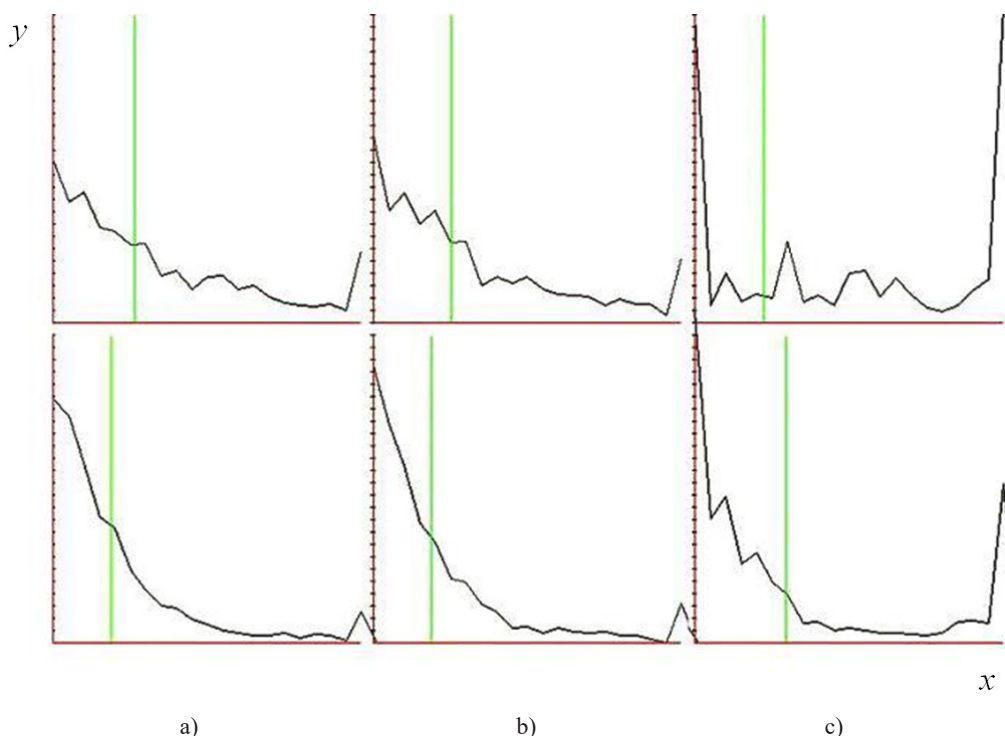
На рисунке 7 представлены гистограммы распределений введенных функций в зависимостях (8), (10), (11), (14) для следующих фотографий: поверхность трения без упрочнения (рис. 7а) и после обработки плазмой (рис. 7б); фрагмент деформационных зон между полосами трения на образцах, предварительно обработанных плазмой (рис. 7с). На оси  $x$  отложены расстояния между точками (пикселями), на оси  $y$  – расчетные значения абсолютных величин приведенных выше параметров.

Гистограммы сравнивали между собой по критерию Колмогорова [31]. Из полученных гистограмм видно, что максимальные значения абсолютных величин дивергенций и лапласианов сильно растянуты, их частота мала, поэтому часть ( $\sim 1\%$ ) можно отбросить. Также следует отметить, что гистограммы лапласианов более однородны и представляют показательный закон распределения. Для всех типов гистограмм

характерно уменьшение величины распределения после обработки плазмой, что свидетельствует о повышении однородности структуры.

Для оценки однородности структуры микрорельефа металла рабочей поверхности ножей проведен ряд анализов металла с использованием нескольких разработанных методов.

Один из них – анализ группировки фрагментов каждой фотографии структур поверхности трения после эксплуатации без упрочнения и после обработки плазмой (рис. 2). На основе введенных 14 функций разработаны алгоритм и программа группировки фрагментов на одной и той же фотографии. Алгоритм основан на сравнении гистограмм при помощи критерия Колмогорова: каждое изображение разбивалось на 20 фрагментов размером  $50 \times 50$  пикселей (4 по горизонтали и 5 по вертикали). Для всех фрагментов строились 14 гистограмм для каждой из введенных функций



Р и с. 7. Гистограммы распределений абсолютных величин дивергенции (верхние) и лапласиана (нижние)

F i g. 7. Histograms of distributions of absolute values of divergences (overhead) and laplacian (lower)

согласно зависимостям (1)–(15). Затем по этим функциям рассчитывались матрицы сравнения вероятностей для гистограмм фрагментов. Для получения матрицы корреляции между фрагментами проведена операция перемножения 14 вероятностей для одного и того же элемента матрицы. Далее корреляционный анализ парных связей средних значений всех функций сравнивали между собой, в результате этого были выбраны фрагменты, где превышен некоторый порог вероятности (с одновременной их фильтрацией для входящих сразу в несколько групп). Получена одна матрица вместо 14.

К рассмотрению принимались только очень слабые и тесные зависимости. Для каждой фотографии (рис. 8) сделано два расчета: первый – одинаковых

фрагментов (с порогом вероятности  $\geq 0,99$ ), второй – отличающихся фрагментов со слабыми зависимостями (порог вероятности  $< 0,5$ ). Ими оказались зависимости цветов от практически всех рассмотренных 14 функций. Первые – назвали «близкими», вторые – «далекими» фрагментами.

В таблицах 3 и 4 приведены данные расчетов для каждого из 20 фрагментов (число возможных сочетаний:  $20 \cdot 21 / 2 = 210$ ) для рассмотренных фотографий. Каждый расчет имеет число строк равное фрагментам. Номер 01 присвоен всей фотографии. Для каждого номера фрагмента (первый столбец) получен их перечень (второй столбец), которые ему «близки» или «далеки» (табл. 3 и 4 соответственно). Последний столбец описывает количество совпадений.



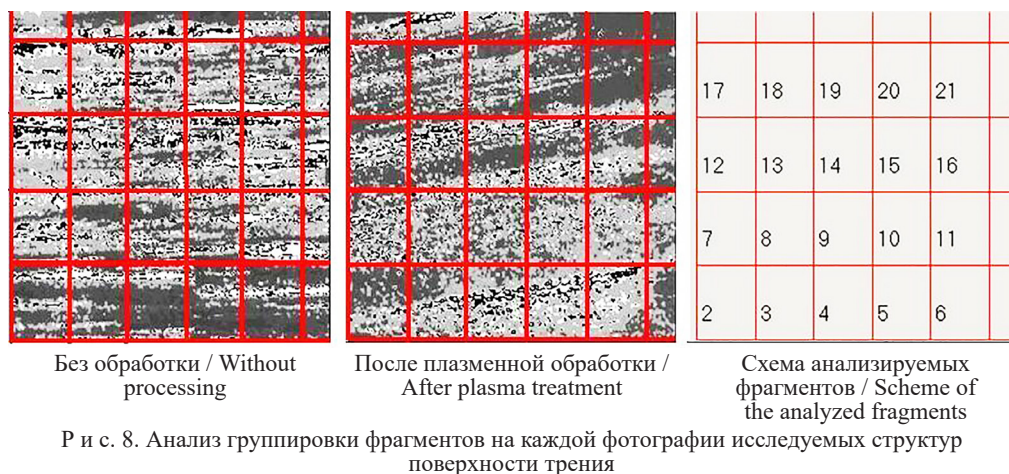


Fig. 8. Analysis of the fragments group on every photo of researching structures of the friction surface

После проведенной упрочняющей обработки общее количество совпадений «близких» фрагментов изображения уменьшается незначительно – на 2 случая (табл. 3). Для «далеких» фрагментов (совпадающих с вероятностью  $<0,5$ ) количество совпадений значительно уменьшается (табл. 4) после проведения упрочняющей обработки плазмой (на 22 случая).

Следовательно, в результате плазменной обработки уменьшается число фрагментов, у которых гистограммы нейтральности практически не совпадают. При этом на всей фотографии (01) число «близких» фрагментов при упрочнении возрастает лишь на 10 %, а их несовпадений снижается на 30 %. В локальных зонах общее количество совпадений фрагментов в исходном ноже после эксплуатации достигает 92 %, а совпадает только 48 % по сравнению с упрочненным (локальные фрагменты 02; 03; 05; 12; и 13). Относительно «далеких» фрагментов, оцененных локально в таблице 4, видно, что общее число несовпадений для исходного состояния ножей не превышает 36 %, а упрочненных всего лишь 14 %. При этом не выявлено ни одного

совпадения между фрагментами упрочненных и сходных ножей после эксплуатации. Для упрочненной поверхности трения в локальных зонах превалируют фрагменты 21, что составляет 43 %. Полученные данные свидетельствуют о повышении однородности структуры металла рабочей поверхности ножей, упрочненных плазмой.

Другим методом исследования однородности структуры металла рабочей поверхности ножей является математический анализ их изображений, основанный на критерии распределения коэффициентов пропорциональности корреляционных зависимостей на малых фрагментах абсолютных значений дивергенций, зависимости (10), (11), (14), с распределением условного цвета (2). С помощью анализа установлено, что абсолютные значения дивергенций представляют собой спектр значений, коррелирующий с распределением условных цветов и полученный в процессе математического анализа [9]. Для рассматриваемого материала спектр указанных функций кратен числу 17.

По результатам вычислений, согласно зависимостям (10), (11), (14),

Таблица 3  
Table 3

Данные по расчету «близких» фрагментов (с порогом вероятности  $\geq 0,99$ )  
Calculation data of “near” fragments (with the threshold of probability  $\geq 0,99$ )

Перечень «близких» фрагментов / List of “near” fragments					
№ фрагмента / Fragment No.	Без упрочнения / Without strengthening	Кол-во / Number	№ фрагмента / Fragment No.	После упрочнения / After strengthening	Кол-во / Number
01	04, 07, 08, 09, 12, 13, 18, 19, 20, 21	10	01	03, 04, 05, 06, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19	11
02	03, 05, 06	3	02	06, 11, 20	3
03	02, 05	2	03	01, 04, 05, 06, 12, 14, 15, 17, 19	9
04	01, 08	2	04	01, 03, 05, 12, 14, 17, 18, 19	8
05	02, 03	2	05	01, 03, 04, 06, 12, 14, 17, 18	8
06	02	1	06	01, 02, 03, 05, 14, 16, 19	7
07	01, 12, 13, 15, 18	5	07	08	1
08	01, 04, 12, 19, 20, 21	6	08	07	1
09	01, 12, 16	3	09	15	1
10	11, 13, 14, 18	4	10	–	0
11	10, 14, 15	3	11	02, 18	2
12	01, 07, 08, 09, 13, 16, 18, 21	8	12	01, 03, 04, 05, 16	5
13	01, 07, 10, 12, 14, 15, 18	7	13	18	1
14	10, 11, 13, 15, 18	5	14	01, 03, 04, 05, 06, 19	6
15	07, 11, 13, 14, 16, 18	6	15	01, 03, 09, 17	4
16	09, 12, 15	3	16	01, 06, 12, 19	4
17	18, 19, 20	3	17	01, 03, 04, 05, 15	5
18	01, 07, 10, 12, 13, 14, 15, 17	8	18	01, 04, 05, 11, 13, 19	6
19	01, 08, 17, 20	4	19	01, 03, 04, 06, 14, 16, 18	7
20	01, 08, 17, 19	4	20	02	1
21	01, 08, 12	3	21	–	0
92 – общее число совпадений по всем фрагментам / 92 – the total number of matches in all fragments		90 – общее число совпадений по всем фрагментам / 90 – the total number of matches in all fragments			



получено суммарное процентное соотношение величин абсолютных дивергенций, значения которых больше 255 (зоны повышенного уплотнения структуры) и создают микрорельеф трения на фрагментах изображений размером  $10 \times 10$  пикселей. К примеру, на рисунке 9 представлены, согласно расчетам, фрагменты изображения (выделены квадратами), для которых процент суммарного значения абсолютных дивергенций,

начиная с 255, больше 20 %. Общее количество таких выделенных фрагментов на фотографии поверхности без упрочнения плазмой (а) равно 24,7 %, а после упрочнения (б) – 13,4 %.

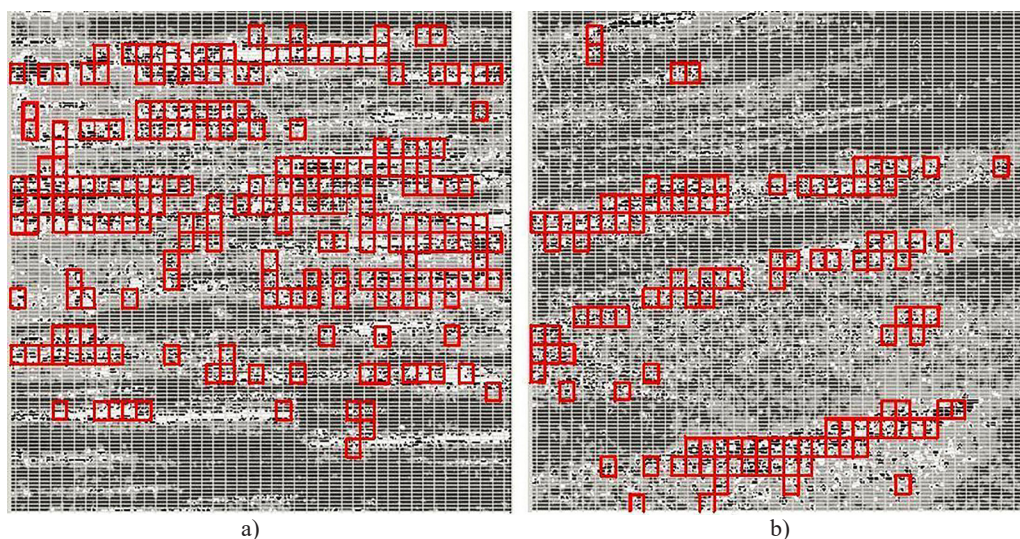
На основании вычислений получена зависимость (рис. 10), отражающая процентное содержание фрагментов на изображении поверхности трения до и после плазменной обработки, для которых процент суммарного значения

Таблица 4

Table 4

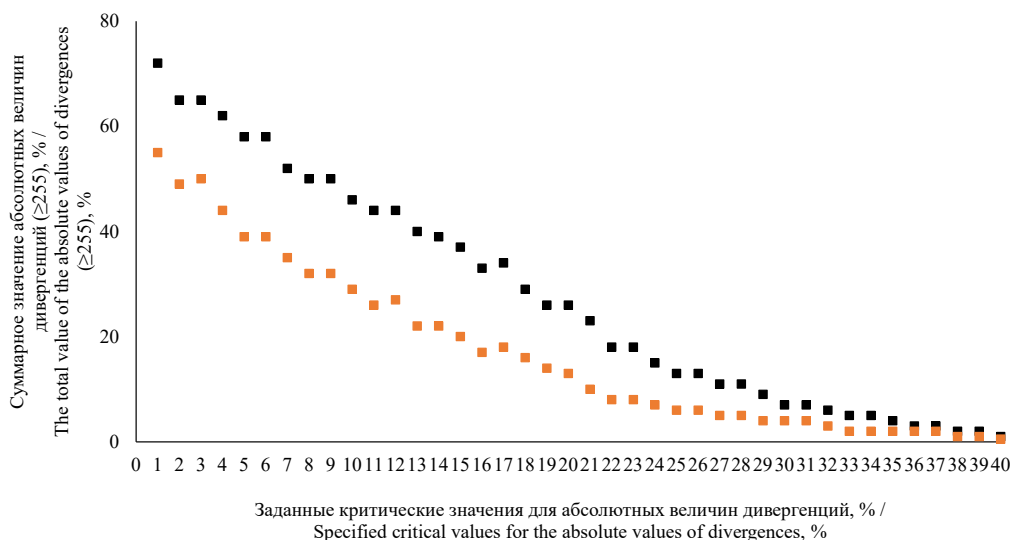
**Данные по расчету «далеких» фрагментов (с порогом вероятности <0,5)**  
**Calculation data of “distant” fragments (with the threshold of probability <0,5)**

Перечень «далеких» фрагментов / List of “distant” fragments					
№ фрагмента / Fragment No.	До упрочнения / Before strengthening	Кол-во / Number	№ фрагмента / Fragment No.	После упрочнения / After strengthening	Кол-во / Number
01	–	0	01	–	0
02	10, 17	2	02	08	1
03	11	1	03	–	0
04	–	0	04	–	0
05	09, 10, 11, 14	4	05	–	0
06	07, 09, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19	11	06	–	0
07	06	1	07	21	1
08	–	0	08	02, 21	2
09	05, 06	2	09	–	0
10	02, 05, 06	3	10	21	1
11	03, 05, 06	3	11	21	1
12	–	0	12	21	1
13	06	1	13	–	0
14	05, 06	2	14	–	0
15	06	1	15	–	0
16	06	1	16	21	1
17	02, 06	2	17	–	0
18	06	1	18	–	0
19	06	1	19	–	0
20	–	0	20	–	0
21	–	0	21	07, 08, 10, 11, 12, 16	6
36 – общее число несовпадений по всем фрагментам / 36 – total number of mismatches across all fragments			14 – общее число несовпадений по всем фрагментам / 14 – total number of mismatches across all fragments		



Р и с. 9. Фрагменты (выделены квадратами) на поверхности трения металла ножей, для которых процент суммарного значения абсолютных дивергенций, начиная с 255, больше 20 %:  
а) без упрочнения; б) после упрочнения плазмой

F i g. 9. Fragments (highlighted with squares) on the friction surface of knives metal for that percent of total value of absolute divergences, starting with 255, more than 20%: a) without strengthening; b) after strengthening by plasma



Р и с. 10. Процентное содержание фрагментов на изображении поверхности трения без и после плазменной обработки, для которых процент суммарного значения абсолютных дивергенций ( $\geq 255$ ) больше заданных критических значений (от 1 до 40 %): верхняя кривая – без упрочняющей обработки; нижняя – после

F i g. 10. Percentage of fragments in the picture of the friction surface without and after plasma treatment, for that percent of total value of absolute divergences ( $\geq 255$ ) more given critical values (from 1 to 40%): overhead curve – without strengthening treatment; lower – after one

абсолютных дивергенций  $\geq 255$  относительно заданных критических значений (от 1 до 40 %). Получены две кривые, показывающие, что после упрочнения плазмой поверхность ножей имеет более однородную структуру (величины суммарных значений дивергенций в 2-3 раза меньше – нижняя кривая), чем без обработки.

### Обсуждение и заключение

Предложен метод и параметры упрочнения тонкостенных ножей сложной формы для переработки сахарной свеклы. Для упрочнения использовался плазменный ускоритель и процесс осуществлялся путем одновременного модифицирования всей рабочей поверхности азотом при облучении мощными импульсными потоками плазмы. При этом достигалось упрочнение до 100 мкм. Определены оптимальные параметры обработки: энергия ионов, плотность, удельная мощность и давление плазмы. Используемый метод обработки основан на сверхбыстром охлаждении расплавленного слоя ( $\sim 10^{-6}$  с). Максимальный эффект упрочнения достигался обработкой 3–10 импульсами продолжительностью не более 10 мкс каждый.

Для установления факторов, которые обеспечивают повышение стойкости тонкостенных ножей при переработке сахарной свеклы использовался комплексный математический подход в исследованиях их структурообразования при эксплуатации. Для математического описания характера износа поверхности трения применялись специальные подходы, которые включают статистическую качественную и количественную оценку поверхности трения с использованием оригинальной программы разработанного анализа, а также оптическую и электронную микроскопию.

С помощью оптико-математического метода проведен сопоставительный

анализ металлографических изображений поверхности трения ножей после эксплуатации без обработки и с упрочнением азотистой плазмой. Показано, что на упрочненной поверхности число полос скольжения при эксплуатации уменьшается в 2-3 раза. Между полосами скольжения формируются дислокационные сетки и более плотная зона сжатия. Они и препятствуют развитию рельефа, который наиболее характерен для неупрочненных поверхностей. В результате предложенного режима облучения импульсными потоками азотистой плазмы создаются условия для формирования квазиаморфного слоя с минимальной шероховатостью и повышенной стойкостью к износу и коррозии. После плазменной обработки на поверхности режущего инструмента не выявлено изменений в геометрии ножа и внешних повреждений (микротрещин).

Для описания процесса структурообразования по влиянию упрочнения на характер и особенности износа поверхности трения использовались различные подходы математического описания процессов, формируемых на поверхности трения. Установлено, что упрочнение импульсной азотистой плазмой формирует увеличенную долю зон, отличающихся повышенным уплотнением. Воздействие импульсного плазменного потока с формированием на поверхности трения квазиаморфной структуры способствует более легкой деформации в период приработки инструмента при эксплуатации.

Методом электронной микроскопии и локальным спектральным анализом показано, что предложенный метод упрочнения уменьшает склонность рабочей поверхности к коррозионной повреждаемости. Так, при эксплуатации ножей без упрочнения выявлены зоны с долей кислорода до 19,73 % при общем покрытии рабочей поверх-

ности вторичными защитными структурами окисных пленок до 2,4–8,8 %. В варианте с упрочнением содержание кислорода во всех зонах не превышает 3,52–3,84 %.

Эксплуатационные испытания (бывших ранее в использовании) свеклорезальных ножей, подвергнутых упрочнению плазмой с одной стороны, показали значительный рост микро-

твердости (до 3 раз) в зонах полос упрочнения. Эксплуатационная стойкость таких упрочненных ножей повышается в 4–5 раз, а новых – до 10 раз. Кроме этого, благодаря обработке только одной из сторон режущего инструмента обеспечивалась его способность к самозатачиванию в ходе процесса резания с сохранением сложного профиля режущей кромки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ротштейн, В. П. Поверхностная модификация и легирование металлических материалов низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками / В. П. Ротштейн, А. Б. Марков // Вестник ТГПУ. – 2006. – Вып. 6 (57). – С. 11–19. – URL: [https://vestnik.tspu.edu.ru/files/vestnik/PDF/articles/rotshtejn\\_v\\_p\\_11\\_19\\_6\\_57\\_2006.pdf](https://vestnik.tspu.edu.ru/files/vestnik/PDF/articles/rotshtejn_v_p_11_19_6_57_2006.pdf) (дата обращения: 29.01.2021).
2. Калинин, Б. А. Модификация металлических материалов при обработке потоками высокотемпературной импульсной плазмы / Б. А. Калинин, В. Л. Якушин, В. И. Польский. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Физика. – 1994. – Т. 37, № 5. – С. 109–126.
3. Novak, P. Wear and Corrosion Resistance of a Plasma-Nitrided PM Tool Steel Alloyed with Niobium / P. Novak, D. Vojtech, J. Serak. – DOI 10.1016/j.surfcoat.2005.06.023 // Surface and Coatings Technology. – 2006. – Vol. 200, Issue 18–19. – Pp. 5229–5236. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897205007243?via%3Dihub> (дата обращения: 29.01.2021).
4. Surface Morphology and Mechanical Strength of AISI M2 Tool Steel Treated in Abnormal Glow Region of Plasma / M. Y. Naz, S. Shukrullah, A. Ghaffar [et al.]. – DOI 10.3103/S1068375515010093 // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2015. – Vol. 51. – Pp. 58–64. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375515010093> (дата обращения: 29.01.2021).
5. Petrov, S. V. Technology and Equipment for Plasma Surface Strengthening of Heavy-Duty Parts / S. V. Petrov, A. G. Saakov. – DOI 10.1081/AMP-120005382 // Materials and Manufacturing Processes. – 2002. – Vol. 17, Issue 3. – Pp. 363–378. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/AMP-120005382> (дата обращения: 29.01.2021).
6. Плазменная обработка как эффективное средство упрочнения / Т. С. Скобло, Д. И. Черных, И. Е. Гаркуша [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник ХНТУСГ им. П. Василенко. – 2010. – Вып. 101. – С. 8–11.
7. Production and Characterization of CA–PVD ZrN and ZrCN Coatings on AISI D3 High-Carbon Tool Steel / A. V. Taran, I. E. Garkusha, V. S. Taran [et al.]. – DOI 10.1615/HighTempMatProc.2020034981 // High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes. – 2020. – Vol. 24, Issue 2. – Pp. 109–120. – URL: <http://www.dl.begellhouse.com/journals/57d172397126f956,046b81555aaffc76,396dfac339c6cb7c.html> (дата обращения: 29.01.2021).
8. Nitrogen Plasma Surface Treatment for Improving Polar Ink Adhesion on Micro/Nanofibrillated Cellulose Films / K. Dimic-Misic, M. Kostić, B. Obradović [et al.]. – DOI 10.1007/s10570-019-02269-4 // Cellulose. – 2019. – Vol. 26. – Pp. 3845–3857. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10570-019-02269-4> (дата обращения: 29.01.2021).
9. Development of Niobium Based Coatings Prepared by Ion-Plasma Vacuum-Arc Deposition / V. S. Taran, I. E. Garkusha, O. I. Tymoshenko [et al.]. – DOI 10.1615/PlasmaMed.2020034060 // Plasma Medicine. – 2020. – Vol. 10, Issue 1. – Pp. 61–69. – URL: <http://www.dl.begellhouse.com/journals/5a5b4a3d419387fb,0c13ee6534cd916a,24068b8368203615.html> (дата обращения: 29.01.2021).
10. Luo, W. The Corrosion Resistance of 0Cr19Ni9 Stainless Steel Arc Welding Joints with and without Arc Surface Melting / W. Luo. – DOI 10.1016/S0921-5093(02)00397-0 // Materials Science and





Engineering: A. – 2003. – Vol. 345, Issue 1–2. – Pp. 1–7. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509302003970> (дата обращения: 29.01.2021).

11. **Wang, J.** Plasma Arc Cutting Torch Tracking Control / J. Wang, K. Kusumoto, K. Nezu. – DOI 10.1179/136217101101538695 // Science Technology of Welding and Joining. – 2001. – Vol. 6, Issue 3. – Pp. 154–158. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/136217101101538695> (дата обращения: 29.01.2021).

12. **Pan, C.-X.** Microstructural Development in Plasma Jet Forming of Sheet Steels / C.-X. Pan, Y.-W. Chen, A. T. Male. – DOI 10.1179/026708302225006043 // Materials Science and Technology. – 2002. – Vol. 18. – Pp. 1151–1155. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/026708302225006043> (дата обращения: 29.01.2021).

13. Plasma-Surface Modification of Biomaterials / P. K. Chu, J. Y. Chen, L. P. Wang, N. Huang // Materials Science and Engineering. – 2002. – Vol. 36. – Pp. 143–206. – URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.452.780&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения: 29.01.2021).

14. Nanostructured ZrO<sub>2</sub> Ceramic PVD Coatings on Nd-Fe-B Permanent Magnets / A. Taran, I. Garkusha, V. Taran [et al.]. – DOI 10.4024/N23TA18A.ntp.15.01 // Nanotechnology Perceptions. – 2019. – Vol. 15, Issue 1. – Pp. 13–20. – URL: <http://www.colbas.org/ntp/abstracts/N23TA18A-abs.pdf> (дата обращения: 29.01.2021).

15. **Patent No. CA2403346C USA.** Blade Having High Sharpness and Toughness : No. 2001/005806 : publ. 20.09.2001 / Meckel N. K. – 24 p. – URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/a1/f1/bd/95a6e9118b9230/CA2403346C.pdf> (дата обращения: 29.01.2021).

16. **Батраченко, А. В.** Влияние импульсно-плазменной обработки на микроструктуру и свойства стали 65Г / А. В. Батраченко // Проблеми трибології. – 2014. – № 3. – С. 86–92. – URL: <http://tribology.khnu.km.ua/index.php/ProbTrib/article/view/397/887> (дата обращения: 29.01.2021).

17. **Некоз, А. И.** Упрочнение ножей волчков и куттеров импульсно-плазменной обработкой / А. И. Некоз, А. В. Батраченко. – Текст : непосредственный // Научный обозреватель. – 2012. – № 12. – С. 115–118.

18. Effect of Plasma Nitriding Treatment of Stainless Steel Cutlery on Cutting Performance / T. Tamaoki, A. Okada, K. Uemura, Y. Uno. – DOI 10.2493/jjspe.79.950 // Journal of the Japan Society for Precision Engineering. – 2013. – Vol. 79, Issue 10. – Pp. 950–954. – URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/79/10/79\\_950/article/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/79/10/79_950/article/-char/ja) (дата обращения: 29.01.2021).

19. Hollow-Cathode Low-Pressure Arc Discharges and Their Application in Plasma Generators and Charged-Particle Sources / L. G. Vintizenko, S. V. Grigoriev, N. N. Koval [et al.]. – DOI 10.1023/A:1014353721504 // Russian Physics Journal. – 2001. – Vol. 44. – Pp. 927–936. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1023%2FA%3A1014353721504> (дата обращения: 29.01.2021).

20. Properties and Comparison of PVD Coatings / I. Mrkvica, M. Neslušan, R. Čep, V. Sléha. – DOI 10.17559/TV-20140509105317 // Tehnički vjesnik – Technical Gazette. – 2016. – Vol. 23, Issue 2. – Pp. 569–574. – URL: [https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id\\_clanak\\_jezik=231190&lang=en](https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=231190&lang=en) (дата обращения: 29.01.2021).

21. **Caiazzo, F. C.** Multilayer Coatings Based on Crn/Cr for Molds of Plastics / F. C. Caiazzo, V. Sisti, S. Trasatti // La Metallurgia Italiana. – 2014. – № 6. – Pp. 3–8. – URL: [http://www.aimnet.it/allpdf/pdf\\_pubbli/giu14/CovaCaiazzo.pdf](http://www.aimnet.it/allpdf/pdf_pubbli/giu14/CovaCaiazzo.pdf) (дата обращения: 29.01.2021).

22. Dependence of Mechanical and Tribotechnical Properties of Multilayered Tin/Zn Coatings on Deposition / O. V. Bondar, V. A. Stolbovoy, M. K. Kylyshkanov [et al.]. – DOI 10.15199/48.2015.12.60 // Przegląd Elektrotechniczny. – 2015. – № 12. – Pp. 233–236. – URL: <https://sigma-not.pl/publikacja-95296-2015-12.html> (дата обращения: 29.01.2021).

23. Effect of Cathodic Cage Size on Plasma Nitriding of AISI, 304 Steel / M. Naeem, M. Shafiq, Z. Mujahid, M. Zaka-ul-Islam. – DOI 10.1016/j.matlet.2016.05.144 // Materials Letters. – 2016. – Vol. 181. – Pp. 78–81. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167577X16309053?via%3Dihub> (дата обращения: 29.01.2021).

24. Anodisation of Medical Grade Titanium / B. Katona, L. Náday, A. Terdik, E. Bognár. – DOI 10.17489/biohun/2013/1/22 // Biomechanica Hungarica. – 2013. – Vol. 6, Issue 1. – Pp. 197–203. – URL: <http://biomechanica.hu/index.php/biomech/article/viewFile/144/259> (дата обращения: 29.01.2021).

25. Kovács, D. Effects of Different Variants of Plasma Nitriding on the Properties of the Nitrided Layer / D. Kovács, I. Quintana, J. Dobránszky. – DOI [10.1007/s11665-019-04292-9](https://doi.org/10.1007/s11665-019-04292-9) // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2019. – Vol. 28. – Pp. 5485–5493. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-019-04292-9> (дата обращения: 29.01.2021).

26. Conditions for the Formation of a Martensitic Single-Phase Compound Layer in Ion-Nitrided 316L Austenitic Stainless Steel / K. Marchev, C. V. Cooper, J. T. Blucher, B. C. Giessen. – DOI [10.1016/S0257-8972\(97\)00532-X](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(97)00532-X) // Surface and Coatings Technology. – 1998. – Vol. 99, Issue 3. – Pp. 225–228. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S025789729700532X?via%3Dihub> (дата обращения: 29.01.2021).

27. Патент № 57072 Україна, МПК C23C 8/24 (2006.01) C23C 14/56 (2006.01). Вакуумно-плазмовий спосіб зміцнення різального інструмента з вуглецевої сталі : № u201008747 : заявл. 13.07.2010 : опубл. 10.02.2011 / Гаркуша І. Є. [та інш.] ; заявник та патентовласник ННЦ «ХФТІ». – 2 с. – URL: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=155389> (дата обращения: 29.01.2021).

28. Скобло, Т. С. Применение компьютерного анализа металлографических изображений при исследовании структуры высокохромистого чугуна / Т. С. Скобло, О. Ю. Клочко, Е. Л. Белкин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – Т. 78, № 6. – С. 35–42. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17892268> (дата обращения: 29.01.2021). – Рез. англ.

29. Новые подходы в исследовании неоднородности гетерогенных структур / Т. С. Скобло, О. Ю. Клочко, Е. Л. Белкин, А. И. Сидашенко. – DOI [10.15407/mfint.40.02.0255](https://doi.org/10.15407/mfint.40.02.0255) // Металлофизика и новейшие технологии. – 2018. – Т. 40, № 2. – С. 255–280. – URL: <https://mfint.imp.kiev.ua/ru/abstract/v40/i02/0255.html> (дата обращения: 29.01.2021). – Рез. англ.

30. Структурообразование высокохромистых чугунов в интервале температур магнитного превращения карбидных фаз / Т. С. Скобло, О. Ю. Клочко, Е. Л. Белкин [и др.]. – DOI [10.22226/2410-3535-2020-2-129-134](https://doi.org/10.22226/2410-3535-2020-2-129-134) // Письма о материалах. – 2020. – Т. 10, № 2. – С. 129–134. – URL: <https://lettersonmaterials.com/ru/Readers/Article.aspx?aid=24616> (дата обращения: 29.01.2021). – Рез. англ.

31. Лемешко, Б. Ю. Сравнительный анализ мощности критериев согласия при близких конкурирующих гипотезах. I. Проверка простых гипотез / Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко, С. Н. Постовалов // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2008. – Т. 11, № 2 (34). – С. 96–111. – URL: [https://ami.nstu.ru/~headrd/seminar/publik\\_html/Power\\_Part\\_1.pdf](https://ami.nstu.ru/~headrd/seminar/publik_html/Power_Part_1.pdf) (дата обращения: 29.01.2021).

*Поступила 11.08.2020; одобрена после рецензирования 12.10.2020; принята к публикации 26.10.2020*

*Об авторах:*

**Скобло Тамара Семеновна**, профессор кафедры технологических систем ремонтного производства Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко (61002, Украина, г. Харьков, ул. Алчевских, д. 44), доктор технических наук, Researcher ID: [G-2334-2018](https://orcid.org/0000-0002-9824-4550), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9824-4550>, [skoblo.tamara@gmail.com](mailto:skoblo.tamara@gmail.com)

**Клочко Оксана Юрьевна**, доцент кафедры технологии материалов Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко (61002, Украина, г. Харьков, ул. Алчевских, д. 44), доктор технических наук, Researcher ID: [H-7478-2018](https://orcid.org/0000-0003-3623-6587), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3623-6587>, [vklochko@khntusg.info](mailto:vklochko@khntusg.info)

**Автухов Анатолий Кузьмич**, доцент кафедры технологических систем ремонтного производства Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко (61002, Украина, г. Харьков, ул. Алчевских, д. 44), доктор технических наук, Researcher ID: [C-1306-2018](https://orcid.org/0000-0002-7613-1803), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7613-1803>, [avtuhov@khntusg.info](mailto:avtuhov@khntusg.info)

**Романченко Владимир Николаевич**, заведующий кафедрой технологических систем ремонтного производства Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко (61002, Украина, г. Харьков, ул. Алчевских, д. 44), кандидат технических наук, доцент, Researcher ID: [G-6154-2017](https://orcid.org/0000-0002-0445-3125), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0445-3125>, [vladivlad78@khntusg.info](mailto:vladivlad78@khntusg.info)



**Плугатарёв Артем Валентинович**, старший преподаватель кафедры физики и теоретической механики Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко (61002, Украина, г. Харьков, ул. Алчевских, д. 44), кандидат технических наук, Researcher ID: E-9979-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7255-1002>, plugatarev\_khntusg@ukr.net

**Рыбалко Иван Николаевич**, старший преподаватель кафедры технологических систем ремонтного производства Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко (61002, Украина, г. Харьков, ул. Алчевских, д. 44), кандидат технических наук, Researcher ID: I-8014-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3663-019X>, irybalko.ua@gmail.com

*Заявленный вклад соавторов:*

- Т. С. Скобло – подготовка материалов, обобщение и описание результатов.  
О. Ю. Ключко – математическая обработка результатов.  
А. К. Автухов – проведение электронномикроскопических исследований.  
В. Н. Романченко – обоснование и выбор технологии упрочнения.  
А. В. Плугатарёв – вырезка и подготовка образцов для исследований, выявление микроструктуры.  
И. Н. Рыбалко – участие в проведении экспериментов по электронной микроскопии и изучение поверхности трения.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Rotshteyn V.P., Markov A.B. [Surface Modification and Alloying of Metallic Materials with Low-Energy High-Current Electron Beams]. *Vestnik TGPU* = TGPU Bulletin. 2006; (6):11-19. Available at: [https://vestnik.tspu.edu.ru/files/vestnik/PDF/articles/rotshtejn\\_v.\\_p.\\_11\\_19\\_6\\_57\\_2006.pdf](https://vestnik.tspu.edu.ru/files/vestnik/PDF/articles/rotshtejn_v._p._11_19_6_57_2006.pdf) (accessed 29.01.2021). (In Russ.)
2. Kalin B.A., Yakushin V.L., Polskiy V.I. [Modification of Metallic Materials by Treatment with High-Temperature Pulsed Plasma Flows]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika* = Proceedings of Higher Education Institutions. Physics. 1994; 37(5):109-126. (In Russ.)
3. Novak P., Vojtech D., Serak J. Wear and Corrosion Resistance of a Plasma-Nitrided PM Tool Steel Alloyed with Niobium. *Surface and Coatings Technology*. 2006; 200(18-19):5229-5236. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.06.023>
4. Naz M.Y., Shukrullah S., Ghaffar A., et al. Surface Morphology and Mechanical Strength of AISI M2 Tool Steel Treated in Abnormal Glow Region of Plasma. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2015; 51:58-64. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375515010093>
5. Petrov S.V., Saakov A.G. Technology and Equipment for Plasma Surface Hardening of Heavy-Duty Parts. *Materials and Manufacturing Processes*. 2002; 17(3):363-378. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1081/AMP-120005382>
6. Skoblo T.S., Chernykh D.I., Garkusha I.Ye., et al. [Plasma Treatment as an Effective Means of Hardening]. *Vestnik KhNTUSG im. P. Vasilenko* = KhNTUSG Bulletin. 2010; 101:8-11. (In Russ.)
7. Taran A.V., Garkusha I.E., Taran V.S., et al. Production and Characterization of CA-PVD ZrN and ZrCN Coatings on AISI D3 High-Carbon Tool Steel. *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*. 2020; 24(2):109-120. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2020034981>
8. Dimic-Misic K., Kostić M., Obradović B., et al. Nitrogen Plasma Surface Treatment for Improving Polar Ink Adhesion on Micro/Nanofibrillated Cellulose Films. *Cellulose*. 2019; 26:3845-3857. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02269-4>
9. Taran V.S., Garkusha I.E., Tymoshenko O.I., et al. Development of Niobium Based Coatings Prepared by Ion-Plasma Vacuum-Arc Deposition. *Plasma Medicine*. 2020; 10(1):61-69. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1615/PlasmaMed.2020034060>

10. Luo W. The Corrosion Resistance of 0Cr19Ni9 Stainless Steel Arc Welding Joints with and without Arc Surface Melting. *Materials Science and Engineering: A*. 2003; 345(1-2):1-7. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00397-0](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00397-0)
11. Wang J., Kusumoto K., Nezu K. Plasma Arc Cutting Torch Tracking Control. *Science Technology of Welding and Joining*. 2001; 6(3):154-158. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1179/136217101101538695>
12. Pan C.-X., Chen Y.-W., Male A.T. Microstructural Development in Plasma Jet Forming of Sheet Steels. *Materials Science and Technology*. 2002; 18:1151-1155. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1179/026708302225006043>
13. Chu P.K., Chen J.Y., Wang L.P., et al. Plasma-Surface Modification of Biomaterials. *Materials Science and Engineering*. 2002; 36:143-206. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.452.780&rep=rep1&type=pdf> (accessed 29.01.2021). (In Eng.)
14. Taran A., Garkusha I., Taran V., et al. Nanostructured ZrO<sub>2</sub> Ceramic PVD Coatings on Nd-Fe-B Permanent Magnets. *Nanotechnology Perceptions*. 2019; 15(1):13-20. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4024/N23TA18A.ntp.15.01>
15. Blade Having High Sharpness and Toughness: Patent CA2403346C USA. No. 2001/005806; publ. 20.09.2001. 24 p. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/a1/f1/bd/95a6e9118b9230/CA2403346C.pdf> (accessed 29.01.2021). (In Eng.)
16. Batrachenko A.V. [Influence of Pulse Plasma Treatment on the Microstructure and Properties of 65g Steel]. *Problemi tribologii* = Problems of Tribology. 2014; (3):86-92. Available at: <http://tribology.khnu.km.ua/index.php/ProbTrib/article/view/397/887> (accessed 29.01.2021). (In Russ.)
17. Nekoz A.I., Batrachenko A.V. [Strengthening Knives of Grinders and Cutter Knives by Pulse-Plasma Treatment]. *Nauchnyy obozrevatel* = Science Reviewer. 2012; (12):115-118. (In Russ.)
18. Tamaoki T., Okada A., Uemura K., et al. Effect of Plasma Nitriding Treatment of Stainless Steel Cutlery on Cutting Performance. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*. 2013; 79(10):950-954. (In Ja.) DOI: <https://doi.org/10.2493/jjspe.79.950>
19. Vintizenko L.G., Grigoriev S.V., Koval N.N., et al. Hollow-Cathode Low-Pressure Arc Discharges and Their Application in Plasma Generators and Charged-Particle Sources. *Russian Physics Journal*. 2001; 44:927-936. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1014353721504>
20. Mrkvica I., Neslušán M., Čep R., et al. Properties and Comparison of PVD Coatings. *Tehnički vjesnik – Technical Gazette*. 2016; 23(2):569-574. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17559/TV-20140509105317>
21. Caiazzo F.C., Sisti V., Trasatti S. Multilayer Coatings Based on Crn/Cr for Molds of Plastics. *La Metallurgia Italiana*. 2014; (6):3-8. Available at: [http://www.aimnet.it/allpdf/pdf\\_pubbli/giu14/CovaCaiazzo.pdf](http://www.aimnet.it/allpdf/pdf_pubbli/giu14/CovaCaiazzo.pdf) (accessed 29.01.2021). (In Eng.)
22. Bondar O.V., Stolbovoy V.A., Kylyshkanov M.K., et al. Dependence of Mechanical and Tribotechnical Properties of Multilayered Tin/Zn Coatings on Deposition. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2015; (12):233-236. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2015.12.60>
23. Naeem M., Shafiq M., Mujahid Z., et al. Effect of Cathodic Cage Size on Plasma Nitriding of AISI, 304 Steel. *Materials Letters*. 2016; 181:78-81. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.05.144>
24. Katona B., Náday L., Terdik A., et al. Anodisation of Medical Grade Titanium. *Biomechanica Hungarica*. 2013; 6(1):197-203. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17489/biohun/2013/1/22>
25. Kovács D., Quintana I., Dobránszky J. Effects of Different Variants of Plasma Nitriding on the Properties of the Nitrided Layer. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2019; 28:5485-5493. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04292-9>
26. Marchev K., Cooper C.V., Blucher J.T., et al. Conditions for the Formation of a Martensitic Single-Phase Compound Layer in Ion-Nitrided 316L Austenitic Stainless Steel. *Surface and Coatings Technology*. 1998; 99(3):225-228. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(97\)00532-X](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(97)00532-X)
27. [Vacuum-Plasma Method of Strengthening a Carbon Steel Cutting Tool]: Patent 57072 Ukraine. No. u201008747; appl. 13.07.2010; publ. 10.02.2011. 2 p. Available at: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=155389> (accessed 29.01.2021). (In Ukr.)
28. Skoblo T.S., Klochko O.Yu., Belkin E.L. The Use of Computer Analysis of Metallographic Images in the Study of the Structure of High-Chromium Cast Iron. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika*



*materialov* = Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials. 2012; 78(6):35-42. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17892268> (accessed 29.01.2021). (In Russ.)

29. Skoblo T.S., Klochko O.Yu., Belkin E.L., et al. New Approaches in Study of Inhomogeneity of Heterogeneous Structures. *Metallofizika i noveishie tekhnologii* = Metallophysics and Advanced Technologies. 2018; 40(2):255-280. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.40.02.0255>

30. Skoblo T.S., Klochko O.Y., Belkin E.L., et al. Structure Formation of High-Chromium Cast Irons in the Temperature Range of the Magnetic Transformation of Carbide Phases. *Pisma o materialakh* = Letters on Materials. 2020; 10(2):129-134. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2020-2-129-134>

31. Lemeshko B.Yu., Lemeshko S.B., Postovalov S.N. [Comparative Analysis of the Power of Agreement Criteria for Close Competing Hypotheses. I. Testing of Simple Hypotheses]. *Sibirskiy zhurnal industrial'noy matematiki* = Siberian Journal of Industrial Mathematics. 2008; 11(2):96-111. Available at: [https://ami.nstu.ru/~headr/seminar/publik\\_html/Power\\_Part\\_1.pdf](https://ami.nstu.ru/~headr/seminar/publik_html/Power_Part_1.pdf) (accessed 29.01.2021). (In Russ.)

*Submitted 11.08.2020; approved after reviewing 12.10.2020; accepted for publication 26.10.2020*

#### *About the authors:*

**Tamara S. Skoblo**, Professor of the Chair of Technological Systems of Repair Production, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture (44 Alchevskikh St., Kharkiv 61002, Ukraine), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: [G-2334-2018](https://orcid.org/0000-0002-9824-4550), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9824-4550>, [skoblo.tamara@gmail.com](mailto:skoblo.tamara@gmail.com)

**Oksana Yu. Klochko**, Associate Professor of the Chair of Materials Technology, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture (44 Alchevskikh St., Kharkiv 61002, Ukraine), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: [H-7478-2018](https://orcid.org/0000-0003-3623-6587), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3623-6587>, [vklochko@khntusg.info](mailto:vklochko@khntusg.info)

**Anatoly K. Avtukhov**, Associate Professor of the Chair of Technological Systems of Repair Production, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture (44 Alchevskikh St., Kharkiv 61002, Ukraine), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: [C-1306-2018](https://orcid.org/0000-0002-7613-1803), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7613-1803>, [avtuhov@khntusg.info](mailto:avtuhov@khntusg.info)

**Vladimir N. Romanchenko**, Head of the Chair of Technological Systems of Repair Production, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture (44 Alchevskikh St., Kharkiv 61002, Ukraine), Cand.Sc. (Engineering), Associate Professor, Researcher ID: [G-6154-2017](https://orcid.org/0000-0002-0445-3125), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0445-3125>, [vladivlad78@khntusg.info](mailto:vladivlad78@khntusg.info)

**Artem V. Plugatarev**, Senior Lecturer of the Chair of Physics and Theoretical Mechanics, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture (44 Alchevskikh St., Kharkiv 61002, Ukraine), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: [E-9979-2017](https://orcid.org/0000-0001-7255-1002), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7255-1002>, [plugatarev\\_khntusg@ukr.net](mailto:plugatarev_khntusg@ukr.net)

**Ivan N. Rybalko**, Senior Lecturer of the Chair of Physics and Theoretical Mechanics, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture (44 Alchevskikh St., Kharkiv 61002, Ukraine), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: [I-8014-2016](https://orcid.org/0000-0002-3663-019X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3663-019X>, [irybalko.ua@gmail.com](mailto:irybalko.ua@gmail.com)

#### *Contribution of the authors:*

T. S. Skoblo – preparation of materials, synthesis and description of results.

O. Yu. Klochko – mathematical treatment of results.

A. K. Avtukhov – electron microscopic examinations.

V. N. Romanchenko – justification and choice of hardening technology.

A. V. Plugatarev – cutting and preparing samples for research, identifying the microstructure.

I. N. Rybalko – participation in electron microscopy experiments and friction surface studies.

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



## Моделирование движения опоры шагающей машины с динамической устойчивостью при помощи стенда

Ю. Г. Алейников, О. Н. Дидманидзе\*

ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (г. Москва, Российская Федерация)

\*yuri@aleyrobotics.com

**Введение.** Проблема изучения шагающих машин на протяжении многих десятилетий не теряет актуальности. Современные технологии помогают создавать новые конструкции с цифровым управлением. Программное обеспечение, позволяющее шагающей машине самостоятельно передвигаться, является сложной задачей для реализации. Для движения машины необходимо обрабатывать данные с помощью множества сенсоров. В статье продемонстрированы конструкторские решения и алгоритмы, применяемые для управления движением опытной шагающей машины.

**Материалы и методы.** Для моделирования движения шагающей машины и экспериментальных исследований был изготовлен стенд, повторяющий все электронные системы машины. Показаны порядок перестановки опор во время перемещения и траектория движения опоры. Рассмотрена конструкция датчиков и принцип действия. Продемонстрирован стенд для моделирования с описанием его электронных компонентов.

**Результаты исследования.** Были определены оптимальные параметры движения опоры. Описан циклический алгоритм движения опоры по траектории, состоящей из прямолинейных отрезков. Решена проблема синхронизации движения множества опор с применением многопоточного асинхронного программирования, адаптированного для многомерных процессоров. Смоделированы процесс опускания опоры на поверхность и реакция циклического алгоритма на изменение показаний датчиков удара и нагружения.

**Обсуждение и заключение.** Разработан алгоритм движения опоры с реакцией на изменение показаний датчиков. Проведенные исследования позволили получить оптимальную алгоритмическую модель, к которой легко добавлять новые реакции автоматической системы управления движением, основанные на показаниях датчиков.

**Ключевые слова:** шагающая машина, датчики шагающей машины, алгоритмы управления движением, траектория движения опоры, электроника шагающей машины, микроконтроллеры, датчики

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

**Для цитирования:** Алейников, Ю. Г. Моделирование движения опоры шагающей машины с динамической устойчивостью при помощи стенда / Ю. Г. Алейников, О. Н. Дидманидзе. – DOI 10.15507/2658-4123.031.202101.080-096 // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 1. – С. 80–96.



# Modeling Movement of Supports of Walking Machines with Dynamic Stability by Using a Stand

**Yu. G. Aleynikov, O. N. Didmanidze\***

*Russian Timiryazev State Agrarian University (Moscow,  
Russian Federation)*

*\*yuri@aleyrobotics.com*

**Introduction.** Walking machines have been interesting for decades. Modern technologies make it possible to create new designs with digital control. Creating software that allows a walking machine to move independently is a difficult task. Walking machine onboard computer needs to process data from sensors in real time. The article demonstrates design and algorithms used to control the motion of an experimental walking machine.

**Materials and Methods.** To simulate the motion of a walking machine and experimental studies, a stand replicating all the electronic systems of the machine was made. The order of rearrangement of the supports during the motion and the trajectory of the support movement are shown. The design of sensors and their principle of operation are considered. The simulation bench with a description of its electronic components is demonstrated.

**Results.** The optimal parameters of the support motion are determined. A cyclic algorithm for specifying the motion of a support along a trajectory consisting of rectilinear segments is described. The problem of synchronization of motion of a set of supports using multithreaded asynchronous programming adapted for multidimensional processors has been solved. The process of lowering the support to the surface and the response of the cyclic algorithm to changes in the shock and load sensor readings are simulated.

**Discussion and Conclusion.** An algorithm for propulsion with reaction to changes in sensor readings has been developed. The conducted research allowed us to obtain an optimal algorithmic model of motion, to which it is easy to add new reactions of the automatic motion control system based on sensor readings.

**Keywords:** walking machine, walking machine sensors, motion control algorithms, support trajectory, walking machine electronics, microcontrollers, sensors

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

**For citation:** Aleynikov Yu.G., Didmanidze O.N. Modeling Movement of Supports of Walking Machines with Dynamic Stability by Using a Stand. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(1):080-096. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.080-096>

## Введение

Шагающие машины способны двигаться по местности, недоступной для других типов транспортных средств, так как им не требуется ровная опорная поверхность [1]. Шагающая машина – это платформа, используемая для передвижения четырех и более опор. При движении по неровной поверхности в сложных условиях шагающие машины могут быть более эффективными в сравнении с колесными и гу-

сеничными транспортными средствами. Кроме того, шагающие машины, благодаря маневренности их опор, способны передвигаться по крутым склонам. Такие машины применяются для выращивания растений в условиях открытого и закрытого грунта. В этой области робот имеет преимущество перед колесными и гусеничными роботами, поскольку контактирует с землей в отдельно взятых точках и наносит меньше вреда растениям по сравнению



с колесными машинами. Динамически устойчивым машинам требуется энергия для удержания собственного веса. А статически устойчивые могут удерживать вес при отключенном электропитании.

Походка – это скоординированная последовательность передвижения опор шагающей машины для перемещения корпуса в желаемом направлении или ориентации. Способ передвижения опор является главной сложностью при создании алгоритмов движения шагающих машин. Важно синхронное передвижение всех опор машины. Для этого применяется циклическая последовательность движений. Одной из трудностей циклической походки является синхронизация движений множества отдельных приводов. Динамическая нагрузка на приводы влияет на скорость вращения выходного вала, поэтому опоры в реальных условиях двигаются с разными скоростями. Заданные алгоритмом движения могут отличаться от реальных, что приводит к непредсказуемому поведению машины.

Одной из важных составляющих разработки походки машины является ее тестирование в реальных условиях. Виртуальное моделирование не может полностью имитировать реальную среду, в которой будет работать робот.

Шагающие машины обычно имеют от 4 до 8 подвижных опор. Это дает возможность перемещаться по сложному рельефу. В последнее время растет интерес к шагающим машинам, использующим принцип передвижения насекомых. Основная цель создания машины этого типа – платформа для транспортировки измерительных инструментов и орудий труда для выращивания растений к месту их использования. Инструменты и приборы могут быть закреплены на корпусе машины и питаться как от собст-

венного, так и от бортового источника питания.

Использование роботов становится все более распространенным явлением. Роботы могут применяться для выполнения повторяемых задач, увеличения производительности и др. Колесный транспорт более быстрый, по сравнению с шагающими и гусеничными машинами, но не подходит для передвижения по сложной поверхности. Гусеничные машины медленнее колесных, но больше пригодны для пересеченной местности. Шагающие машины самые медленные и сложные в управлении, но устойчивы на пересеченной местности.

Создание программного обеспечения, позволяющего шагающей машине самостоятельно передвигаться, является сложной задачей. Для движения машины необходимо обрабатывать данные с множества сенсоров. Для исследования движения опытной машины с датчиков собираются более 150 параметров: ориентация корпуса и опор, потребляемые приводами токи, скорости вращения приводов, нагрузки на опоры, контроль температуры приводов и пр. В статье показана опытная шагающая машина и ее устройство. Рассмотрен гибкий алгоритм управления движением опор, позволяющий анализировать данные, поступающие с сенсоров во время работы. Целью статьи является расширение и углубление практических знаний в области проектирования шагающих машин и алгоритмов управления движением.

### **Обзор литературы**

Механика, конструкция, динамика движения шагающих машин изучены достаточно хорошо [1]. Ученые, инженеры и энтузиасты много лет создают математические модели для управления движением частей шагающих машин и манипуляторов и разрабатывают способы их оптимизации [2–4]. Моделируется дина-

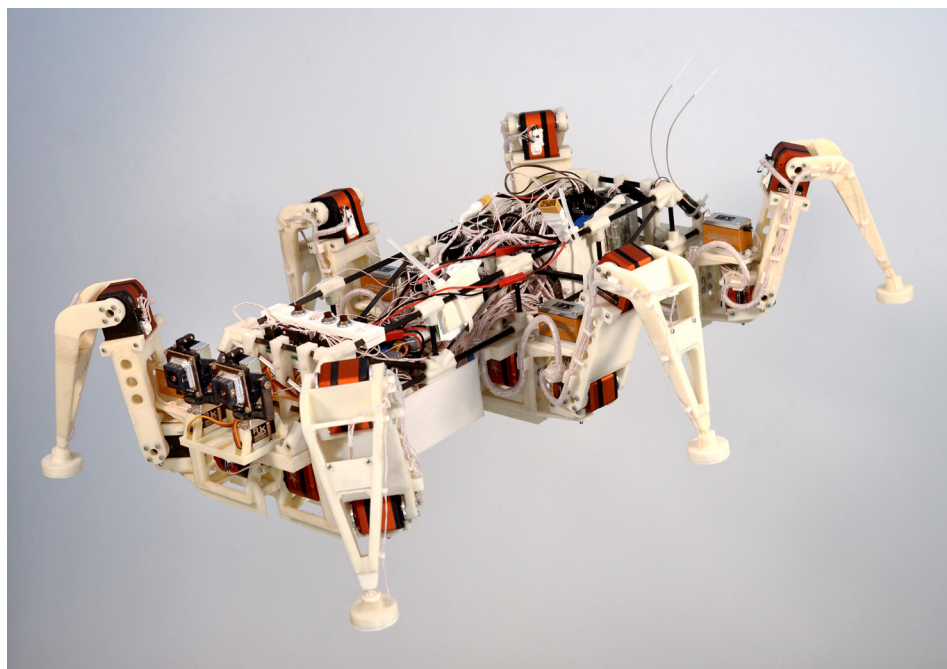


мика движения и распределение нагрузки на подвижные опоры машин [5–7]. Ведутся исследования в области применения шагающих машин для выращивания растений и автономных машин для сельского хозяйства [8–11]. Шагающие машины находят место в повседневной деятельности человека [12; 13]. Всемирно известная компания Boston Dynamics создает различные типы шагающих машин [14; 15]. Исследователи сталкиваются с проблемами механики, электроники, вопросами сенсоров [16; 17], а также со сложностью алгоритмов управления движением [18–20]. В настоящее время и в нашей стране ведутся научные исследования шагающих машин [21–23]. Они создаются в ФГБОУ ВО «ВолГТУ» [24]. Прорабатываются вопросы взаимодействия человека с машиной [25]. Создаются модели движения шагающих машин на основе движений насекомых [26; 27].

Шагающие машины на протяжении многих десятилетий не теряют свою актуальность, а современные технологии позволяют создавать новые конструкции машин с цифровым управлением. В приведенной литературе достаточно подробно описаны конструкции и их механические свойства, при этом архитектурным решениям в программном обеспечении не уделено достаточно внимания. Задачей исследования является демонстрация конструкторских решений и алгоритмов, применяемых для управления движением опытной шагающей машины.

### Материалы и методы

Движение шагающей машины по сложной неровной поверхности является комплексной задачей для бортовой вычислительной системы. В данной статье рассматриваются способы движения для опытной машины с шестью подвижными опорами (рис. 1).



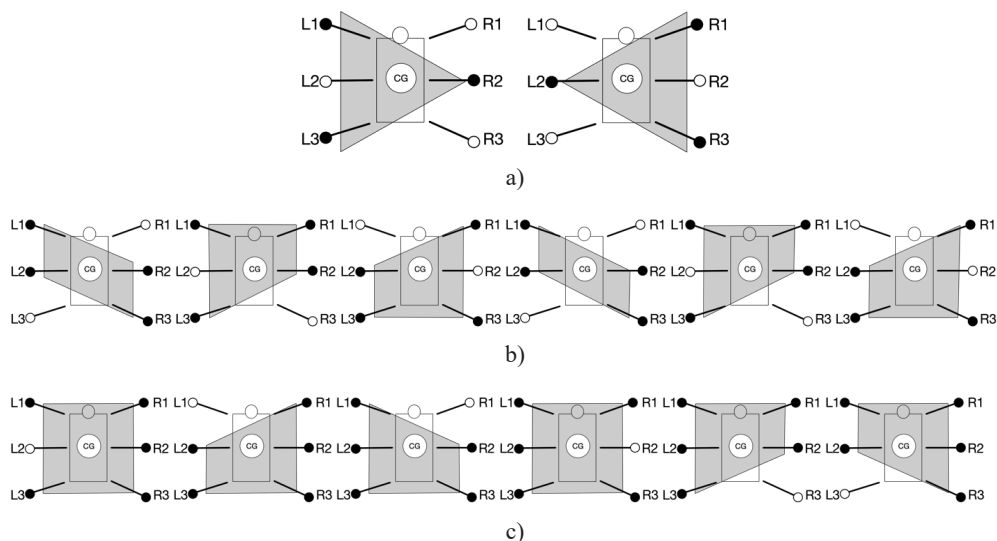
Р и с. 1. Опытная шагающая машина

F i g. 1. Experimental walking machine

Походка описывается как периодическая последовательность движений с заданным интервалом времени для всех опор машины. Диаграмма цикла перемещения опор показана на рисунке 2. Одной из сложностей циклических походок является синхронизация движения приводов. Динамические нагрузки влияют на неравномерность вращения приводов, поэтому может возникнуть ситуация во время движения, когда одна опора обгоняет другую. Заданное алгоритмом движение опор может отличаться от фактического, что приводит к непредсказуемому движению машины и ее опрокидыванию. Для предотвращения данной ситуации необходимо отслеживать разницу между заданным угловым положением привода и реальным.

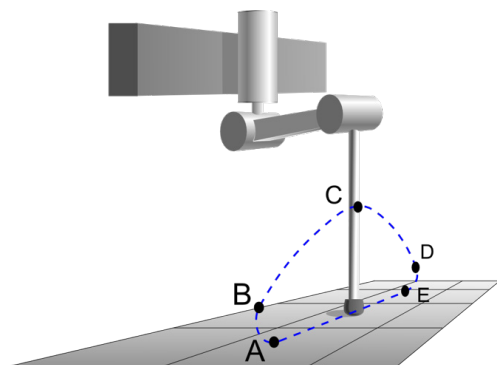
Каждая опора двигается по траектории, показанной на рисунке 3. Обычно траекторию делят на два участка:  $EA$  – участок, на котором опора удерживает вес машины;  $ABCDE$  – участок переноса опоры в новую позицию. Для

плавного движения необходимо применять ряд мер для снижения колебаний корпуса и энергозатрат на возвратно-поступательное движение опор. Для этого траектория разбивается на большее число участков. Это позволяет задавать скорость движения для каждого из них. Для моделирования походки траектория движения разбивается на четыре участка:  $AB$ ,  $BD$ ,  $DE$  и  $EA$ . На динамику движения шагающей машины существенное влияние оказывают свойства грунта, которые чрезвычайно разнообразны. Грунт может быть твердым, рыхлым, сыпучим, вязким. Для плавного движения на любых типах грунта значение вертикальной скорости оконечности опоры в момент соприкосновения с поверхностью (участок кривой  $DE$ ) должно быть минимальным. Также необходимо учитывать деформацию грунта под опорой. Для этого важно точно предсказывать и определять момент времени, когда опора коснется грунта и будет способна нести вес машины (точка  $E$ ), а так-



Р и с. 2. Походки: а) трехопорная походка; б) парная походка; в) круговая походка  
F i g. 2. Walking gaits: a) tripod gait; b) tetrapod gait; c) circular gait

же корректировать положение опоры при проседании грунта под опорой.



Р и с. 3. Траектория движения опоры

F i g. 3. Leg movement trajectory

Для моделирования движения шагающей машины и экспериментальных исследований был изготовлен стенд, повторяющий все электронные системы машины. Стенд позволяет проводить моделирование движения опоры, проверять конструкционные решения и отлаживать программное обеспечение (рис. 4).

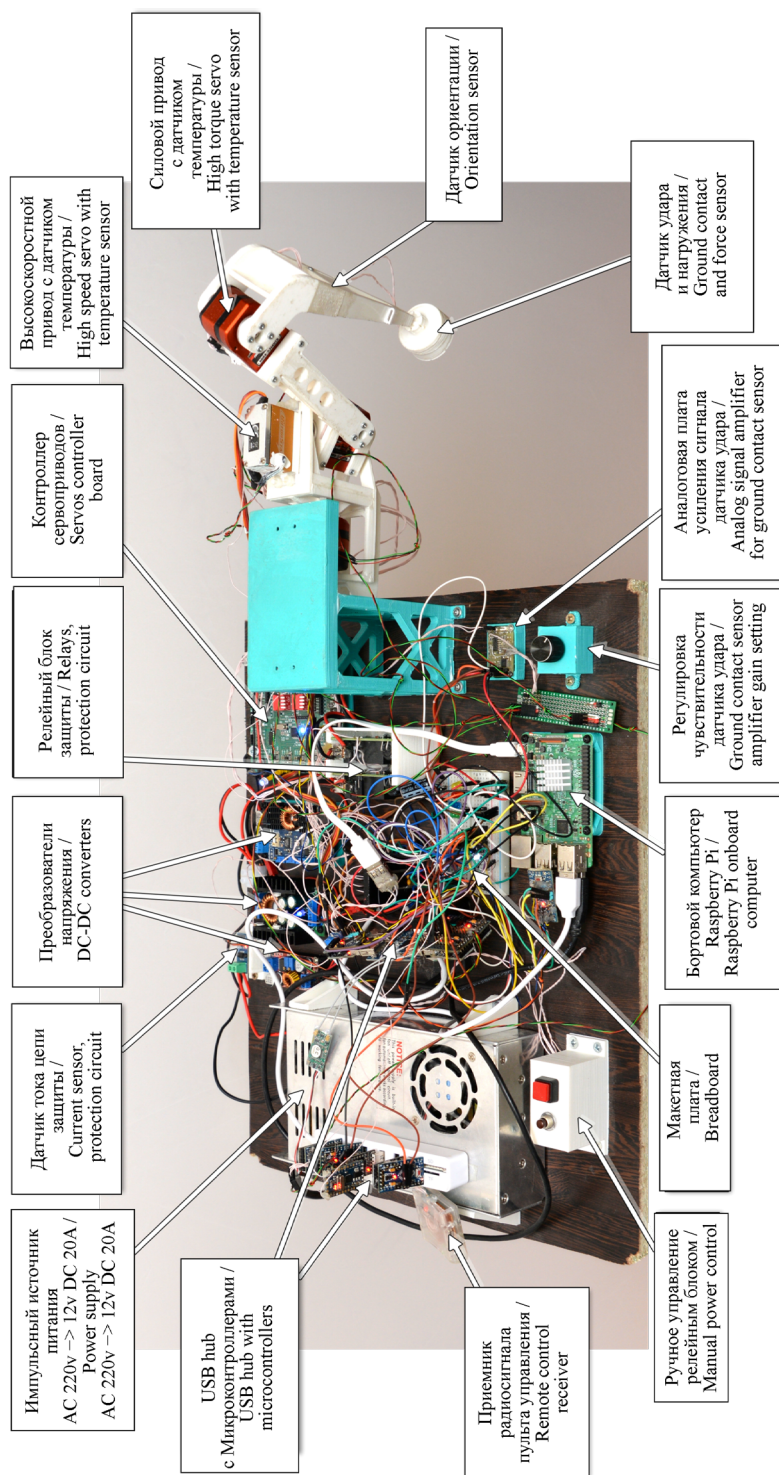
На стенде установлен мини-компьютер Raspberry Pi, импульсный источник питания, преобразователи напряжения, цепи силовой защиты, USB hub для подключения микроконтроллеров, отвечающих за первичную обработку данных с датчиков с последующей передачей в цифровом виде на бортовой компьютер. Датчик тока и напряжения в цепях силовой защиты от замыкания и перенапряжения и высокотокковое реле обеспечивают защиту от перегрузки и короткого замыкания электрической цепи. Одной из важных составляющих стенда является контроллер сервомеханизмов. Контроллер включает в себя датчики тока и аналоговые датчики положения выходного вала привода. На плате установлены переключатели для преобразования входных аналоговых сигналов, что дает возможность при-

менять широкий спектр моделей сервомеханизмов с различными значениями сигналов обратной связи по напряжению (рис. 5).

Опора помимо датчиков тока и положения выходного вала каждого привода имеет датчик ориентации в пространстве (акселерометр с гироскопом) и датчик удара и нагружения опоры с регулируемой чувствительностью. Каждый привод имеет датчик температуры для предотвращения его перегрева. На стенде присутствует система синхронизации контроллеров, контроллер приема сигналов с радиопульта управления оператора. Стенд полностью моделирует электронную систему шагающей машины, силовые цепи и бортовую вычислительную систему.

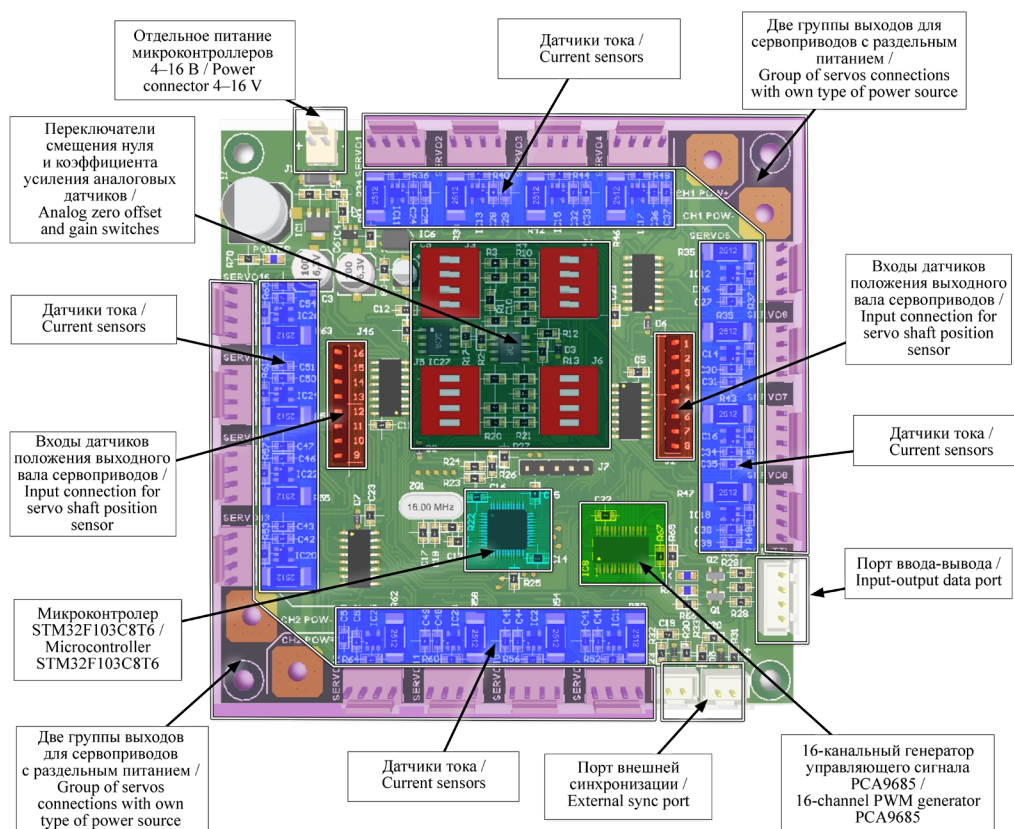
Программное обеспечение спроектировано с применением асинхронных очередей. Каждая очередь команд может выполняться в отдельном потоке. Многопоточный прием данных от множества микроконтроллеров не синхронизирован по времени, маленькие пакеты с данными от микроконтроллеров могут приходить чаще, большие – чуть позже, некоторые могут теряться, или они могут обгонять друг друга. Для решения задачи синхронизации по времени всех датчиков применена аппаратная синхронизация. Все микроконтроллеры подключены к генератору частоты 1 кГц. Микроконтроллеры имеют счетчик синхроимпульсов и функцию синхронного сброса этого счетчика. Показания счетчика содержатся в каждом пакете, переданном на бортовой компьютер. Благодаря этому мы точно знаем момент времени измерения того или иного параметра датчиком.

Каждая опора шагающей машины оснащена датчиком удара и нагружения (рис. 6). Комплекс датчиков позволяет определять касание опорой поверхности и развиваемое при этом усилие.



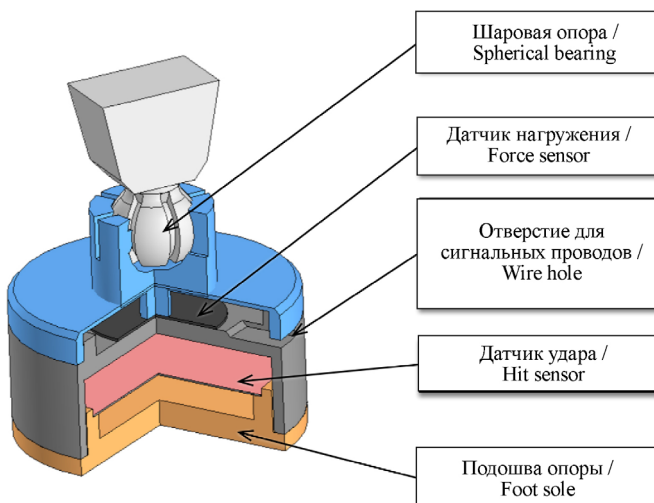
Р и с. 4. Стенд шагающей машины  
Fig. 4. Walking machine stand





Р и с. 5. Контроллер сервоприводов

F i g. 5. Servo controller



Р и с. 6. Конструкция датчиков на подвижной опоре

F i g. 6. Leg sensors design

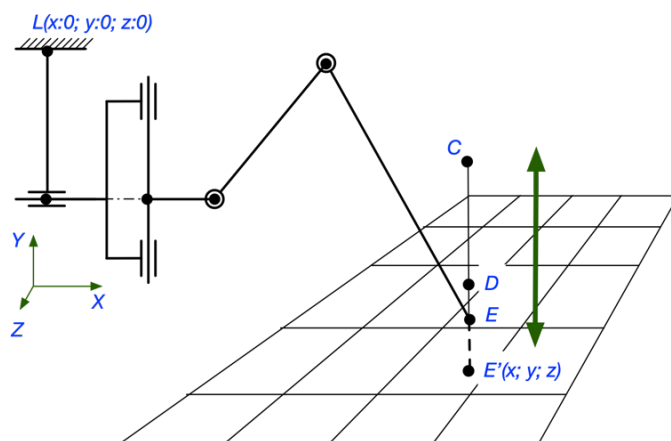
## Результаты исследования

Каждому отрезку траектории движения кончика опоры задаются интервал времени движения и координата конечной точки. Для движения опоры создается очередь команд, в которую добавляются координаты точек. Опора перемещается по прямой к заданной точке по кратчайшему пути. Во время движения могут проверяться показания датчиков и по их показаниям могут вноситься корректировки движения. Проверки значений производятся при помощи программных функций триггеров. Функция триггера содержит в себе условие срабатывания и вызываемую функцию при соблюдении условия.

Алгоритм вычисления координат положения кончика опоры работает циклически и запускается через заданный интервал времени. Интервал времени зависит от скорости бортового компьютера и скорости обработки команды контроллеров привода. При каждой итерации вычисляется координата кончика опоры, решается задача обратной кинематики, результатом которой являются угловые значения приводов опоры. Проверяется набор триггеров в цикле и, если они сработали, вызываются функции корректировки движения.

Перемещение опоры в пространстве происходит из текущей точки в заданную. Для этого в массив помещаются координаты движения, интервалы времени и триггеры для каждого из участков движения. Алгоритм циклически забирает из очереди по одной координате, перемещает опору и берет новую точку. В случае, если буфер точек пуст, движение прекращается.

Смоделируем опускание опоры на поверхность. Для этого на стенде изобразим движение опоры по вертикали (рис. 7). Зададим начальное положение опоры в точке  $C$  и быстрое движение опоры вниз до точки  $D$ . Затем будем опускать опору ниже по траектории  $DE$  с малой скоростью. На участке  $DE$  необходим триггер, срабатывающий на удар с поверхностью, на нарастание сигнала датчика усилия или резкое увеличение показания датчика ускорения. Для отрыва опоры от поверхности и снижения колебаний корпуса машины необходимо поднимать опору медленно по траектории  $ED$ . На данном участке траектории движения необходим триггер снятия нагрузки с опоры. Как только нагрузка уменьшится, можно ускорить движение опоры к точке  $C$ .



Р и с. 7. Моделирование опускания опоры на поверхность

F i g. 7. Simulation of support lowering to the surface



Для триггеров крайне важна временная метка в пакетах данных, полученных от сенсоров. Поскольку сенсоры могут иметь ложное срабатывание при движении на каждом из участков траектории, необходимо уменьшить интервал времени выборки данных. Данные с каждого сенсора хранятся некоторое время в памяти и представляют собой буфер значений за небольшой промежуток времени от долей до нескольких секунд. Триггер может сделать выборку данных с любого из сенсоров за заданный промежуток времени и вернуть значение срабатывания.

Поскольку скорость вращения выходного вала у приводов непостоянная и зависит от ряда причин (напряжения питания, переменной нагрузки на выходном валу и т. д.), то интервалы времени для движения шагающей машины можно определить опытным путем. Практика показала, что возможно создать математическую модель автоматической корректировки интервалов времени для оптимизации движения машины.

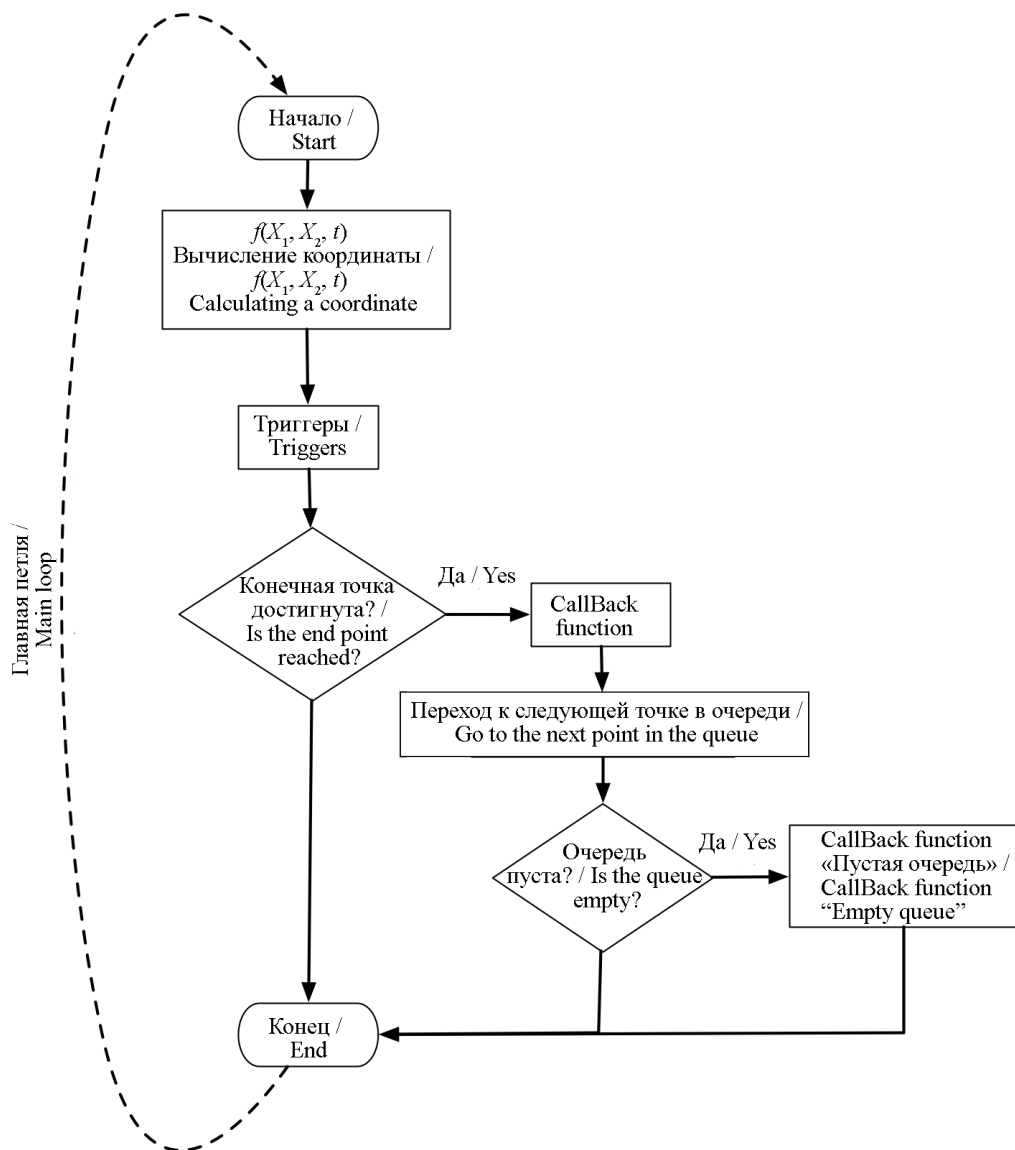
Переход моделирования движения от одноногого на стенде к многоногому требует доработок описанного выше алгоритма. Для упрощения примем, что машина движется по ровной, плоской горизонтальной поверхности прямолинейно. Ориентация корпуса задается тремя углами Эйлера. Также задается высота дорожного просвета, ширина колеи и база. Опоры имеют три типа движения: подъем-опускание опоры, движение кончика в горизонтальной плоскости и изменение координаты положения корпуса в пространстве. Траектория движения опор состоит из множества точек кончиков опор и имеют циклический вид. Для задания движения необходимо определить тип походки.

*Программное обеспечение и его архитектурные решения*

Для движения шагающей машины необходим алгоритм, вычисляющий угловое положение каждого привода машины в заданный момент времени. При этом нужно обрабатывать поступающие сигналы с датчиков и реагировать на их изменение. Для простого программирования траектории движения создан алгоритм. Для каждой опоры формируется массив-очередь с координатами точек, каждый элемент которой содержит: время передвижения до точки; координату точки в пространстве ( $x, y, z$ ); массив функций триггеров; функцию, которая вызывается в момент достижения точки кончиком опоры.

Алгоритм поочередно берет элементы очереди и обрабатывает их в цикле (рис. 8). Каждая итерация цикла вычисляет текущее время. Зная начальную точку, время движения и конечную точку, можно вычислить промежуточную точку, в которой должен находиться кончик опоры по формуле. Формула для координат  $y$  и  $z$  вычисляется аналогичным способом. Таким образом, для  $X_1 > X_2$  функция будет иметь вид:  $f(X_1, X_2, t) = X_1 - |X_1 - X_2| \cdot t$ ; а для случая, когда  $X_1 \leq X_2$ , функция будет иметь вид:  $f(X_1, X_2, t) = X_1 + |X_1 - X_2| \cdot t$ , при  $t = [0...1]$ .

Во время движения может возникнуть необходимость проверять значения датчиков. Примером такой необходимости служит участок траектории  $DE$  (рис. 3). При движении опоры на данном участке необходимо проверять значение весового датчика. Если его показания увеличились, значит опора достигла поверхности земли и способна нести вес корпуса. При срабатывании заданного условия можно вызвать какую-нибудь функцию, например зажечь лампочку, показывающую срабатывание датчика веса, добавить задержку выполнения команд или перейти к следующей точке траектории. Данное архитектурное



Р и с. 8. Циклический алгоритм движения опоры  
F i g. 8. Cyclic algorithm of the leg movement

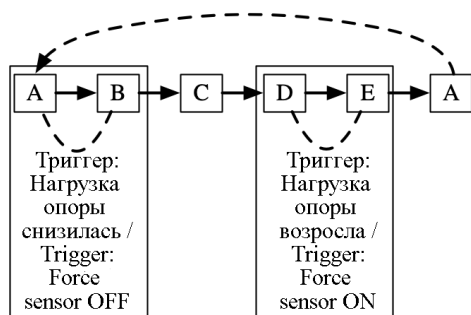
решение в построении алгоритма позволяет легко создавать стандартные цепочки координат движения машины.

Для движения одной опоры по диаграмме на рисунке 3 необходимо запрограммировать цепочку точек с координатами и набором триггеров (рис. 9). Для движения из точки *A* в точку *B* не-

обходимо определить момент времени, когда опора приподнимется над поверхностью и ее подъем можно продолжить с большей скоростью на участке *BC*. Аналогично для опускания опоры. На участке траектории *CD* опора опускается с большой скоростью, а на участке *DE* скорость опускания снижается.

*Процессы и машины агроинженерных систем*

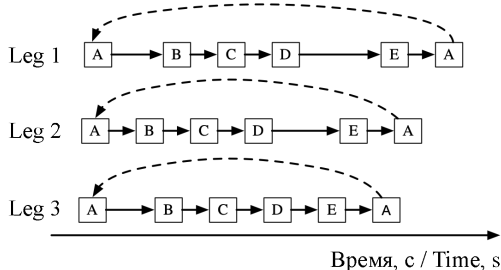
Триггер на участке *DE* срабатывает, когда датчик нагружения будет выдавать заданную нагрузку. Результатом срабатывания триггера является прекращение дальнейшего опускания опоры и переход к следующей точке движения.



Р и с. 9. Цепочка из точек для движения одной опоры

F i g. 9. Points chain for the leg movement

Для одной опоры на стенде алгоритм показал хорошие результаты. Перенос данного алгоритма на многоногую систему потребовал добавления новых функций синхронизации. Поскольку опоры движутся с разными скоростями и поверхность под машиной может быть неровной, то программный код некоторых цепочек из точек будет выполняться быстрее, что при увеличении числа циклов приведет к хаотичному движению опор и машина перестанет двигаться. Временная диаграмма цепочки вершин без синхронизации представлена на рисунке 10.



Р и с. 10. Асинхронное движение опоры

F i g. 10. Asynchronous motion of the leg

Поскольку общая продолжительность цикла может меняться, а для движения необходимо одинаковое время нескольких циклов, без синхронизации не обойтись. В алгоритм, показанный на рисунке 8, легко добавить функцию синхронизации при переходе к новой вершине или в триггер, который может изменять скорость движения в режиме реального времени.

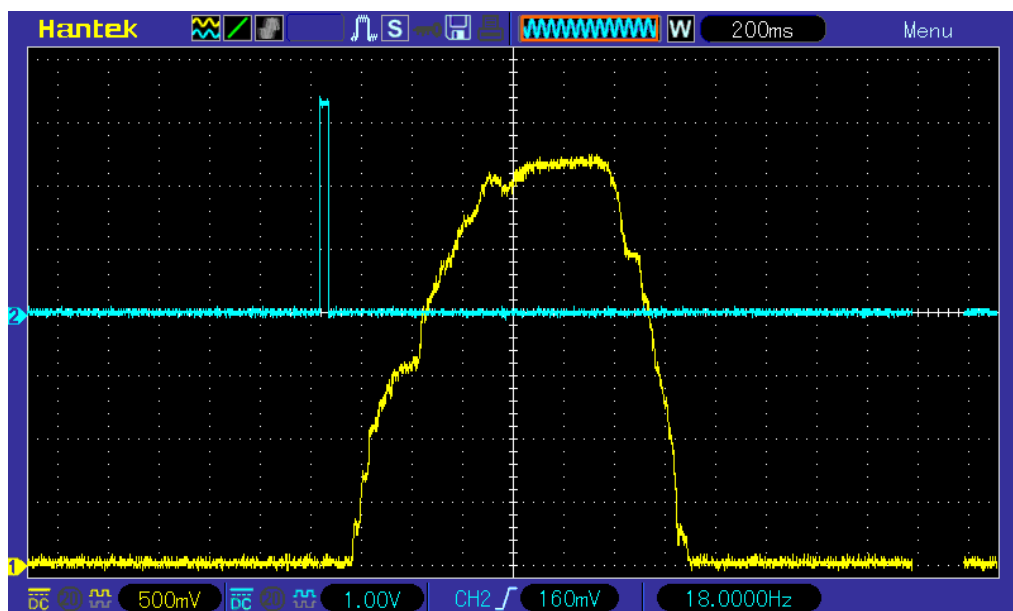
В процессе исследования были определены оптимальные временные интервалы и скорости движения опоры на каждом из участков кривой, показанной на рисунке 3. Смоделировано движение на участке касания опорой поверхности *DE*. По алгоритму, показанному на рисунке 8, для замедления движения, остановки опускания опоры использовались программные триггеры.

В ходе моделирования на стенде опора двигалась со скоростью 20 мм/с, в момент срабатывания датчика удара скорость движения снижалась до 5 мм/с. После остановки опускания опоры и задержки в 0,4 с опора поднималась со скоростью 5 мм/с. На участке подъема *AB* (рис. 3) также использовался триггер, срабатывающий на снижение значения датчика нагружения, что ускоряло движение подъема опоры до скорости 20 мм/с. Была получена осциллограмма срабатывания датчиков касания (рис. 11).

Практические эксперименты показали гибкость предложенного на рисунках 8 и 9 алгоритма программирования движения опоры. Он может быть применен для множества манипуляторов или машин с числовым управлением.

### Обсуждение и заключение

В ходе исследования был изготовлен стенд, моделирующий движение опоры шагающей машины с динамической устойчивостью. Разработан алгоритм движения опоры с реакцией на изменение показаний датчиков. Проведенные исследования позволили полу-



Р и с. 11. Осциллограмма сигналов с датчика удара и датчика нагружения опоры: голубой импульс – датчик удара; желтый импульс – датчик нагружения

F i g. 11. Oscillogram of signals from the shock and the load cell sensor: blue pulse – shock sensor; yellow pulse – load sensor

чить оптимальную алгоритмическую модель движения, к которой легко добавлять новые реакции автоматической системы управления движением, основанные на показаниях датчиков. Созданная модель позволяет определить оптимальные временные интервалы для каждого участка кривой

траектории движения опоры. Дальнейшая работа в направлении расширения функционала модели позволит создать комплексную автоматическую систему управления движением шагающей машины, основанную на реагировании на изменения показаний сенсорной системы.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Optimal Force Distribution for the Legs of an Hexapod Robot / C. Mahfoudi, K. Djouani, S. Rechak, M. Bouaziz. – DOI [10.1109/CCA.2003.1223515](https://doi.org/10.1109/CCA.2003.1223515) // Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications, 23–25 June 2003, Instambul. – Instambul : IEEE, 2003. – Pp. 657–663. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1223515/metrics#metrics> (дата обращения: 02.02.2021).
2. **Hayward, V.** Robot Manipulator Control under Unix RCCL: A Robot Control “C” Library / V. Hayward, R. P. Paul. – DOI [10.1177/027836498600500407](https://doi.org/10.1177/027836498600500407) // The International Journal of Robotics Research. – 1986. – Vol. 5, Issue 4. – Pp. 94–111. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/027836498600500407> (дата обращения: 02.02.2021).
3. **Paul, R. P.** Kinematics of Robot Wrists / R. P. Paul, C. N. Stevenson. – DOI [10.1177/027836498300200103](https://doi.org/10.1177/027836498300200103) // The International Journal of Robotics Research. – 1983. – Vol. 2, Issue 1. – Pp. 31–38. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/027836498300200103> (дата обращения: 02.02.2021).
4. **Pfeiffer, F.** Six-Legged Technical Walking Considering Biological Principles / F. Pfeiffer, J. Eltze, H.-J. Weidemann. – DOI [10.1016/0921-8890\(94\)00031-V](https://doi.org/10.1016/0921-8890(94)00031-V) // Robotics and Autonomous Systems. –



1995. – Vol. 14, Issue 1–2. – Pp. 223–232. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092188909400031V?via%3Dihub> (дата обращения: 02.02.2021).

5. **Roennau, A.** Design and Kinematics of a Biologically-Inspired Leg for a Six-Legged Walking Machine / A. Roennau, T. Kerscher, R. Dillmann. – DOI [10.1109/BIOROB.2010.5626328](https://doi.org/10.1109/BIOROB.2010.5626328) // Proceedings of 3<sup>rd</sup> IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob), 26–29 September 2010, Tokyo. – Tokyo : IEEE, 2010. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5626328> (дата обращения: 02.02.2021).

6. Optimal Force Distribution for the Legs of a Quadruped Robot / X. Chen, K. Watanabe, K. Kiguchi, K. Izumi // Machine Intelligence & Robotic Control. – 1999. – Vol. 1, Issue 2. – Pp. 87–94. – URL: <http://www.cyber-s.ne.jp/Top/Volume/1-2/0009tc.pdf> (дата обращения: 02.02.2021).

7. **Nahon, M. A.** Optimization of Dynamic Forces in Mechanical Hands / M. A. Nahon, J. Angeles. – DOI [10.1115/1.2912765](https://doi.org/10.1115/1.2912765) // Journal of Mechanical Design. – 1999. – Vol. 113, Issue 2. – Pp. 167–173. – URL: <https://asmedigitalcollection.asme.org/mechanicaldesign/article-abstract/113/2/167/417367/Optimization-of-Dynamic-Forces-in-Mechanical-Hands?redirectedFrom=fulltext> (дата обращения: 02.02.2021).

8. **Gardner, J. F.** Force Distribution in Walking Machines Over Rough Terrain / J. F. Gardner. – DOI [10.1115/1.2896488](https://doi.org/10.1115/1.2896488) // Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. – 1991. – Vol. 113, Issue 4. – Pp. 754–758. – URL: <https://asmedigitalcollection.asme.org/dynamicsystems/article-abstract/113/4/754/417104/Force-Distribution-in-Walking-Machines-Over-Rough?redirectedFrom=fulltext> (дата обращения: 02.02.2021).

9. **Tedeschi, F.** Design Issues for Hexapod Walking Robots / F. Tedeschi, G. Carbone. – DOI [10.3390/robotics3020181](https://doi.org/10.3390/robotics3020181) // Robotics. – 2014. – Vol. 3, Issue 2. – Pp. 181–206. – URL: <https://www.mdpi.com/2218-6581/3/2/181> (дата обращения: 02.02.2021).

10. Robots in Agriculture: State of Art and Practical Experiences / J. J. Roldán, J. Cerro, D. Garzón-Ramos [et al.]. – DOI [10.5772/intechopen.69874](https://doi.org/10.5772/intechopen.69874) // Service Robots ; A. Neves, ed. – IntechOpen, 2018. – URL: <https://www.intechopen.com/books/service-robots/robots-in-agriculture-state-of-art-and-practical-experiences> (дата обращения: 02.02.2021).

11. **Kang, D.** The Walking Control of a Hexapod Robot for Collecting Field Information / D. Kang, M. Iida, M. Umeda. – DOI [10.11357/jsam.71.1\\_63](https://doi.org/10.11357/jsam.71.1_63) // Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery. – 2009. – Vol. 71, Issue 1. – Pp. 163–171. – URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsam/71/1/71\\_1\\_1\\_63/\\_article-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsam/71/1/71_1_1_63/_article-char/ja/) (дата обращения: 02.02.2021).

12. Design and Implementation of Bio Inspired Hexapod for Exploration Applications / T. Deepa, S. Angalaeswari, D. Subbulekshmi [et al.]. – DOI [10.1016/j.matpr.2020.07.165](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.165) // Materials Today: Proceedings. – 2020. – 5 p. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320352585?via%3Dihub> (дата обращения: 02.02.2021).

13. **Nemoto, T.** Energy-Based Control for a Biologically Inspired Hexapod Robot with Rolling Locomotion / T. Nemoto, R. E. Mohan, M. Iwase. – DOI [10.1016/j.dcan.2015.04.001](https://doi.org/10.1016/j.dcan.2015.04.001) // Digital Communications and Networks. – 2015. – Vol. 1, Issue 2. – Pp. 125–133. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352864815000139?via%3Dihub> (дата обращения: 02.02.2021).

14. **Carbone, G.** Legged Robotic Systems / G. Carbone, M. Ceccarelli. – DOI [10.5772/4669](https://doi.org/10.5772/4669) // Cutting Edge Robotics ; V. Kordic, ed. – IntechOpen, 2005. – 26 p. – URL: [https://www.intechopen.com/books/cutting\\_edge\\_robotics/legged\\_robotic\\_systems](https://www.intechopen.com/books/cutting_edge_robotics/legged_robotic_systems) (дата обращения: 02.02.2021).

15. BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot / M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, R. Playter. – DOI [10.3182/20080706-5-KR-1001.01833](https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.01833) // IFAC Proceedings Volumes. – 2008. – Vol. 41, Issue 2. – Pp. 10822–10825. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016407020?via%3Dihub> (дата обращения: 02.02.2021).

16. **Sparrow, R.** Kicking a Robot Dog / R. Sparrow. – DOI [10.1109/HRI.2016.7451756](https://doi.org/10.1109/HRI.2016.7451756) // Proceedings of 11<sup>th</sup> ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI), 2016. – Christchurch : IEEE, 2016. – Pp. 229. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7451756/authors#authors> (дата обращения: 02.02.2021).

17. **Manoiu-Olaru, S.** Hexapod Robot. Mathematical Support for Modeling and Control / S. Manoiu-Olaru, M. Nitulescu, S. Viorel // Proceedings of 15<sup>th</sup> International Conference on System Theory, Control and Computing, 1–6 Oct 2011. – Sinaia : IEEE, 2011. – 6 p. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6085694/authors#authors> (дата обращения: 02.02.2021).

18. **Fuček, L.** Analytically Founded Yaw Control Algorithm for Walking on Uneven Terrain Applied to a Hexapod Robot / L. Fuček, Z. Kovačić, S. Bogdan. – DOI [10.1177/1729881419857997](https://doi.org/10.1177/1729881419857997) //



International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2019. – 17 p. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1729881419857997> (дата обращения: 02.02.2021).

19. Design and Underwater Tests of Subsea Walking Hexapod MAK-1 / V. V. Chernyshev, V. V. Arykantsev, A. E. Gavrilov [et al.]. – DOI 10.1115/OMAE2016-54440 // Proceedings of ASME 35<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 19–24 June 2016. – Busan : ASME, 2016. – Pp. 9. – URL: <https://asmedigitalcollection.asme.org/OMAE/proceedings-abstract/OMAE2016/49989/V007T06A023/281002> (дата обращения: 02.02.2021).

20. Петров, Н. В. Разработка учебного шагающего мобильного робота / Н. В. Петров // Политехнический молодежный журнал. – 2019. – № 9 (38). – 13 с. – URL: <http://ptsj.ru/articles/520/520.pdf> (дата обращения: 02.02.2021). – Рез. англ.

21. Gait Control by Genetic Algorithm for Agricultural Hexapod Walking Robot / M. Dohi, T. Fujiura, N. Ishizuka, K. Nonami. – DOI 10.1016/S1474-6670(17)36757-5 // IFAC Proceedings Volume. – 2000. – Vol. 33, Issue 29. – Pp. 89–93. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017367575?via%3Dihub#!> (дата обращения: 02.02.2021).

22. Алейников, Ю. Г. Цифровые технологии для роботизированных технических средств в сельскохозяйственном производстве на примере шагающей машины и робота для внесения трихограммы в теплице / Ю. Г. Алейников // Инновации в сельском хозяйстве. – 2019. – № 1 (30). – С. 283–293. – URL: <http://journal.viesh.ru/wp-content/uploads/2019/04/ИННОВСХ-30-2019.pdf> (дата обращения: 02.02.2021). – Рез. англ.

23. Алейников, Ю. Г. Надежное определение момента времени касания опорой поверхности шагающей машины / Ю. Г. Алейников, Я. Г. Митягина. – DOI 10.34286/1995-4646-2019-67-4-60-68 // Международный технико-экономический журнал. – 2019. – № 4. – С. 60–68. – URL: <http://www.tite-journal.com/content/2019/vypusk-no4/> (дата обращения: 02.02.2021). – Рез. англ.

24. Алейников, Ю. Г. Система управления движением шагающей машины / Ю. Г. Алейников, Я. Г. Митягина // Международный технико-экономический журнал. – 2018. – № 4. – С. 90–95. – URL: <http://www.tite-journal.com/content/2018/vypusk-no4/#c11567> (дата обращения: 02.02.2021). – Рез. англ.

25. Чернышев, В. В. Полевые исследования шагающих машин / В. В. Чернышев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2004. – № 4. – С. 20–22. – URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2004/200404.htm> (дата обращения: 02.02.2021).

26. Murphy, R. R. Human-Robot Interaction in Rescue Robotics / R. R. Murphy. – DOI 10.1109/TSMCC.2004.826267 // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews). – 2004. – Vol. 34, Issue 2. – Pp. 138–153. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=5326> (дата обращения: 02.02.2021).

27. Locomotion Analysis of Hexapod Robot / X. Ding, Z. Wang, A. Rovetta, J. M. Zhu. – DOI 10.5772/8822 // Climbing and Walking Robots ; B. Miripour-Fard, ed. – IntechOpen, 2010. – URL: <https://www.intechopen.com/books/climbing-and-walking-robots/locomotion-analysis-of-hexapod-robot> (дата обращения: 02.02.2021).

*Поступила 09.10.2020; одобрена после рецензирования 20.12.2020; принята к публикации 15.01.2021*

*Об авторах:*

**Алейников Юрий Георгиевич**, соискатель кафедры тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), кандидат технических наук, Researcher ID: AAS-2070-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6586-9741>, yuri@aleyrobotics.com

**Дидманидзе Отари Назирович**, заведующий кафедрой тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), академик РАН, доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2558-0585>, didmanidze@rgau-msha.ru

*Заявленный вклад соавторов:*

Ю. Г. Алейников – идея, обоснование цели и задач, проектирование и изготовление испытательного стенда, проведение лабораторных испытаний.

О. Н. Дидманидзе – научное руководство, консультации, анализ и доработка текста.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*



## REFERENCES

1. Mahfoudi C., Djouani K., Rechak S., et al. Optimal Force Distribution for the Legs of an Hexapod Robot. In: Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications, 23–25 June 2003, Instambul. Instambul: IEEE; 2003. Pp. 657–663. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/CCA.2003.1223515>
2. Hayward V., Paul R.P. Robot Manipulator Control under Unix RCCL: A Robot Control “C” Library. *The International Journal of Robotics Research*. 1986; 5(4):94–111. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/027836498600500407>
3. Paul R.P., Stevenson C.N. Kinematics of Robot Wrists. *The International Journal of Robotics Research*. 1983; 2(1):31–38. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/027836498300200103>
4. Pfeiffer F., Eltze J., Weidemann H.-J. Six-Legged Technical Walking Considering Biological Principles. *Robotics and Autonomous Systems*. 1995; 14(1–2):223–232. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0921-8890\(94\)00031-V](https://doi.org/10.1016/0921-8890(94)00031-V)
5. Roennau A., Kerscher T., Dillmann R. Design and Kinematics of a Biologically-Inspired Leg for a Six-Legged Walking Machine. In: Proceedings of 3<sup>rd</sup> IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), 26–29 September 2010, Tokyo. Tokyo: IEEE; 2010. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/BIOROB.2010.5626328>
6. Chen X., Watanabe K., Kiguchi K., et al. Optimal Force Distribution for the Legs of a Quadruped Robot. *Machine Intelligence & Robotic Control*. 1999; 1(2):87–94. Available at: <http://www.cyber-s.ne.jp/Top/Volume/1-2/0009tc.pdf> (accessed 02.02.2021). (In Eng.)
7. Nahon M.A., Angeles J. Optimization of Dynamic Forces in Mechanical Hands. *Journal of Mechanical Design*. 1999; 113(2):167–173. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2912765>
8. Gardner J.F. Force Distribution in Walking Machines over Rough Terrain. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*. 1991; 113(4):754–758. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2896488>
9. Tedeschi F., Carbone G. Design Issues for Hexapod Walking Robots. *Robotics*. 2014; 3(2):181–206. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/robotics3020181>
10. Roldán J.J., Cerro J., Garzón-Ramos D., et al. Robots in Agriculture: State of Art and Practical Experiences. In: A. Neves, ed. Service Robots. IntechOpen; 2018. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.69874>
11. Kang D., Iida M., Umeda M. The Walking Control of a Hexapod Robot for Collecting Field Information. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*. 2009; 71(1):163–171. (In Ja.) DOI: [https://doi.org/10.11357/jsam.71.1\\_63](https://doi.org/10.11357/jsam.71.1_63)
12. Deepa T., Angalaeswari S., Subbulekshmi D., et al. Design and Implementation of Bio Inspired Hexapod for Exploration Applications. *Materials Today: Proceedings*. 2020. 5 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.165>
13. Nemoto T., Mohan R.E., Iwase M. Energy-Based Control for a Biologically Inspired Hexapod Robot with Rolling Locomotion. *Digital Communications and Networks*. 2015; 1(2):125–133. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2015.04.001>
14. Carbone G., Ceccarelli M. Legged Robotic Systems. In: V. Kordic, ed. Cutting Edge Robotics. IntechOpen; 2005. 26 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5772/4669>
15. Raibert M., Blankespoor K., Nelson G., et al. BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot. *IFAC Proceedings Volumes*. 2008; 41(2):10822–10825. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.01833>
16. Sparrow R. Kicking a Robot Dog. Proceedings of 11<sup>th</sup> ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI), 2016. Christchurch: IEEE; 2016. Pp. 229. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/HRI.2016.7451756>
17. Manoiu-Olaru S., Nitulescu M., Viorel S. Hexapod Robot. Mathematical Support for Modeling and Control. In: Proceedings of 15<sup>th</sup> International Conference on System Theory, Control and Computing, 1–6 Oct 2011. Sinaia: IEEE; 2011. 6 p. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6085694/authors#authors> (accessed 02.02.2021). (In Eng.)
18. Fuček L., Kovačić Z., Bogdan S. Analytically Founded Yaw Control Algorithm for Walking on Uneven Terrain Applied to a Hexapod Robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2019. 17 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/1729881419857997>
19. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Gavrilov A.E., et al. Design and Underwater Tests of Subsea Walking Hexapod MAK-1. In: Proceedings of ASME 35<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Off-Processes and machines of agroengineering systems

shore and Arctic Engineering, 19–24 June 2016. Busan: ASME; 2016. Pp. 9. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE2016-54440>

20. Petrov N.V. Development of a Training Walking Mobile Robot. *Politekhnikheskiy molodezhnyy zhurnal* = Polytechnic Student Journal. 2019; (9). 13 p. Available at: <http://ptsj.ru/articles/520/520.pdf> (accessed 02.02.2021). (In Russ.)

21. Dohi M., Fujiura T., Ishizuka N., et al. Gait Control by Genetic Algorithm for Agricultural Hexapod Walking Robot. *IFAC Proceedings Volume*. 2000; 33(29):89-93. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)36757-5](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)36757-5)

22. Aleynikov Y.G. Digital Technologies for Robotics in Agricultural Production for Walking Machine and a Robot for Placing Insects inside a Greenhouse. *Innovatsii v selskom khozyaystve* = Innovations in Agriculture. 2019; (1):283-293. Available at: <http://journal.viesh.ru/wp-content/uploads/2019/04/IHHOBCX-30-2019.pdf> (accessed 02.02.2021). (In Russ.)

23. Aleinikov Yu.G., Mityagina Ya.G. Reliable Determination of the Time of the Touch Time of a Supporting Surface of a Stepping Machine. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskyy zhurnal* = The International Technical-Economic Journal. 2019; (4):60-68. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2019-67-4-60-68>

24. Aleinikov Yu.G., Mityagina Ya.G. System Motion Control Walking Machine. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskyy zhurnal* = The International Technical-Economic Journal. 2018; (4):90-95. Available at: <http://www.tite-journal.com/content/2018/vypusk-no4/#c11567> (accessed 02.02.2021). (In Russ.)

25. Chernyshev V.V. [Field Studies of Walking Machines]. *Traktory i selskhozaystvennyye mashiny* = Tractors and Agricultural Machines. 2004; (4):20-22. Available at: <http://www.avtomash.ru/gur/2004/200404.htm> (accessed 02.02.2021). (In Russ.)

26. Murphy R.R. Human-Robot Interaction in Rescue Robotics. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*. 2004; 34(2):138-153. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2004.826267>

27. Ding X., Wang Z., Rovetta A., et al. Locomotion Analysis of Hexapod Robot. In: B. Miripour-Fard, ed. *Climbing and Walking Robots*. IntechOpen; 2010. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5772/8822>

*Submitted 09.10.2020; approved after reviewing 20.12.2020; accepted for publication 15.01.2021*

*About the authors:*

**Yury G. Aleynikov**, Doctoral Candidate in the Chair of Tractors and Automobiles, Russian Timiryazev State Agrarian University (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russian Federation), Cand. Sc. (Engineering), Researcher ID: AAS-2070-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6586-9741>, [yuri@aleyrobotics.com](mailto:yuri@aleyrobotics.com)

**Otari N. Didmanidze**, Head of the Chair of Tractors and Automobiles, Russian Timiryazev State Agrarian University (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russian Federation), Academician of RAS, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2558-0585>, [didmanidze@rgau-msha.ru](mailto:didmanidze@rgau-msha.ru)

*Contribution of the authors:*

Yu. G. Aleynikov – idea, justification of the goal and objectives, design and manufacturing of the test bench, conducting laboratory tests.

O. N. Didmanidze – scientific guidance, advice, analysis and revision of the text.

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



## Моделирование влияния удобрений на динамику контуров увлажнения при капельном орошении

И. А. Успенский<sup>1</sup>, И. В. Фадеев<sup>2\*</sup>, В. В. Алексеев<sup>3</sup>,  
В. П. Филиппов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева» (г. Рязань, Российская Федерация)

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Чувашский государственный педагогический университет имени И. Я. Яковлева» (г. Чебоксары, Российская Федерация)

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова» (г. Чебоксары, Российская Федерация)

\*ivan-fadeev-2012@mail.ru

**Введение.** Обзор исследований по моделированию и расчету контуров увлажнения показывает, что на данном этапе уже достаточно хорошо формализован математический аппарат, связывающий физически обоснованные параметры и гидрофизические свойства почв. Однако для повышения эффективности капельного орошения и фертигации необходимо определить влияние растворенных в поливной воде удобрений на гидрофизические свойства почв. С помощью учета этих характеристик важно определить степень воздействия удобрений на развитие формы и размеров контуров увлажнения.

**Материалы и методы.** Для исследования влияния удобрений на динамику контуров увлажнения использовался монофосфат калия, поскольку он имеет «плохую» подвижность в почве и его выгодно вносить с поливной водой. Внесение монофосфата калия оказывает влияние на плотность, вязкость, осмотическое давление, контактный угол смачивания и поверхностное натяжение поливной воды. В результате наблюдается изменение основной гидрофизической характеристики почвы и ее функции влагопроводности. Поэтому и контуры увлажнения формируются с небольшими, но все же заметными отличиями.

**Результаты исследования.** Разработано программное средство, позволяющее исследовать динамику контуров увлажнения различных типов почв механического состава с разной пористостью и с заранее известным начальным распределением влаги по глубине.

**Обсуждение и заключение.** При добавлении в воду монофосфата калия или других питательных веществ наблюдаются небольшие изменения при формировании контуров увлажнения. Полученные результаты позволяют на стадии проектирования процесса внесения удобрений с поливной водой в капельном орошении для различных вариантов концентрации рассчитать поливные нормы.

**Ключевые слова:** фертигация, контур увлажнения, функция влагопроводности, численные методы, математическая модель

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

© Успенский И. А., Фадеев И. В., Алексеев В. В., Филиппов В. П., 2021



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

*Для цитирования:* Моделирование влияния удобрений на динамику контуров увлажнения при капельном орошении / И. А. Успенский, И. В. Фадеев, В. В. Алексеев, В. П. Филиппов. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202101.097-108](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.097-108) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 1. – С. 97–108.

Original article

## Modeling the Effect of Fertilizers on the Dynamics of Moisture Contours at Drip Irrigation

I. A. Uspensky<sup>a</sup>, I. V. Fadeev<sup>b\*</sup>, V. V. Alekseev<sup>c</sup>, V. P. Philippov<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev (Ryazan, Russian Federation)

<sup>b</sup>Chuvash I. Yakovlev State Pedagogical University (Cheboksary, Russian Federation)

<sup>c</sup>Chuvash I. N. Ulyanov State University (Cheboksary, Russian Federation)

\*ivan-fadeev-2012@mail.ru

**Introduction.** A review of research on modeling and calculating moisture contours shows that at this stage there is a developed formalized mathematical apparatus connecting physically reasonable parameters and hydro-physical properties of soils. However, to improve the efficiency of drip irrigation and fertigation, it is necessary to determine the effect of fertilizers dissolved in irrigation water on hydrophysic properties of soil, and on the basis of the findings to determine the effect of fertilizers on shapes and sizes of moisture contours.

**Materials and Methods.** To investigate the effect of fertilizers on the dynamics of moisture contours, potassium monophosphate was used, because it has a “bad” mobility in soil and it is cost-efficient to be introduced into irrigation water. Potassium monophosphate effects on density, viscosity, osmotic pressure, moisture contact angle and surface tension of irrigation water. As a result, there are changes in soil water retention curve and its hydraulic conductivity function. Therefore, moisture contours are formed with small, but still significant differences.

**Results.** A software tool has been developed that allows exploring the dynamics of the moisture contours of different soil types and texture with different porosity and with a previously known moisture distribution in depth.

**Discussion and Conclusion.** When potassium monophosphate or other nutrients are added to water, small changes of the formation of moisture contours are observed. The results obtained enable us to calculate irrigation norms at the design stage of the planning process of fertilizer distribution with irrigation water during drip irrigation for different concentrations.

**Keywords:** fertigation, moisture contour, moisture conductivity function, numerical methods, mathematical model

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

**For citation:** Uspensky I.A., Fadeev I.V., Alekseev V.V., et al. Modeling the Effect of Fertilizers on the Dynamics of Moisture Contours at Drip Irrigation. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(1):97-108. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.097-108>

### Введение

Внесение удобрений с поливной водой (фертигация) получило широкое распространение в отечественном агропромышленном комплексе почти

одновременно с капельным орошением. Бурный рост популярности данного метода подачи растворенных питательных веществ в поливной воде неслучаен. Фертигация практически



всегда дает возможность одновременного решения широкого круга задач, связанных с обеспечением растений минеральными веществами. В настоящее время разработано достаточно большое число устройств (насосов, инжекторов и др.), обеспечивающих полив и питание растений. Основными известными преимуществами реализации таких устройств являются: экологичность и минимизация затрат на удобрения вследствие возможности локализовать область их внесения в соответствии с особенностями строения корневой системы; высокая степень точности контроля концентрации вносимых удобрений и времени внесения, оперативно и согласно биологическим фазам роста растений.

При высокой степени практического использования фертигации в агропромышленном комплексе остается немало задач, требующих внимания и решения: пространственная неоднородность распределения питательных веществ может приводить к их избыточной концентрации в тех областях, где в них нет острой необходимости, и, наоборот, к пониженной концентрации в областях с дефицитом питательных веществ; периодичность и объемы подачи растворенных удобрений определяют динамику концентраций элементов питания в корнеобитаемой зоне. Решение данных задач позволит оптимизировать процесс орошения в разрезе создания благоприятных условий роста и развития растений и автоматизировать его на более высоком уровне.

Целью исследования является определение влияния растворенных в поливной воде удобрений на развитие формы и размеров контуров увлажнения при капельном орошении. Для реализации задачи разработано программное средство, позволяющее исследовать динамику контуров увлажнения некоторых

видов почв при различных пористостях и с заранее известным начальным распределением влаги по глубине.

### Обзор литературы

Теоретические и прикладные вопросы капельного орошения широко освещены в научных исследованиях. Подбор поливных норм для создания благоприятного водного режима на основе обработки статистического материала показан в ряде работ [1; 2]. Рост и развитие сельскохозяйственных растений изучен в разрезе позиций точного земледелия [3–5]. Представлены различные типы посадки корнеклубнеплодов и орошения в корреляции с изменениями влажности почв, норм полива и влияния на урожайность [6]. Проблемам моделирования параметров контуров капельного увлажнения и комбинированного орошения почв посвящены исследования, в которых изучено, как начальная влажность почвы и объем поданной воды влияют на геометрические параметры контуров, показаны значения величин влажности, являющиеся наиболее благоприятными для роста культурных растений [7; 8]. Приведено решение проблемы эффективного внесения мелиорантов [9; 10].

В работе В. В. Бородычева предложена концепция, дающая возможность определения времени поливов и составления их планов [11]. Л. В. Кирейчева и соавторы изучили влияние подачи воды в течение суток на основе автоматизации контроля и корректировки подачи [12]. Эффективность мелиоративных мероприятий оценена на основе теории рисков [13].

Коэффициенты влагопроводности при влажности, близкой к полной влагоемкости (методом монолитов), определялись в другой работе, особенностью которой является учет влияния трещин на перемещение воды в почве [14]. Определены значения влажностей, при которых почвенные трещины остаются

частично открытыми даже при относительно высоком насыщении почвы водой. Для определения коэффициентов влагопроводности и фильтрации предложено использовать почвенные колонны и лизиметры [15]. Изучено влияние ряда почвенных и водных свойств на формирование контуров при капельном орошении [16]. На основе законов физики и математической статистики получены различного рода модели для определения геометрических характеристик контуров. Описаны почвенные характеристики, учет которых обязателен при изучении и прогнозировании формирования контуров увлажнения. Ими оказались такие общеизвестные величины, как сорптивность, наименьшая влагоемкость и механический состав почв.

Резюмируя краткий обзор исследований по обозначенной тематике, можно отметить, что на данном этапе изыскания уже содержат хорошо формализованный математический аппарат, связывающий физически обоснованные параметры и гидрофизические свойства почв. Однако анализ также показал, что для повышения эффективности капельного орошения и фертигации необходимо определить влияние растворенных в поливной воде удобрений на гидрофизические свойства почв, а также на развитие формы и размеров контуров увлажнения.

### **Материалы и методы**

Для исследования влияния удобрений на динамику контуров увлажнения при капельном орошении использовался монофосфат калия (данное удобрение широко распространено и известно большинству сельхозтоваропроизводителей). Он часто используется для подкормки растений, поскольку позволяет за небольшой промежуток времени улучшить качество грунта. Основными составляющими данного удобрения являются фосфор (от 25 до 50 %) и калий (от 25 до 35 %). Поскольку именно эти

элементы питания имеют «плохую» подвижность в почве, их выгодно вносить с поливной водой.

Монофосфат калия хорошо растворим в воде. Вносить его необходимо только в хорошо увлажненную почву после обильного полива. Дозировка для культур различна, но в среднем варьируется от 5 до 30 г на 10 л воды. Внесение монофосфата калия оказывает влияние на некоторые свойства воды. На проценты и доли процента повышается плотность, вязкость, осмотическое давление, контактный угол смачивания. На десятки процентов снижается коэффициент поверхностного натяжения. Перечисленные величины легко и быстро измеримы классическими физическими методами. Для определения изменения контактного угла смачивания разработана методика и программное средство, автоматизирующее процесс вычислений [17; 18]. Результатом совокупного изменения перечисленных величин является изменение основной гидрофизической характеристики почвы (ОГХ) и функции влагопроводности. Функция влагопроводности в данной работе рассматривается как зависимость коэффициента влагопроводности от потенциала почвенной влаги и как зависимость коэффициента влагопроводности от почвенной влажности. Естественно, что при изменении этих характеристик меняется объем влаги, перетекающей от одной рассматриваемой точки к другой, поэтому и контуры увлажнения формируются с небольшими, но все же заметными отличиями. Для построения ОГХ и функции влагопроводности используются формулы (1) и (2), полученные в другой работе [19]. Функция влагопроводности показывает, каким образом под действием градиента давления будет перемещаться влага по почве. Величина давления почвенной влаги

(или эквивалентного ему потенциала), в зависимости от влагосодержания и, соответственно, возникающих в почве градиентов, определяется ОГХ. Поэтому для целей мелиорации интерес представляет именно совместное использование ОГХ и функции влагопроводности.

Формула для ОГХ, зависимость потенциала влаги  $\psi$  от объемной влажности  $w$ , может быть записана в виде [19]:

$$\psi = \psi' + \psi'' = \frac{A\Omega_0^3}{\rho w^3} + \frac{\Omega_0 \sigma_{lg}}{\rho} \cdot D(w, P_0), \quad (1)$$

где  $\Omega_0$  – объемная удельная поверхность;  $w$  – объемная влажность;  $\sigma_{lg}$  – коэффициент поверхностного натяжения (вода – воздух);  $\rho$  – плотность воды;  $A$  – постоянная;  $D(w, P_0)$  – функция, учитывающая гранулометрический состав.

Коэффициент влагопроводности отличается от коэффициента фильтрации тем, что позволяет описывать передвижение влаги в неполностью насыщенных водой почвах. Для него можно записать формулу [19; 20]:

$$K = K_f(\Omega_0, \eta, P_0) \cdot \frac{\lambda P_0^+}{1 - P_0} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{w}{P_0} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где  $K_f(\Omega_0, \eta, P_0)$  – коэффициент фильтрации;  $\eta$  – вязкость воды;  $\lambda$ ,  $\alpha$  – коэффициенты.

В случае добавления монофосфата калия в формуле (1) появляется дополнительное слагаемое  $\psi'''$ , определяющее по закону Вант-Гоффа осмотическое давление:

$$p = CRT, \quad (3)$$

или эквивалентный ему потенциал:

$$\psi''' = CRT / \rho, \quad (4)$$

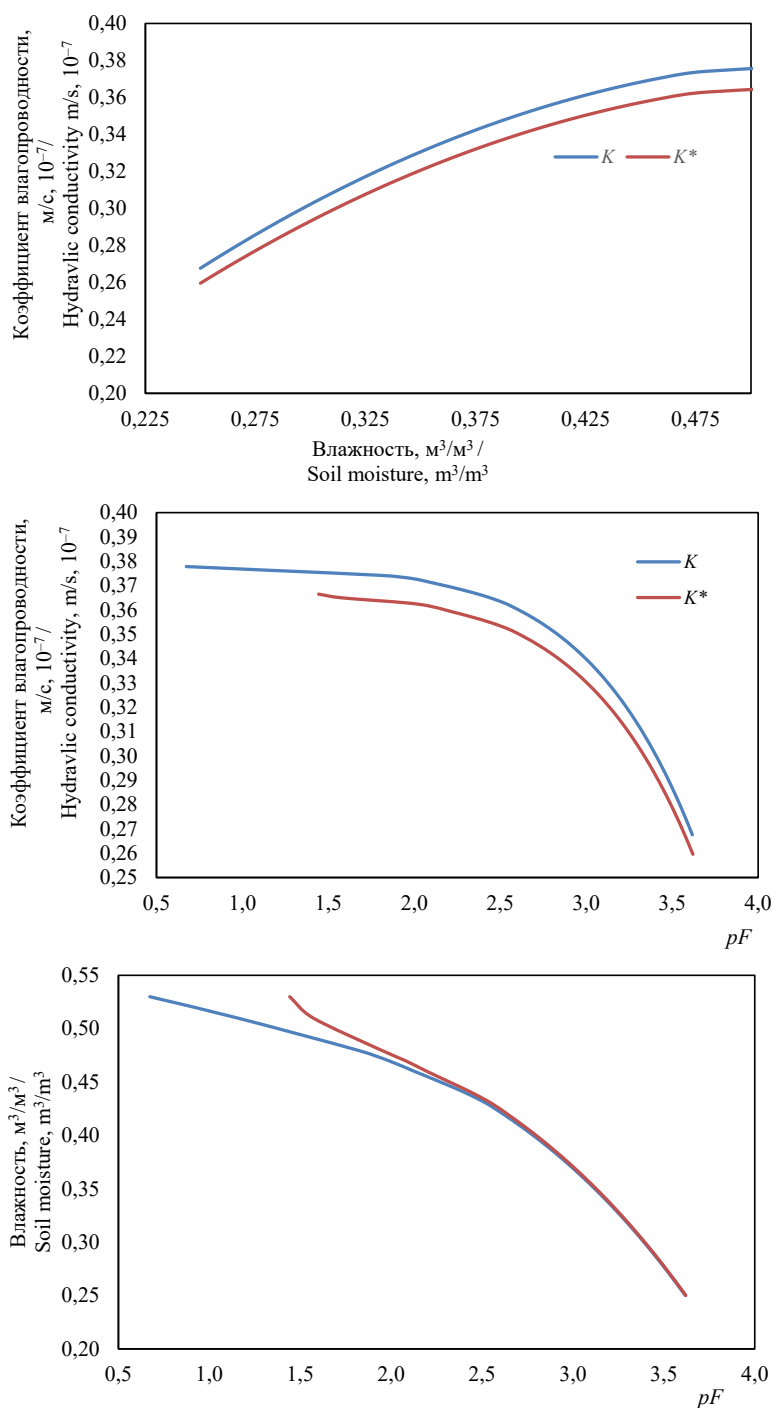
где  $C$  – концентрация (молярная);  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура;  $\rho$  – плотность воды.

В работе будем придерживаться общепринятых обозначений для потенциала почвенной влаги. Исторически сложилось так, что потенциал почвенной влаги принято выражать десятичным логарифмом давления, выраженным в сантиметрах водного столба ( $pF$ ). На верхних двух графиках рисунка 1 показано изменение функции влагопроводности светло-серой лесной почвы (от влажности и от потенциала), а на нижнем – основной гидрофизической характеристики почвы при добавлении монофосфата калия (из расчета 30 г на 10 л). На рисунке 1  $K$  соответствует чистой воде, а  $K^*$  соответствует воде с монофосфатом калия. Масштабы осей подобраны таким образом, чтобы относительно небольшие изменения функций сделать заметными.

Расчеты показывают, что при изменении значений объемной влажности от 0,44 до 0,54 (соответствует в данном случае полному заполнению пор водой) коэффициент влагопроводности в среднем изменился на 3,1 %, а потенциал почвенной влаги от 2,2 до 114,6 %. Для реализации цели исследования нами разработано программное средство, позволяющее исследовать динамику контуров увлажнения нескольких видов почв при различных пористостях и с заранее известным начальным распределением влаги по глубине.

### Результаты исследования

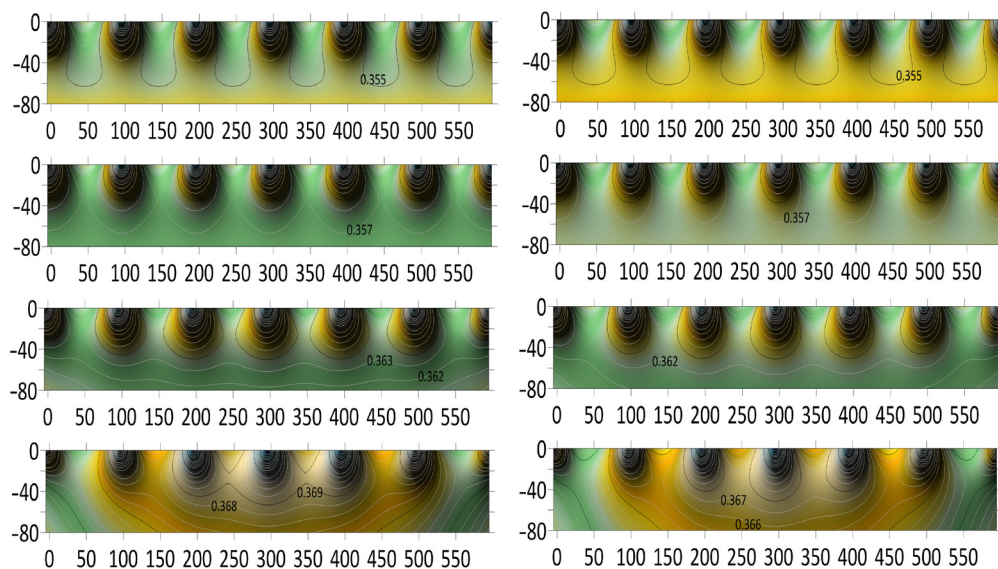
При изучении влияния монофосфата калия на динамику контуров увлажнения в данной работе имелись следующие начальные условия. Пористость почвы практически линейно уменьшалась от 0,60 на поверхности до 0,49 на глубине 0,80 м. Удельная поверхность, наоборот, с глубиной показательно возрастала от 40 до 46 м<sup>2</sup>/г. При таких параметрах серой лесной почвы наименьшей



Р и с. 1. Изменение водно-физических характеристик под влиянием монофосфата калия  
F i g. 1. Change in water-physical characteristics under the influence of potassium monophosphate

влажностности (НВ) соответствует объемная влажность 0,545, то есть значению объемной влажности 0,37 соответствует общепринятое 0,679 НВ. Расчет был сделан из условий, что на каждую точку подавалось 80 л воды с интенсивностью 4 л в час, то есть в течение 20 часов. Проведенные нами ранее исследования по изучению адекватности моделирования капельного орошения на склоновых землях чистой водой показали хороший уровень соответствия результатов моделирования экспериментальным данным [21]. В зависимости от величины уклона это соответствие, рассчитанное по величине коэффициента детерминации, составило  $R^2 = 0,60 \div 0,79$  для нулевого уклона и  $R^2 = 0,64 \div 0,78$  для уклона в  $11^\circ$ . В данном случае обработанные значения результатов экспериментов не дают возможности утверждать, что расхождения в динамике контуров увлажнения для случаев с чистой водой и водой, содержащей монофосфат калия, статистически значимы. Значи-

мость расхождения между теоретическими и экспериментальными данными определялась с помощью критерия Пирсона  $\chi^2$ . Гипотеза о том, что существует разница между контурами увлажнения чистой водой и водой, содержащей монофосфат калия, статистически не подтверждается (частоты хорошо согласуются, и вероятность получить значение критерия  $\chi^2$  больше критического  $\chi^2_k$  при данных условиях равна 67,4 %). Однако расхождения имеют место, и результаты моделирования это демонстрируют (см. рисунок 2: по осям линейные размеры в метрах, шаг между изолиниями 0,002 НВ). Форма контуров и их смыкание влияют на формирование корневой системы и на содержание питательных веществ, которые после высыхания концентрируются именно в областях границы контура увлажнения. На рисунке 2 можно наблюдать отличие в местах смыкания контуров для чистой воды и воды, содержащей удобрение. При наличии в поливной



Р и с. 2. Сравнение развития контуров увлажнения при капельном орошении чистой водой (слева) и водой, содержащей монофосфат калия, (справа)

Fig. 2. Comparison of the development of moisture contours during drip irrigation with clean water (left) and water containing potassium monophosphate (right)



воде монофосфата калия смыкание идет «медленнее». Это значит, что для достижения эффекта смыкания контуров потребуется большее количество поливной воды.

### Обсуждение и заключение

В зависимости от содержания влаги в почве ее физико-механические свойства и доступность влаги растениям существенно различаются. Свойства почвы описываются различными реологическими моделями. Переход от одной модели к другой при этом часто обуславливается небольшими изменениями значений влажности почвы. Эти изменения могут быть спрогнозированы осуществленным моделированием динамики контуров увлажнения, проварьированы

и учтены при капельном поливе. Поэтому даже небольшие, на первый взгляд, изменения, которые наблюдаются при добавлении в воду монофосфата калия, могут играть важную роль в развитии и формировании корневой системы. Увеличенная концентрация питательных веществ, «оседающих» именно по границе контура увлажнения после фертигации, способствует устремлению питательных веществ в заданную область.

Полученные результаты позволяют рассчитать поливные нормы для сельскохозяйственных культур на стадии проектирования процесса внесения удобрений с поливной водой в капельном орошении для различных вариантов концентрации монофосфата калия.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Алексеев, В. В.** Изучение влияния механического воздействия на скорость и объем поглощения влаги почвой / В. В. Алексеев, И. И. Максимов, П. В. Мишин // Вестник НГИЭИ. – 2018. – № 7 (86). – С. 18–28. – URL: <https://clck.ru/T8PeS> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.
2. **Алексеев, В. В.** Исследование профилей увлажнения почвы с уплотненным слоем при дождевании и поверхностном поливе / В. В. Алексеев // Природообустройство. – 2016. – № 4. – С. 92–96. – URL: <https://clck.ru/T8PhM> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.
3. Mechanized Application of Ameliorants for Preservation of Soil Moisture on Cultivated Lands / S. A. Vasilyev, A. A. Vasilyev, M. Y. Ivanov, A. V. Vasilyeva. – DOI [10.1088/1757-899X/537/6/062018](https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/6/062018) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 537, Issue 6. – 6 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/537/6/062018> (дата обращения: 04.02.2021).
4. Результаты почвенно-мелиоративных исследований при реконструкции межхозяйственной оросительной системы «Дружба» Чувашской Республики / А. Н. Дмитриев, С. А. Васильев, В. В. Алексеев, И. И. Максимов // Мелиорация и водное хозяйство. – 2016. – № 2. – С. 17–21. – URL: [http://mivh.vniigim.ru/download/archive/2016/contents\\_2016\\_2.pdf](http://mivh.vniigim.ru/download/archive/2016/contents_2016_2.pdf) (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.
5. Вероятностная модель определения возможного уровня урожая / В. П. Якушев, В. М. Буре, В. В. Якушев, А. В. Буре // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2014. – № 6. – С. 59–62. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22448363> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.
6. **Добрачев, Ю. П.** Модели роста и развития растений и задача повышения урожайности / Ю. П. Добрачев, А. Л. Соколов // Природообустройство. – 2016. – № 3. – С. 90–96. – URL: <http://elibrary.vniigim.ru/dl/full/gmgup-15-2016-03.pdf/view> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.
7. **Дубенок, Н. Н.** Водопотребление и продуктивность раннего картофеля при спринклерном орошении / Н. Н. Дубенок, А. Ф. Дружкин, Р. А. Чечко // Мелиорация и водное хозяйство. – 2015. – № 1. – С. 15–18. – URL: <http://mivh.vniigim.ru/archive/> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.
8. **Ахмедов, А. Д.** Контурные увлажнения почвы при капельном орошении / А. Д. Ахмедов, Е. Ю. Галиуллина // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее



профессиональное образование. – 2012. – № 3 (270). – С. 183–188. – URL: <https://clck.ru/T8QNd> (дата обращения: 04.02.2021).

9. **Melikhova, E. V.** Computer Simulation and Optimization of Parameters of Configuration of the Contour of Moistening under Drip Irrigation of Agricultures / E. V. Melikhova, A. F. Rogachev. – DOI [10.1007/978-3-030-13397-9\\_122](https://doi.org/10.1007/978-3-030-13397-9_122) // Ubiquitous Computing and the Internet of Things: Prerequisites for the Development of ICT. Studies in Computational Intelligence, vol. 826 ; E. Popkova, ed. – Cham : Springer, 2019. – Pp. 1193–1201. – URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-13397-9\\_122](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-13397-9_122) (дата обращения: 04.02.2021).

10. Разработка рабочего органа для внесения жидких мелиорантов в почву при плоскорезной обработке / С. А. Васильев, А. А. Васильев, И. И. Максимов, В. В. Алексеев // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2014. – № 1. – С. 55–58. – URL: <http://www.sgau.ru/files/pages/846/13917752460.pdf> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

11. Оптимальное управление поливами на основе современных вычислительных алгоритмов / В. В. Бородычев, М. Н. Лытов, А. С. Овчинников, В. С. Бочарников // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2015. – № 4 (40). – С. 21–28. – URL: <https://clck.ru/T8Sz9> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

12. **Кирейчева, Л. В.** Модели и информационные технологии управления водопользованием на мелиоративных системах, обеспечивающие благоприятный мелиоративный режим / Л. В. Кирейчева, И. Ф. Юрченко, В. М. Яшин // Мелиорация и водное хозяйство. – 2014. – № 5–6. – С. 50–55. – URL: <http://mivh.vniigim.ru/archive/> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

13. **Ольгаренко, В. И.** Применение метода Монте-Карло для моделирования рисков планируемого орошения / В. И. Ольгаренко, И. Ф. Юрченко, И. В. Ольгаренко // Научная жизнь. – 2017. – № 2. – С. 11–19. – URL: [http://www.sced.ru/ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=577:nauchnaya-zhizn-02-2017&catid=43:uncategorised&Itemid=156](http://www.sced.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=577:nauchnaya-zhizn-02-2017&catid=43:uncategorised&Itemid=156) (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

14. **Фалькович, А. С.** Функции влагопроводности трещиноватых темно-каштановых почв Заволжья / А. С. Фалькович // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2011. – № 7. – С. 66–68. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16531726> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

15. **Муромцев, Н. А.** Определение коэффициента влагопроводности почв в почвенных колоннах и лизиметрах / Н. А. Муромцев. – DOI [10.19047/0136-1694-2013-72-84-95](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2013-72-84-95) // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. – 2013. – Вып. 72. – С. 84–95. – URL: <https://bulletin.esoil.ru/jour/article/view/525> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

16. **Шкура, В. Н.** Об учете почвенных водно-физических характеристик при определении параметров контуров капельного увлажнения почвы / В. Н. Шкура, А. С. Штанько // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2017. – № 4 (28). – С. 137–153. – URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=336> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

17. Изменение контактных углов смачивания при добавлении в моющие растворы поверхностно-активных веществ / Н. В. Бышов, И. А. Успенский, В. В. Алексеев, И. В. Фадев. – DOI [10.15507/2658-4123.029.201902.295-305](https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.295-305) // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 2. – С. 295–305. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/82-19-2/707-10-15507-0236-2910-029-201902-10> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

18. Automation of Determining the Contact Angle of Washing Liquids Wetting / V. V. Alekseev, V. P. Philippov, I. V. Fadeev, S. I. Chuchkalov. – DOI [10.1088/1742-6596/1333/4/042001](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/4/042001) // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1333, Issue 4. – 5 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1333/4/042001> (дата обращения: 04.02.2021).

19. Получение основной гидрофизической характеристики почв на основе идеализированных моделей / В. А. Сысуев, И. И. Максимов, В. В. Алексеев, В. И. Максимов // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2013. – № 5. – С. 63–66. – URL: [http://www.cnsnb.ru/jour/j\\_as.asp?id=117606](http://www.cnsnb.ru/jour/j_as.asp?id=117606) (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

20. Hydrophysical Aspects of Soil Assessment in Melioration / V. V. Alekseev, R. I. Aleksandrov, S. A. Vasiliev, S. I. Chuchkalov. – DOI [10.1088/1755-1315/341/1/012106](https://doi.org/10.1088/1755-1315/341/1/012106) // IOP Conference Series:

Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 341. – 6 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/341/1/012106> (дата обращения: 04.02.2021).

21. Simulation of Drip Irrigation on Slope Lands / V. Alekseev, S. Chuchkalov, V. Philippov [et al.]. – DOI 10.1051/bioconf/20201700218 // Proceedings of International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2019). – 2020. – Vol. 17. – 5 p. – URL: [https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/full\\_html/2020/01/bioconf\\_fies2020\\_00218/bioconf\\_fies2020\\_00218.html](https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/full_html/2020/01/bioconf_fies2020_00218/bioconf_fies2020_00218.html) (дата обращения: 04.02.2021).

Поступила 18.09.2020; одобрена после рецензирования 15.10.2020; принята к публикации 29.10.2020

Об авторах:

**Успенский Иван Алексеевич**, заведующий кафедрой технической эксплуатации транспорта ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева» (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: B-7990-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, Scopus ID: 57193743041, [ivan.uspensckij@yandex.ru](mailto:ivan.uspensckij@yandex.ru)

**Фадеев Иван Васильевич**, заведующий кафедрой машиноведения ФГБОУ ВО «Чувашский государственный педагогический университет имени И. Я. Яковлева» (428000, Российская Федерация, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, д. 38), доктор технических наук, доцент, Researcher ID: B-8856-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5863-1812>, [ivan-fadeev-2012@mail.ru](mailto:ivan-fadeev-2012@mail.ru)

**Алексеев Виктор Васильевич**, профессор кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова» (428025, Российская Федерация, г. Чебоксары, Московский пр-т, д. 15), доктор технических наук, доцент, Researcher ID: F-7784-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2780-1727>, [av77@list.ru](mailto:av77@list.ru)

**Филиппов Владимир Петрович**, доцент кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова» (428025, Российская Федерация, г. Чебоксары, Московский пр-т, д. 15), кандидат физико-математических наук, Researcher ID: AAD-5183-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7240-4405>, [filippov\\_v\\_p@mail.ru](mailto:filippov_v_p@mail.ru)

Заявленный вклад соавторов:

И. А. Успенский – научное руководство, постановка задачи исследования.

И. В. Фадеев – анализ литературных данных, разработка методики и проведение экспериментальных исследований.

В. В. Алексеев – разработка математической модели и редактирование.

В. П. Филиппов – коррекция математической модели и проведение вычислений.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## REFERENCES

1. Alekseev V.V., Maksimov I.I., Mishin P.V. Study of the Influence of Mechanical Impact on Moisture Filtration in Soils. *Vestnik NGIEI* = Bulletin NGIEI. 2018; (7):18-28. Available at: <https://clck.ru/T8PeS> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)

2. Alexeev V.V. Investigation of Profiles of Soils Moistening with a Compacted Layer under Overhead and Surface Irrigation. *Prirodoobustroystvo* = Nature Conservation. 2016; (4):92-96. Available at: <https://clck.ru/T8PhM> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)

3. Vasilyev S.A., Vasilyev A.A., Ivanov M.Y., et al. Mechanized Application of Ameliorants for Preservation of Soil Moisture on Cultivated Lands. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 537(6). 6 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/6/062018> (In Eng.)



4. Dmitriev A.N., Vasilyev S.A., Alekseev V.V., et al. The Results of Soils Hydrophysical and Erosion Properties Experimental Research on Chuvash Republic Inter-Farm Irrigation System “Druzhba” Rebuilding. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* = Melioration and Water Management. 2016; (2):17-21. Available at: [http://mivh.vniigim.ru/download/archive/2016/contents\\_2016\\_2.pdf](http://mivh.vniigim.ru/download/archive/2016/contents_2016_2.pdf) (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
5. Yakushev V.P., Bure V.M., Yakushev V.V., et al. Probable Model for Determining Possible Yield Level. *Doklady Rossiyskoy akademii selskokhozyaystvennykh nauk* = Papers of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 2014; (6):59-62. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22448363> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
6. Dobrachev Yu.P., Sokolov A.L. Models of Plants Growth and Development and Task of Raising Crops Productivity. *Prirodooobustroystvo* = Nature Conservation. 2016; (3):90-96. Available at: <http://elib.timacad.ru/dl/full/gmgup-15-2016-03.pdf/view> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
7. Dubenok N.N., Druzhkin A.F., Chechko R.A. Water Consumption and Efficiency of Early Potatoes under Sprinkler Irrigation. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* = Melioration and Water Management. 2015; (1):15-18. Available at: <http://mivh.vniigim.ru/archive/> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
8. Akhmedov A.D., Galiullina Ye.Yu. [Soil Moisture Contours in Drip Irrigation]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie* = News of the Nizhnevolzhsk Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education. 2012; (3):183-188. Available at: <https://clck.ru/T8QNd> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
9. Melikhova E.V., Rogachev A.F. Computer Simulation and Optimization of Parameters of Configuration of the Contour of Moistening under Drip Irrigation of Agricultures. In: E. Popkova, ed. *Ubiquitous Computing and the Internet of Things: Prerequisites for the Development of ICT. Studies in Computational Intelligence*, vol. 826. Cham: Springer; 2019. 1193-1201 p. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-13397-9\\_122](https://doi.org/10.1007/978-3-030-13397-9_122)
10. Vasilyev S.A., Vasilyev A.A., Maximov I.I., et al. Development of a Working Body for Application of the Liquid Ameliorants in the Soil when Subsurface Processing. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova* = Vavilov Saratov State Agrarian University Bulletin. 2014; (1):55-58. Available at: <http://www.sgau.ru/files/pages/846/13917752460.pdf> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
11. Borodychev V.V., Lytov M.N., Ovchinnikov A.S., et al. Optimum Control of Waterings on the Basis of Modern Computing Algorithms. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie* = News of the Nizhnevolzhsk Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education. 2015; (4):21-28. Available at: <https://clck.ru/T8Sz9> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
12. Kireycheva L.V., Yurchenko I.F., Yashin V.M. Models and Information Technologies for Water Management on the Reclamation System, Which Provides Favorable Reclamation Mode. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* = Melioration and Water Management. 2014; (5-6):50-55. Available at: <http://mivh.vniigim.ru/archive/> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
13. Olgarenko V.I., Yurchenko I.F., Olgarenko I.V. Application of Monte Carlo Method to Simulate the Planned Irrigation Risks. *Nauchnaya zhizn* = Scientific Life. 2017; (2):11-19. Available at: [http://www.sced.ru/ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=577:nauchnaya-zhizn-02-2017&catid=43:uncategorised&Itemid=156](http://www.sced.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=577:nauchnaya-zhizn-02-2017&catid=43:uncategorised&Itemid=156) (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
14. Falkovich A.S. Moisture Conductivity Functions of the Cracked Dark-Chestnut Soils of Zavolzhye. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova* = Vavilov Saratov State Agrarian University Bulletin. 2011; (7):66-68. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16531726> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
15. Muromtsev N.A. Methods of Determining the Coefficient of Water Conductivity in Soils. *Byulleten Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva* = Dokuchaev Soil Bulletin. 2013; (72):84-95. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2013-72-84-95>
16. Shkura V.N., Shtanko A.S. Consideration of Soil Hydrophysical Characteristics in Determining the Contour Parameters of Drip Irrigation. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii* = Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement. 2017; (4):137-153. Available at: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=336> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)

17. Byshov N.V., Uspensky I.A., Alekseev V.V., et al. Changing the Contact Wetting Angles when Adding Surface-Active Substances to Washing Solutions. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(2):295-305. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.295-305>
18. Alekseev V.V., Philippov V.P., Fadeev I.V., et al. Automation of Determining the Contact Angle of Washing Liquids Wetting. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1333(4). 5 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/4/042001>
19. Sysuev V.A., Maksimov I.I., Alekseev V.V., et al. Receiving Water Retention Curve on Idealized Models. *Doklady Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk* = Papers of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 2013; (5):63-66. Available at: [http://www.cnsnb.ru/jour/j\\_as.asp?id=117606](http://www.cnsnb.ru/jour/j_as.asp?id=117606) (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
20. Alekseev V.V., Aleksandrov R.I., Vasiliev S.A., et al. Hydrophysical Aspects of Soil Assessment in Melioration. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 341. 6 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/341/1/012106>
21. Alekseev V., Chuchkalov S., Philippov V., et al. Simulation of Drip Irrigation on Slope Lands. In: Proceedings of International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources" (FIES 2019). 2020; 17. 5 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700218>

*Submitted 18.09.2020; approved after reviewing 15.10.2020; accepted for publication 29.10.2020*

*About the authors:*

**Ivan A. Uspensky**, Head of the Chair of Technical Operation of Transport, Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev (1 Kostychev St., Ryazan 390044, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: B-7990-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, Scopus ID: 57193743041, [ivan.uspensckij@yandex.ru](mailto:ivan.uspensckij@yandex.ru)

**Ivan V. Fadeev**, Head of the Chair of Mechanical Engineering, Chuvash I. Yakovlev State Pedagogical University (38 K. Marks St., Cheboksary 428000, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: B-8856-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5863-1812>, [ivan-fadeev-2012@mail.ru](mailto:ivan-fadeev-2012@mail.ru)

**Victor V. Alekseev**, Professor of the Chair of General Physics, Chuvash I. N. Ulyanov State University (15 Moskovskiy Prospekt, Cheboksary 428025, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Researcher ID: F-7784-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2780-1727>, [av77@list.ru](mailto:av77@list.ru)

**Vladimir P. Filippov**, Associate Professor of the Chair of Mathematics and Hardware Support for Information Systems, Chuvash I. N. Ulyanov State University (15 Moskovskiy Prospekt, Cheboksary 428025, Russian Federation), Cand.Sc. (Phys.-Math.), Researcher ID: AAD-5183-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7240-4405>, [filippov\\_v\\_p@mail.ru](mailto:filippov_v_p@mail.ru)

*Contribution of the authors:*

I. A. Uspensky – scientific guidance, formulation of the research task.

I. V. Fadeev – analysis of literary data, development of methodology and experimental research.

V. V. Alekseev – development of a mathematical model and editing.

V. P. Filippov – correcting the mathematical model and performing calculations.

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





## Агротехнические и энергетические показатели почвообрабатывающих рабочих органов

Г. Г. Пархоменко<sup>1</sup>, И. В. Божко<sup>1\*</sup>, С. И. Камбулов<sup>1</sup>,  
В. И. Пахомов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» (г. Зерноград, Российская Федерация)

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

\*i.v.bozhko@mail.ru

**Введение.** Одним из направлений сельскохозяйственного производства является получение продукции растениеводства. В то же время следует принимать во внимание все возможности снижения энерго- и трудозатрат, расходуемых на почвообрабатывающие операции. Этого можно достичь путем применения энергоэффективных почвообрабатывающих устройств.

**Материалы и методы.** В ходе исследований осуществлялась агротехническая и энергетическая оценка технологического процесса обработки почвы, выполняемого рабочими органами. Агротехническая оценка включает в себя определение показателей неравномерности глубины хода рабочих органов, крошения пласта, гребнистости, а также содержания эрозионноопасных частиц. В качестве энергетической оценки был принят показатель тягового сопротивления, создаваемого одним рабочим органом. Исследования проводились для различных комплектаций чизельного рабочего органа плоскорезной и криволинейной лапой и элементами, выполненными из полимера.

**Результаты исследования.** Получены данные агрооценки и тягового сопротивления чизельных рыхлителей по различным агрофонам: стерня озимой пшеницы с предварительным дискованием в один след, стерня озимого ячменя с предварительным дискованием в один след, а также по фону «черный пар».

**Обсуждение и заключение.** По итогам исследований установлено, что по показателям качества рабочие органы отвечают предъявляемым агротехническим требованиям по заданной глубине обработки 25–35 см. Выделяется чизель с криволинейной лапой по наибольшему наличию комков до 5 см (91–96 %). Высота гребня 6,8–8,0 см для всех вариантов рабочих органов. Установлено, что рабочие органы целесообразно применять для противоэрозионной обработки почвы. По показателю сохранения растительных и пожнивных остатков преимуществом обладает чизель с криволинейной лапой, обеспечивающий их содержание больше на 9,5–28,6 %, чем с полимером 13,2–14,3 %. Наименьшее тяговое сопротивление 7,6 кН у чизеля с полимером, что ниже на 18,28 % по сравнению с рабочим органом, оснащенным плоскорезной лапой.

**Ключевые слова:** почвообрабатывающий рабочий орган, агротехнические показатели, энергетические показатели, полимерные материалы, глубокая обработка почвы, безотвальное рыхление

**Финансирование:** исследование выполнено в рамках госбюджетной НИР.

© Пархоменко Г. Г., Божко И. В., Камбулов С. И., Пахомов В. И., 2021



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

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

**Для цитирования:** Агротехнические и энергетические показатели почвообрабатывающих рабочих органов / Г. Г. Пархоменко, И. В. Божко, С. И. Камбулов, В. И. Пархомов. – DOI 10.15507/2658-4123.031.202101.109-126 // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 1. – С. 109–126.

*Original article*

## Agrotechnical and Energy Performance of Tillage Tools

**G. G. Parkhomenko<sup>a</sup>, I. V. Bozhko<sup>a\*</sup>, S. I. Kambulov<sup>a</sup>,  
V. I. Pakhomov<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>*Agricultural Research Center “Donskoy” (Zernograd, Russian Federation)*

<sup>b</sup>*Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)*

<sup>\*</sup>*i.v.bozhko@mail.ru*

**Introduction.** One of the areas of agricultural production is crop production. At the same time, it is necessary to take into account all available possibilities of reducing the energy consumption and labor required for tillage operations that can be achieved by using energy efficient tillage tools.

**Materials and Methods.** In the course of the research, an agrotechnical and energy assessment of the technological process of soil cultivation performed by tillage tools was carried out. The agrotechnical assessment includes identifying the indicators of unevenness of the tillage tool travel depth, soil pulverization, ridging, and the content of erosion threatening particles. As an energy assessment, the indicator of draught created by a tillage tool was taken. The researches were carried out for various configurations of the chisel cultivators with flat and curved hoes, and elements made of polymer.

**Results.** The data of agricultural assessment and draught of chisel cultivators were obtained for various agricultural backgrounds: winter wheat stubble with preliminary disking in one track, winter barley stubble with preliminary disking in one track, and autumn fallow on the background.

**Discussion and Conclusion.** According to the results of the research, it was found that, in terms of quality indicators, the tillage tools meet the agrotechnical requirements for a given processing depth of 25–35 cm. The operation of the chisel equipped with a curved hoe is characterized by the highest presence of clods up to 5 cm (91–96%). The ridge height was 6.8–8.0 cm for all tillage tools. It has been established that the tillage tools are advisable to be used for anti-erosion soil cultivation. In terms of preserving plant and crop residues, a chisel with a curved hoe providing their content by 9.5–28.6% more than with a polymer of 13.2–14.3%. The chisel with polymer has the smallest draught of 7.6 kN, which is 18.28% lower in comparison with tillage tools equipped with a flat hoe.

**Keywords:** tillage working body, agro technical indicators, energy indicators, polymeric materials, deep tillage, subsurface cultivation

**Funding:** The study was carried out as part of the state budget research.

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

**For citation:** Parkhomenko G.G., Bozhko I.V., Kambulov S.I., et al. Agrotechnical and Energy Performance of Tillage Tools. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(1):109-126. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.109-126>

## Введение

Обработка почвы – очень важный технологический процесс сельхозпроизводства, направленный на получение продукции растениеводства [1].

Основной задачей в области механизации производства является создание научных основ для разработки техники нового поколения для осуществления высокопроизводительных технологий для приоритетного производства группы культур.

Существенная экономия энергии может быть достигнута путем выбора энергоэффективных почвообрабатывающих рабочих органов.

Ресурсосбережение в части состояния почвы определяется обобщенной характеристикой плодородия, которая заключается в способности обеспечивать возделываемые культуры необходимыми питательными веществами, водой и воздухом. Плодородие почвы зависит от ее состояния, которое количественно по своим свойствам оценивается твердостью, плотностью и влажностью.

Помимо этого при использовании почвообрабатывающих машин, обладающих высоким тяговым сопротивлением, для соблюдения требований экологической безопасности по техногенному разрушению почвы следует стремиться к снижению переуплотнения путем совершенствования конструкции [2; 3].

Известно, что большая часть используемой почвообрабатывающей техники устарела и требует больших затрат на обеспечение ее работоспособности.

Так, коэффициент обновления машин для мелкой обработки почвы составил 4,3 %, для основной – 4,6 %, что ниже требуемого в 2,5-3 раза.

Цель исследования – агрооценка и определение тягового сопротивления нового чизеля.

## Обзор литературы

В процессе разработки конструкции необходимым этапом является определе-

ние энергоемкости чизелевания, мерой которой является тяговое сопротивление рабочих органов. Определение закономерности изменения тягового сопротивления чизеля является сложной экспериментальной и теоретической задачей прежде всего из-за большого количества параметров, оказывающих влияние на сам процесс взаимодействия с почвой, имеющий случайный характер. Помимо этого возникают неточности при теоретическом расчете силы тяги, обусловленные тем, что математические модели (формулы) пренебрегают многими параметрами, которые влияют на процесс обработки. Это отчасти объясняется тем, что для решения необходимо установить ряд силовых характеристик, влияющих на функционирование рабочего органа при осуществлении технологического процесса обработки почвы, которые с большой степенью точности можно определить только в результате динамометрирования [4; 5]. Вызывает затруднение процесс установления коэффициента, учитывающего тип и свойства обрабатываемой среды [6]. Более адекватными реальному процессу являются результаты динамометрирования. Для этой цели был разработан регулируемый трехточечный динамометр [7]. Разработана контрольно-измерительная система рабочих характеристик трактора и навесных почвообрабатывающих машин [8]. Представлены результаты исследований трехточечной системы измерения тягового сопротивления почвообрабатывающих машин [9; 10]. Выделено несколько методов измерения тягового сопротивления и скорости движения машины [11]. Все эти методы имеют преимущества и недостатки в зависимости от используемого трактора, навесной машины и условий эксплуатации. При измерении тягового сопротивления по трем точкам, как правило, наблюдаются большие погрешности результатов суммирования сил в горизон-

тальном, продольном и вертикальном направлениях [12]. В настоящее время научные исследования направлены на повышение точности оборудования для измерения тягового сопротивления [13].

В результате исследований получены регрессионные уравнения прогнозирования различных показателей технологического процесса почвообрабатывающих машин на суглинистой почве [14]. Также анализировались показатели технологического процесса почвообрабатывающих машин и характеристик трактора [15]. Определены показатели качества экспериментальных почвообрабатывающих рабочих органов с целью проверки соответствия агротехническим требованиям [16]. Представлены результаты исследования показателей почвообрабатывающих рабочих органов, таких как влажность и плотность почвы, гребнистость поверхности поля, степень крошения пласта [17]. Изучено влияние различных параметров рабочего органа, скорости движения, глубины рыхления и соотношения «глубина обработки / ширина захвата на тяговое сопротивление» [18]. Проанализировано влияние скорости (3,6; 5,4; 7,2; 9,0 и 10,8 км/ч) и глубины рыхления (10, 20 и 30 см) на тяговое сопротивление почвообрабатывающих машин [19]. Представлены результаты лабораторного исследования силовых характеристик рабочего органа, свидетельствующие о том, что на тяговое сопротивление большое влияние оказывают физико-механические свойства обрабатываемой среды, условия резания и степень затупления лезвия [20]. Результаты исследований показали, что чизель, используемый для разуплотнения нижних слоев почвы, характеризуется меньшим расходом топлива по сравнению с другими используемыми для этой цели машинами [21].

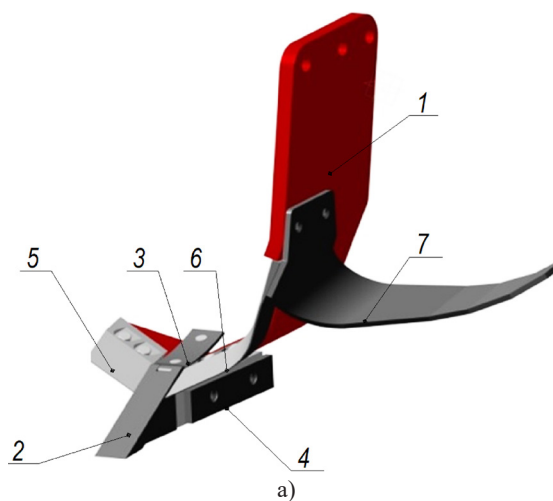
Установлено, что наибольшая твердость наблюдалась в опыте без обра-

ботки почвы [22]. Установлено, что при обработке почвы увлажненность повысилась на 16,8–31,8 мм по сравнению с агрофонами без обработки [23]. Несмотря на то, что самые высокие запасы влаги перед посевом зафиксированы без обработки (11,1 мм), ко времени возобновления весенней вегетации закономерности ее накопления изменились: по глубокому рыхлению 116,1 мм, без обработки 109,5 мм [24]. Результаты одного из исследований показывают, что твердость почвы, корневая архитектура и водопотребление тесно взаимосвязаны и определяют потенциал возделываемых культур для доступа к почвенным водным бассейнам [25]. Любая стратегия обработки почвы должна рассматриваться как часть компромисса между борьбой с сорными растениями и предотвращением эрозийных процессов [26]. Исследование показывает, что традиционная обработка почвы с небольшими энергозатратами обладает такими преимуществами, как снижение загрязнения окружающей среды гербицидами [27].

### Материалы и методы

В основу конструкции почвообрабатывающих рабочих органов заложен принцип трансформации различных взаимозаменяемых вариантов элементов для мелкого рыхления на одной криволинейной стойке типа параплау. Конструкция рабочего органа содержит криволинейную стойку с глубокорыхлителем в виде долота и оснащается, в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемой среды и засоренности поля, плоскорезной либо криволинейной лапой или элементами из полимера (рис. 1).

Исследования проводились на глубине обработки почвы, устанавливаемой на 25, 30, 35 см, и при скорости движения, соответствующей I, II, III передачам трактора. Тяговое сопротивление измеряли посредством



c)

Р и с. 1. Конструкция почвообрабатывающего рабочего органа: а) общий вид конструкции рабочего органа (1 – стойка; 2 – долото; 3 – комкодробитель; 4 – упорная плита; 5, 6 – лемешные лезвия; 7 – лапа); б) криволинейная и плоскорезная лапы; в) полимер

F i g. 1. Design of the tillage working body: a) general view of the design of the tillage working body (1 – stand; 2 – chisel; 3 – clod crusher; 4 – thrust plate; 5, 6 – share blades; 7 – hoe); б) curved and flat hoes; в) polymer



тензометрического звена, размещенного на экспериментальной установке перед рабочим органом (рис. 2).

Агрооценка включает определение агротехнических свойств или показателей качества, характеризует геометрию, изменения физико-механических свойств почвы при чизелевании и его влияние на обрабатываемую среду и растительный покров. Геометрия обрабатываемого слоя почвы характеризуется глубиной рыхления. Изменение физико-механических свойств обрабатываемого слоя почвы оценивается по величине крошения. Воздействие рабочих органов на растительный покров характеризуется степенью сохранения стерни.

Основным параметром энергетической оценки был принят показатель

тягового сопротивления, создаваемого одним рабочим органом, для уточнения параметров разрабатываемого агрегата при дальнейшем проектировании.

Существуют различные методы и средства измерения и контроля глубины обработки почвы рабочих органов, имеющие достоинства и недостатки [28; 29]. Основным недостатком является сложность и ограниченность применения. Наиболее простым и доступным средством измерения глубины обработки почвы после прохода рабочих органов как для научных исследований, так и в производственных условиях является измерительная линейка, которая входит в перечень, рекомендуемый машиноиспытательной станцией (МИС).



Р и с. 2. Шарнирное тензометрическое звено  
F i g. 2. Articulated strain gauge link

Количество пожнивных и растительных остатков определялось по их массе после прохода рабочих органов в сравнении с исходным числом. Для этого на поверхность почвы укладывается рамка или палетка  $0,5 \times 0,5 \text{ м}^2$ , с указанной площади собирается стерня на поверхности (рис. 3).

Это же оборудование используется при определении размеров комков почвы (качества крошения). Суммарное количество клеток принимается за 100 %. Определяется сумма комков, размер которых превышает контур клетки  $K_{>50\text{мм}}$ . Число комков до 5 см  $K_{<50\text{мм}}$  определяется по формуле:

$$K_{<50\text{мм}} = 100 - K_{>50\text{мм}}. \quad (1)$$

Измерения проводятся в трех повторностях посредством наложения палетки в различных местах после прохода рабочих органов.

Высота гребня измеряется линейкой или гибким шнуром.

### Результаты исследования

Исследуемая почва по типу и механическому составу представлена черноземом обыкновенным малогумусным на лессовидных глинах. Рельеф местности ровный, уклон поля отсутствует. Исследования проводились на трех различных фонах: на стерне озимой пшеницы с предварительным дискованием в один след (I); на стерне озимого ячменя с предварительным дискованием в один след (II); на черном паре (III).

Микрорельеф колебался от 0,7 до 2,8 см. Наиболее слабо выражен микрорельеф поля на фоне III – черный пар (табл. 1).

Твердость по результатам исследований в основном не превышала допустимую по СТО АИСТ 4.6-2018, за исключением обработки почвы по стерне озимой пшеницы с предварительным дискованием в один след (I), где по данному показателю фон является экстремальным. Влажность соответствовала норме (до 30 %). Результаты агрооценки чизеля представлены в таблицах 2–8.



Р и с. 3. Оборудование для исследования размеров комков и сохранения стерни

F i g. 3. Equipment for the study of clod size and stubble preservation

Т а б л и ц а 1  
T a b l e 1

**Перечень свойств обрабатываемой среды**  
**List of properties of the processed soil**

Наименование показателя / Indicator name	Значение показателя для фона / Indicator value for background		
	I	II	III
Микрорельеф поля продольный, см / Longitudinal field microrelief, cm	2,10	1,90	0,70
Микрорельеф поля поперечный, см / Microrelief of the field is transverse, cm	2,80	2,50	1,80
Твердость почвы, МПа / Soil hardness, MPa	< 5	< 3	< 20
Влажность (абсолютная) в слое почвы 0–5 см, % / Moisture (absolute) in the soil layer 0–5 cm, %	24,80	22,40	18,70
Влажность (абсолютная) в слое почвы (5–25) ÷ 35 см, % / Moisture (absolute) in the soil layer (5–25) ÷ 35 cm, %	27,80	25,30	20,10
Количество стерни на 0,25 м <sup>2</sup> до обработки почвы, г / Stubble amount per 0.25 m <sup>2</sup> before tillage, g	60,50	71,40	–
Содержание эрозийноопасных частиц (размером менее 1 мм) до чизелевания, % / Content of erosion threatening particles (less than 1 mm in size) before chiseling, %	38,15	36,71	44,80

Т а б л и ц а 2  
T a b l e 2

**Результаты исследования глубины обработки почвы (фон I)**  
**Results of the study of the tillage depth (background I)**

Наименование показателя / Indicator name	Значение показателя для варианта рабочего органа / The value of the indicator for the variant of the tillage working body								
	с плоскорезом / with flat cutter			криволинейного / curvilinear			с полимером / with polymer		
Глубина в среднем, см / Average depth, cm	25,0	29,3	36,3	25,1	30,1	35,3	26,0	31,4	34,5
Допускаемое отклонение, ±см / Tolerance, ±cm	< 2,5	< 3,0	< 3,5	< 2,5	< 3,0	< 3,5	< 2,5	< 3,0	< 3,5
Стандартное отклонение, ±см / Standard deviation, ±cm	1,5	1,5	3,7	1,4	2,9	3,4	2,4	2,8	3,2
Коэффициент вариации, % / The coefficient of variation, %	5,9	5,1	10,0	5,5	9,6	9,6	9,2	8,9	9,3
Ошибка, ±см / Error, ±cm	0,3	0,3	0,8	0,3	0,6	0,8	0,5	0,6	0,7
Точность, % / Accuracy, %	1,2	1,0	2,2	1,2	2,0	2,2	1,9	1,9	2,0

Таблица 3

Table 3

**Результаты исследования глубины обработки почвы (фон II)****Results of the study of the tillage depth (background II)**

Наименование показателя / Indicator name	Значение показателя для варианта рабочего органа / The value of the indicator for the variant of the tillage working body								
	с плоскорезом / with flat cutter			криволинейного / curvilinear			с полимером / with polymer		
Глубина в среднем, см / Average depth, cm	25,8	29,8	35,0	25,0	30,1	35,5	25,5	29,9	34,8
Допускаемое отклонение, ±см / Tolerance, ±cm	< 2,5	< 3,0	< 3,5	< 2,5	< 3,0	< 3,5	< 2,5	< 3,0	< 3,5
Стандартное отклонение, ±см / Standard deviation, ±cm	2,4	0,9	1,4	2,3	1,1	1,3	1,5	1,2	1,6
Коэффициент вариации, % / The coefficient of variation, %	9,3	3,1	4,1	9,2	3,8	3,7	5,9	4,0	4,5
Ошибка, ±см / Error, ±cm	0,5	0,2	0,3	0,5	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4
Точность, % / Accuracy, %	1,9	0,7	0,9	2,0	0,7	0,8	1,2	1,0	1,1

Таблица 4

Table 4

**Результаты исследования глубины обработки почвы (фон III)****Results of the study of the tillage depth (background III)**

Наименование показателя / Indicator name	Значение показателя для варианта рабочего органа / The value of the indicator for the variant of the tillage working body								
	с плоскорезом / with flat cutter			криволинейного / curvilinear			с полимером / with polymer		
Глубина в среднем, см / Average depth, cm	27,7	32,3	37,4	27,3	31,5	37,2	28,1	31,4	37,1
Допускаемое отклонение, ±см / Tolerance, ±cm	< 2,5	< 3,0	< 3,5	< 2,5	< 3,0	< 3,5	< 2,5	< 3,0	< 3,5
Стандартное отклонение, ±см / Standard deviation, ± cm	1,5	3,0	3,5	1,0	0,9	3,5	1,2	1,1	1,6
Коэффициент вариации, % / The coefficient of variation, %	5,6	9,9	9,6	3,5	2,8	9,9	5,4	3,5	4,5
Ошибка, ±см / Error, ±cm	0,3	0,7	0,8	0,2	0,2	0,8	0,3	0,2	0,4
Точность, % / Accuracy, %	1,1	2,2	2,1	0,7	0,6	2,2	1,1	0,6	1,1

Т а б л и ц а 5  
Table 5

**Исследование размеров комков**  
**Study of the size of clods**

Наименование показателя / Indicator name	Значение показателя для варианта рабочего органа (фон I / фон II / фон III) / The value of the indicator for the variant of the tillage working body (background I / background II / background III)		
	с плоскорезом / with flat cutter	криволинейного / curvilinear	с полимером / with polymer
Число комков менее 5 см, % / The number of lumps less than 5 cm, %	85,1 / 87,9 / 90,6	91,0 / 91,8 / 95,7	87,3 / 88,4 / 94,8
	Допускаемое по агротребованиям – не менее 60 % / Allowed for agricultural requirements – not less than 60%		

Т а б л и ц а 6  
Table 6

**Результаты исследования гребнистости**  
**Ridge test results**

Наименование показателя / Indicator name		Значение показателя для варианта рабочего органа и глубины обработки почвы, см / The value of the indicator for the variant of the tillage working body and tillage depth, cm								
		с плоскорезом / with flat cutter			криволинейного / curvilinear			с полимером / with polymer		
		25,0	29,3	36,3	25,1	30,1	35,3	26,0	31,4	34,5
Гребнистость / Ridge	Допускаемая, см / Allowable, cm	< 7,5	< 9,0	< 10,5	< 7,5	< 9,0	< 10,5	< 7,5	< 9,0	< 10,5
	фон I, см / background I, cm	7,3	7,5	8,0	7,3	7,4	8,2	7,4	7,5	7,9
	фон II, см / background II, cm	25,8	29,8	35,0	25,0	30,1	35,5	25,5	29,9	34,8
		6,8	7,1	7,4	6,9	6,9	7,1	7,1	7,6	7,8
	фон III, см / background III, cm	27,7	32,3	37,4	27,3	31,5	37,2	28,1	31,4	37,3
		7,1	6,9	7,3	6,9	6,9	7,2	6,9	7,0	7,2

Т а б л и ц а 7  
Table 7

**Результаты исследования пожнивных и растительных остатков**  
**Results of the study of crop and plant residues**

Наименование показателя и фона / Indicator and background name	Значение показателя для варианта рабочего органа / The value of the indicator for the variant of the working body		
	с плоскорезом / with flat cutter	криволинейного / curvilinear	с полимером / with polymer
Сохранение растительных и пожнивных остатков, % / Preservation of plant and crop residues, %	фон I / background I		
	79	91	65
	фон II / background II		
	72	84	76
Допускаемое по агротехническим требованиям сохранение растительных и пожнивных остатков – не менее 60 % / Preservation of plant and crop residues allowed for agrotechnical requirements – at least 60%			



Основной задачей механической обработки почвы является изменение ее структуры. Структура почвы является главным фактором, регулирующим отношение почвы к влаге, воздуху и позволяющим обеспечить наиболее благоприятное соотношение твердой, жидкой и газообразной фаз. Помимо этого интенсивность протекания микробиологических процессов находится в непосредственной функциональной зависимости от структуры почвы. Почвообрабатывающие рабочие органы, в зависимости от конструктивных особенностей, оказывают различное влияние на изменение структуры почвы. Изменение структуры почвы при воздействии на нее рабочих органов оценивается качеством крошения пласта.

Структура поверхности обработанного слоя почвы влияет на интенсивность протекания физико-химических процессов всего пласта. На водопроницаемость, аэрацию, испарение влаги оказывает непосредственное влияние характер обработанной поверхности почвы. Характер обработанной поверхности почвы оценивается таким

показателем, как гребнистость (высота гребня). При значительной неровности поля после обработки почвы, которая характеризуется гребнистостью, возникает увеличение удельной поверхности комков, что влечет за собой потерю влаги вследствие ее испарения. Помимо этого повышенная гребнистость приводит к оголению дна борозды, что недопустимо в условиях недостаточного увлажнения. При противоэрозионной обработке почвы чизельными рабочими органами допускается определенный процент гребнистости. Наличие гребней на поверхности почвы в данном случае необходимо для накопления и сбережения влаги и препятствия возникновения эрозионных процессов. Однако значительная неровность поля не позволяет применять посевные машины без дополнительной обработки почвы.

Математическое ожидание тягового сопротивления почвообрабатывающего рабочего органа с плоскорезом составило 9,30 кН, криволинейного – 8,04 кН, с полимерными материалами – 7,60 кН. Результаты при соответствующей глубине и скорости приведены в таблице 9.

Т а б л и ц а 8

Table 8

## Результаты исследования эрозионноопасных частиц

## Results of studying erosion threatening particles

Наименование показателя / Indicator name	Значение показателя для варианта рабочего органа / The value of the indicator for the variant of the tillage working body		
	с плоскорезом / with flat cutter	криволинейного / curvilinear	с полимером / with polymer
Изменение содержания эрозионноопасных частиц (менее 1 мм) в поверхностном слое (0–5 см) почвы, % / Change in the content of erosion threatening particles (less than 1 mm) in the surface layer (0–5 cm) of the soil, %	фон I / background I		
	снижается на 13,8 / decreases by 13.8	снижается на 14,9 / decreases by 14.9	снижается на 14,0 / decreases by 14.0
	фон II / background II		
	снижается на 11,9 / decreases by 11.9	снижается на 12,5 / decreases by 12.5	снижается на 11,3 / decreases by 11.3
	фон III / background III		
	снижается на 5,3 / decreases by 5.3	снижается на 6,3 / decreases by 6.3	снижается на 5,5 / decreases by 5.5
По агротехническим требованиям после прохода – не должно возрастать / According to agrotechnical requirements after the passage – should not increase			

**Тяговое сопротивление чизельных рабочих органов**  
**Draught of chisel working bodies**

Наименование показателя / Indicator name	Значение показателя для варианта рабочего органа / The value of the indicator for the variant of the working body		
	с плоскорезом / with flat cutter	криволинейного / curvilinear	с полимером / with polymer
Тяговое сопротивление, кН / Traction resistance, kN	9,30	8,04	7,60
Снижение тягового сопротивления, % / Decrease in traction resistance, %	—	13,56	18,28

### Обсуждение и заключение

Анализ данных свидетельствует о выполнении заданных агротехнических показателей почвообрабатывающими рабочими органами с допусаемым отклонением. Исключение составляет чизель с плоскорезной лапой при функционировании по стерне озимой пшеницы на глубину 35 см ( $\pm 3,7$  см при допусаемом  $\pm 3,5$  см). При этом точность составила до 2,2 %.

Наиболее высокое качество крошения обеспечивается криволинейной лапой комков до 5 см (91,0–95,7 %), то есть до 6,5 % выше, чем у аналогов. Рабочий орган с полимером обеспечивает качество крошения 87,4–94,8 % комков до 5 см, что на 1,0–4,1 % ниже, чем криволинейный. При функционировании на фоне «черный пар» обеспечивается наиболее высокое качество крошения почвы всеми рабочими органами (90,6–95,7 %). Изменение режимов работы не оказало существенного влияния на качество крошения, что можно объяснить достижением предела разрушения пласта почвы при данных условиях функционирования.

Чизельные рабочие органы по высоте гребня обеспечивают примерно

равные показатели качества 6,8–8,0 см. С увеличением глубины обработки наблюдается некоторый незначительный рост гребнистости.

Наибольшее количество растительных и пожнивных остатков сохраняется после прохода чизеля с криволинейной лапой (больше на 9,5–28,6 %, чем с полимером, и на 13,2–14,3 %, чем с плоскорезной лапой). При этом стерни озимого ячменя сохраняются больше у всех рабочих органов, за исключением чизеля с плоскорезной лапой.

Перемещение пыли из поверхностного слоя вглубь пласта, несмотря на прилипание их к полимеру, осуществляется в том же объеме, как и у аналогов. Рабочие органы приводят к снижению содержания эрозионноопасных частиц в поверхностном слое почвы на 5,3–14,9 %. Наибольшее их снижение (на 11,1–14,9 %) наблюдается на стерневых фонах на равном уровне у всех рабочих органов.

Наименьшее тяговое сопротивление (7,6 кН) у чизеля с полимером, что меньше на 18,28 % по сравнению с плоскорезной лапой.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Mamkagh, A. M. Effect of Soil Moisture, Tillage Speed, Depth, Ballast Weight and, Used Implementation on Wheel Slippage of the Tractor: A Review / A. M. Mamkagh. – DOI [10.9734/AJAAR/2019/46706](https://doi.org/10.9734/AJAAR/2019/46706) //



Asian Journal of Advances in Agricultural Research. – 2019. – Vol. 9, Issue 1. – Pp. 1–7. – URL: <http://www.sciencedomain.org/abstract/28580> (дата обращения: 04.02.2021).

2. **Гуреев, И. И.** Экологическая безопасность комплексной механизации агротехнологий возделывания сельскохозяйственных культур / И. И. Гуреев. – DOI [10.24411/0235-2451-2019-10515](https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10515) // Достижения науки и техники АПК. – 2019. – Т. 33, № 5. – С. 62–64. – URL: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10515> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

3. **Пархоменко, Г. Г.** Экологически безопасная эксплуатация технических средств в условиях физической деградации почвы / Г. Г. Пархоменко, С. Г. Пархоменко // Технический сервис машин. – 2019. – № 2 (135). – С. 40–46. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38537510> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

4. **Юнусов, Г. С.** Обеспеченность растениеводства почвообрабатывающей техникой: состояние и перспективы / Г. С. Юнусов, М. М. Ахмедова, А. Ф. Жук. – DOI [10.12737/article\\_5afc15a191d8c6.03289880](https://doi.org/10.12737/article_5afc15a191d8c6.03289880) // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2018. – № 1 (48). – С. 132–137. – URL: <https://naukaru.ru/en/auka/article/21020/view> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

5. Анализ энергоёмкости процесса вспашки почвы мотоблоком в агрегате с лемешно-отвальным плугом / В. Ф. Купряшкин, А. С. Уланов, Н. И. Наумкин [и др.]. – DOI [10.15507/2658-4123.029.201903.414-427](https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.414-427) // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 3. – С. 414–427. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/84-19-3/721-10-15507-0236-2910-029-201903-6> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

6. **Пархоменко, С. Г.** Автосцепка для динамометрирования навесных сельскохозяйственных машин / С. Г. Пархоменко // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2018. – № 3. – С. 165–167. – URL: <https://clck.ru/T8rWM> (дата обращения: 04.02.2021).

7. A Novel Three-Point Hitch Dynamometer to Measure the Draft Requirement of Mounted Implements / M. Askari, M. H. Komarizade, A. M. Nikbakht. – DOI [10.17221/16/2011-RAE](https://doi.org/10.17221/16/2011-RAE) // Research in Agricultural Engineering. – 2011. – Vol. 57, Issue 4. – Pp. 128–136. – URL: <https://www.agriculturejournals.cz/web/rae.htm?volume=57&firstPage=128&type=publishedArticle> (дата обращения: 04.02.2021).

8. **Al-Suhaibani, S. A.** Development and Evaluation of Tractors and Tillage Implements Instrumentation System / S. A. Al-Suhaibani, A. A. Al-Janobi, Y. N. Al-Majhadi. – DOI [10.3844/ajeassp.2010.363.371](https://doi.org/10.3844/ajeassp.2010.363.371) // American Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2010. – Vol. 3, Issue 2. – Pp. 363–371. – URL: <http://www.thescipub.com/abstract/10.3844/ajeassp.2010.363.371> (дата обращения: 04.02.2021).

9. **Пархоменко, С. Г.** Динамометрирование навесных сельскохозяйственных машин / С. Г. Пархоменко, Г. Г. Пархоменко // Труды ГОСНИТИ. – 2016. – Т. 124, № 1. – С. 125–129. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27021206> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

10. Design and Construction of Three Point Hitch Device for Measuring Draft of Tillage Implement-Data Acquisition and Post Processing Analysis / M. Kostić, D. Z. Rakić, H. H. Ličen, N. C. Malinović // Journal of Food, Agriculture & Environment. – 2014. – Vol. 1212, Issue 2. – Pp. 1300–1307. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/265789995\\_Design\\_and\\_construction\\_of\\_three\\_point\\_hitch\\_device\\_for\\_measuring\\_draft\\_of\\_tillage\\_implement\\_-Data\\_acquisition\\_and\\_post\\_processing\\_analysis](https://www.researchgate.net/publication/265789995_Design_and_construction_of_three_point_hitch_device_for_measuring_draft_of_tillage_implement_-Data_acquisition_and_post_processing_analysis) (дата обращения: 04.02.2021).

11. **Mamkagh, A. M.** Review of Fuel Consumption, Draft Force and Ground Speed Measurements of the Agricultural Tractor during Tillage Operations / A. M. Mamkagh. – DOI [10.9734/ajarr/2019/v3i430093](https://doi.org/10.9734/ajarr/2019/v3i430093) // Asian Journal of Advanced Research and Reports. – 2019. – Vol. 3, Issue 4. – Pp. 1–9. – URL: <https://www.journalajarr.com/index.php/AJARR/article/view/30093> (дата обращения: 04.02.2021).

12. **Пархоменко, С. Г.** Измерение силы тяги на крюке трактора в агрегате с навесной сельскохозяйственной машиной / С. Г. Пархоменко, Г. Г. Пархоменко // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – № 4. – С. 15–19. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25871252> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

13. **Федоренко, В. Ф.** Метод цифровой фильтрации при определении тягового усилия сельскохозяйственных тракторов / В. Ф. Федоренко, В. Е. Таркинский // Техника и оборудование для села. – 2019. – № 1. – С. 8–10. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37077512> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

14. Development of Empirical Regression Equations for Predicting the Performances of Disc Plough and Harrow in Clay-Loam Soil / O. Oduma, S. I. Oluka, J. Ch. Edeh, P. Ehiomogoe // *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. – 2019. – Vol. 21, Issue 3. – Pp. 18–25. – URL: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/5390> (дата обращения: 04.02.2021).

15. **Bietresato, M.** Ideation, Realization and Experimentation of Prototype Device for Measuring Farm Tractor Fuel Consumption during Dyno Tests / M. Bietresato, F. Mazzetto. – DOI [10.22616/ERDev2018.17.N446](https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N446) // *Proceedings of Conference: Engineering for Rural Development*, 23–25 May 2018, Jelgava. – Jelgava, 2018. – Pp. 362–372. – URL: <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2018/Papers/N446.pdf> (дата обращения: 04.02.2021).

16. **Сыромятников, Ю. Н.** Показатели качества работы почвообрабатывающей рыхлительно-сепарирующей машины / Ю. Н. Сыромятников. – DOI [10.22314/2073-7599-2018-12-3-38-44](https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-3-38-44) // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. – 2018. – Т. 12, № 3. – С. 38–44. – URL: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/250> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

17. Исследование работы игольчатой бороны с радиально установленными иглами на дисках / В. А. Кондрашов, М. М. Ковалев, Г. А. Перов, И. В. Сизов. – DOI [10.33267/2072-9642-2019-10-14-18](https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-10-14-18) // *Техника и оборудование для села*. – 2019. – № 10. – С. 14–18. – URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/content/mera-268-3> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

18. **Shahgholi, Gh.** Dar Kanat Geometrisinin Ayrık Eleman Yöntemi Kullanılarak Toprak Bozulma Derinliği ve Çekme Kuvveti Üzerindeki Etkilerinin Modellenmesi / Gh. Shahgholi, N. Kanyawi, D. Kallantari. – DOI [10.29133/yyutbd.429950](https://doi.org/10.29133/yyutbd.429950) // *Yüzüncü Yıl University Journal of Agricultural Sciences*. – 2019. – Vol. 29, Issue 1. – Pp. 24–33. – URL: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyutbd/issue/44253/429950> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

19. **Okoko, P.** Draft and Power Requirements for Some Tillage Implements Operating in Clay Loam Soil / P. Okoko, E. A. Ajav, W. A. Olosunde // *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. – 2018. – Vol. 20, No. 1. – URL: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/4563> (дата обращения: 04.02.2021).

20. Результаты лабораторных исследований почворезущих рабочих органов / И. В. Лискин, Я. П. Лобачевский, Д. А. Миронов [и др.]. – DOI [10.22314/2073-7599-2018-12-4-41-47](https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-4-41-47) // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. – 2018. – Т. 12, № 4. – С. 41–47. – URL: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/265> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

21. Energy Requirements for Alleviation of Subsoil Compaction and the Effect of Deep Tillage on Sunflower (*Helianthus Annus L.*) Yield in the Western Region of Argentina's Rolling Pampa / G. F. Botta, D. L. Antille, F. Bienvenido [et al.]. – DOI [10.22616/ERDev2019.18.N216](https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N216) // *Proceedings of Conference: Engineering for Rural Development*, 22–24 May 2019, Jelgava. – Jelgava, 2019. – Pp. 174–178. – URL: <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2019/Papers/N216.pdf> (дата обращения: 04.02.2021).

22. Rotary Tillage Effects on Some Selected Physical Properties of Fine Textured Soil in Wetland Rice Cultivation in Malaysia / M. Mairghany, A. Yahya, N. M. Adam [et al.]. – DOI [10.1016/j.still.2019.104318](https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104318) // *Soil and Tillage Research*. – 2019. – Vol. 194. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198718314326?via%3Dihub> (дата обращения: 04.02.2021).

23. Снижение потерь почвенной влаги на испарение / Ю. А. Савельев, О. Н. Кухарев, Н. П. Ларюшин [и др.]. – DOI [10.22314/2073-7599-2018-12-1-42-47](https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-1-42-47) // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. – 2018. – Т. 12, № 1. – С. 42–47. – URL: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/228> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

24. Эффективность различных способов основной обработки почвы и прямого посева при возделывании озимой пшеницы на черноземных почвах / Д. В. Дубовик, В. И. Лазарев, А. Я. Айдиев, Б. С. Ильин. – DOI [10.24411/0235-2451-2019-11205](https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-11205) // *Достижения науки и техники АПК*. – 2019. – Т. 33, № 12. – С. 26–29. – URL: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-11205> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

25. Feedbacks between Soil Penetration Resistance, Root Architecture and Water Uptake Limit Water Accessibility and Crop Growth – A Vicious Circle / T. Colombi, L. Ch. Torres, A. Walter, T. Keller. – DOI [10.1016/j.scitotenv.2018.01.129](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.129) // *Science of The Total Environment*. –



2018. – Vol. 626. – Pp. 1026–1035. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718301517?via%3Dihub> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

26. **Melland, A. R.** Effects of Strategic Tillage on Short-Term Erosion, Nutrient Loss in Runoff and Greenhouse Gas Emissions / A. R. Melland, D. L. Antille, Y. P. Dang. – DOI 10.1071/SR16136 // Soil Research. – 2016. – Vol. 55, Issue 3. – URL: <https://www.publish.csiro.au/sr/SR16136> (дата обращения: 04.02.2021).

27. Strategic Tillage in Conservation Agricultural Systems of North-Eastern Australia: Why, Where, When and How? / Y. P. Dang, A. Balzer, M. Crawford [et al.]. – DOI 10.1007/s11356-017-8937-1 // Environmental Science and Pollution Research. – 2018. – Vol. 25, Issue 2. – Pp. 1000–1015. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-017-8937-1> (дата обращения: 04.02.2021).

28. **Федоренко, В. Ф.** Исследование методов и технических средств для измерения глубины обработки почвы при испытаниях почвообрабатывающих машин / В. Ф. Федоренко, И. М. Киреев, В. О. Марченко. – DOI 10.33267/2072-9642-2019-5-12-17 // Техника и оборудование для села. – 2019. – № 5. – С. 12–17. – URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/content/mera-263-2> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

29. **Трубицын, Н. В.** Беспроводное устройство для измерения глубины хода рабочих органов сельскохозяйственных машин / Н. В. Трубицын, В. Е. Таркинский. – DOI 10.33267/2072-9642-2019-3-13-15 // Техника и оборудование для села. – 2019. – № 3. – С. 13–15. – URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/content/mera-261-3> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

*Поступила 14.08.2020; одобрена после рецензирования 12.10.2020; принята к публикации 26.10.2020*

*Об авторах:*

**Пархоменко Галина Геннадьевна**, ведущий научный сотрудник лаборатории механизации полеводства отдела механизации растениеводства ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, Научный городок, д. 3), кандидат технических наук, Researcher ID: D-2633-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1944-216X>, [parkhomenko.galya@yandex.ru](mailto:parkhomenko.galya@yandex.ru)

**Божко Игорь Владимирович**, младший научный сотрудник лаборатории механизации полеводства отдела механизации растениеводства ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, Научный городок, д. 3), кандидат технических наук, Researcher ID: E-9518-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8423-4079>, Scopus ID: 57204682997, [i.v.bozhko@mail.ru](mailto:i.v.bozhko@mail.ru)

**Камбулов Сергей Иванович**, главный научный сотрудник лаборатории механизации полеводства отдела механизации растениеводства ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, Научный городок, д. 3), доктор технических наук, Researcher ID: A-6156-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8712-1478>, Scopus ID: 57207655797, [kambulov.s@mail.ru](mailto:kambulov.s@mail.ru)

**Пахомов Виктор Иванович**, заведующий кафедрой технологий и оборудования переработки продукции АПК ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: Y-7085-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>, [vniprim@gmail.com](mailto:vniprim@gmail.com)

*Заявленный вклад соавторов:*

Г. Г. Пархоменко – постановка задачи, определение методологии исследования, сбор аналитических и практических материалов по теме исследования, анализ научных источников по теме исследования, критический анализ и доработка решения.

И. В. Божко – анализ и доработка текста.

С. И. Камбулов – научное руководство, постановка задачи, критический анализ и доработка решения.

В. И. Пахомов – формулирование концепции решения.

**Благодарности:** авторы выражают признательность анонимным рецензентам.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*



## REFERENCES

1. Mamkagh A.M. Effect of Soil Moisture, Tillage Speed, Depth, Ballast Weight and, Used Implement on Wheel Slippage of the Tractor: A Review. *Asian Journal of Advances in Agricultural Research*. 2019; 9(1):1-7. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.9734/AJAAR/2019/46706>
2. Gureev I.I. Environmental Safety of Complex Mechanization of Agricultural Crops Cultivation Technologies. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AIC. 2019; 33(5):62-64. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10515>
3. Parkhomenko G.G., Parkhomenko S.G. Ecologically Safe Operation of Technical Facilities in Conditions of Physical Degradation of Soil. *Tekhnicheskiiy servis mashin* = Technical Service of Machines. 2019; (2):40-46. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38537510> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
4. Yunusov G.S., Akhmadeeva M.M., Zhuk A.F. Security of Crop Production of Soil-Processing Technique: Status and Prospects. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Kазan State Agrarian University Bulletin. 2018; (1):132-137. (In Russ.) DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_5afc15a191d8c6.03289880](https://doi.org/10.12737/article_5afc15a191d8c6.03289880)
5. Kupryashkin V.F., Ulanov A.S., Naumkin N.I., et al. Analysis of Energy Consumption during Plowing Using a Motor-Block with Moldboard Plow. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):414-427. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.414-427>
6. Parkhomenko S.G. [Auto Coupler for Dynamometer of Mounted Agricultural Machines]. *Vestnik Belorusskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy. 2018; (3):165-167. Available at: <https://clck.ru/T8rWM> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
7. Askari M., Komarizade M.H., Nikbakht A.M. A Novel Three-Point Hitch Dynamometer to Measure the Draft Requirement of Mounted Implements. *Research in Agricultural Engineering*. 2011; 57(4):128-136. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17221/16/2011-RAE>
8. Al-Suhaibani S.A., Al-Janobi A.A., Al-Majhadi Y.N. Development and Evaluation of Tractors and Tillage Implements Instrumentation System. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2010; 3(2):363-371. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2010.363.371>
9. Parkhomenko S.G., Parkhomenko G.G. Dynamometry of Mounted Agricultural Machinery. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2016; 124(1):125-129. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27021206> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
10. Kostić M., Rakić D.Z., Ličen H.H., et al. Design and Construction of Three Point Hitch Device for Measuring Draft of Tillage Implement-Data Acquisition and Post Processing Analysis. *Journal of Food, Agriculture & Environment*. 2014; 1212(2):1300-1307. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/265789995\\_Design\\_and\\_construction\\_of\\_three\\_point\\_hitch\\_device\\_for\\_measuring\\_draft\\_of\\_tillage\\_implement\\_-Data\\_acquisition\\_and\\_post\\_processing\\_analysis](https://www.researchgate.net/publication/265789995_Design_and_construction_of_three_point_hitch_device_for_measuring_draft_of_tillage_implement_-Data_acquisition_and_post_processing_analysis) (accessed 04.02.2021). (In Eng.)
11. Mamkagh A.M. Review of Fuel Consumption, Draft Force and Ground Speed Measurements of the Agricultural Tractor during Tillage Operations. *Asian Journal of Advanced Research and Reports*. 2019; 3(4):1-9. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.9734/ajarr/2019/v3i430093>
12. Parkhomenko S.G., Parkhomenko G.G. Measurement of Tractive Effort at the Drawbar of Tractor in Aggregate with Mounted Agricultural Machine. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2016; (4):15-19. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25871252> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
13. Fedorenko V.F., Tarkivsky V.E. Digital Filtration Method for Determining Traction Power of Agricultural Tractors. *Tekhnika v selskom hozyaystve* = Machinery in Agriculture. 2019; (1):8-10. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37077512> (accessed 04.02.2021). (In Eng.)
14. Oduma O., Oluka S.I., Edoh J.Ch., et al. Development of Empirical Regression Equations for Predicting the Performances of Disc Plough and Harrow in Clay-Loam Soil. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2019; 21(3):18-25. Available at: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/5390> (accessed 04.02.2021). (In Eng.)
15. Bietresato M., Mazzetto F. Ideation, Realization and Experimentation of Prototype Device for Measuring Farm Tractor Fuel Consumption during Dyno Tests. In: Proceedings of Conference: Engineer-

ing for Rural Development, 23–25 May 2018, Jelgava. Jelgava; 2018. Pp. 362–372. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N446>

16. Syromyatnikov Yu.N. Qualitative Performance Indicators of a Ripping-and-Separating Machine for Soil Cultivation. *Selskhozajstvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2018; 12(3):38–44. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-3-38-44>

17. Kondrashov V.A., Kovalev M.M., Perov G.A., et al. Study of the Operation of a Soil Spiker with Radially Mounted Spikes on the Discs. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2019; (10):14–18. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-10-14-18>

18. Shahgholi Gh., Kanyawi N., Kalantari D. Modeling the Effects of Narrow Blade Geometry on Soil Failure Draught and Vertical Forces Using Discrete Element Method. *Yüzüncü Yıl University Journal of Agricultural Sciences* = Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences. 2019; 29(1):24–33. (In Turk.) DOI: <https://doi.org/10.29133/yyutbd.429950>

19. Okoko P., Ajav E.A., Olosunde W.A. Draft and Power Requirements for Some Tillage Implements Operating in Clay Loam Soil. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2018; 20(1): Available at: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/4563> (accessed 04.02.2021). (In Eng.)

20. Liskin I.V., Lobachevsky Ya.P., Mironov D.A., et al. Laboratory Study Results of Soil-Cutting Operating Elements. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2018; 12(4):41–47. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-4-41-47>

21. Botta G.F., Antille D.L., Bienvenido F., et al. Energy Requirements for Alleviation of Subsoil Compaction and the Effect of Deep Tillage on Sunflower (*Helianthus Annus L.*) Yield in the Western Region of Argentina's Rolling Pampa. In: Proceedings of Conference: Engineering for Rural Development, 22–24 May 2019, Jelgava. Jelgava; 2019. Pp. 174–178. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N216>

22. Mairghany M., Yahya A., Adam N.M., et al. Rotary Tillage Effects on Some Selected Physical Properties of Fine Textured Soil in Wetland Rice Cultivation in Malaysia. *Soil and Tillage Research*. 2019; 194. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104318>

23. Savelev Yu.A., Kuharev O.N., Larjushin N.P., et al. Soil Moisture Loss Reduction Owing to Evaporation. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2018; 12(1):42–47. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-1-42-47>

24. Dubovik D.V., Lazarev V.I., Aidiev A.Ya., et al. Efficiency of Various Methods of Primary Tillage and Direct Sowing During the Cultivation of Winter Wheat on Chernozem Soils. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AIC. 2019; 33(12):26–29. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-11205>

25. Colombi T., Torres L.Ch., Walter A., et al. Feedbacks between Soil Penetration Resistance, Root Architecture and Water Uptake Limit Water Accessibility and Crop Growth – A Vicious Circle. *Science of the Total Environment*. 2018; 626:1026–1035. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.129>

26. Melland A.R., Antille D.L., Dang Y.P. Effects of Strategic Tillage on Short-Term Erosion, Nutrient Loss in Runoff and Greenhouse Gas Emissions. *Soil Research*. 2016; 55(3). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1071/SR16136>

27. Dang Y.P., Balzer A., Crawford M., et al. Strategic Tillage in Conservation Agricultural Systems of North-Eastern Australia: Why, Where, When and How? *Environmental Science and Pollution Research*. 2018; 25(2):1000–1015. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8937-1>

28. Fedorenko V.F., Kireev I.M., Marchenko V.O. Research of Methods and Technical Means for Measuring the Tillage Depth when Testing Tillage Machines. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2019; (5):12–17. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-5-12-17>

29. Trubitsyn N.V., Tarkivsky V.E. A Wireless Device for Measuring the Stroke Depth of the Working Bodies for Agricultural Machines. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2019; (3):13–15. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-3-13-15>

*Submitted 14.08.2020; approved after reviewing 12.10.2020; accepted for publication 26.10.2020*

*About the authors:*

**Galina G. Parkhomenko**, Leading Researcher of the Field Mechanization Laboratory of the Plant Production Mechanization Department, Agricultural Research Center “Donskoy” (3 Nauchnyy Gorodok, Zernograd 347740, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: [D-2633-2019](#), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1944-216X>, [parkhomenko.galya@yandex.ru](mailto:parkhomenko.galya@yandex.ru)

**Igor V. Bozhko**, Researcher of the Field Mechanization Laboratory of the Plant Production Mechanization Department, Agricultural Research Center “Donskoy” (3 Nauchnyy Gorodok, Zernograd 347740, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: [E-9518-2016](#), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8423-4079>, Scopus ID: [57204682997](#), [i.v.bozhko@mail.ru](mailto:i.v.bozhko@mail.ru)

**Sergey I. Kambulov**, Senior Researcher of the Field Mechanization Laboratory of the Plant Production Mechanization Department, Agricultural Research Center “Donskoy” (3 Nauchnyy Gorodok, Zernograd 347740, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: [A-6156-2019](#), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8712-1478>, Scopus ID: [57207655797](#), [kambulov.s@mail.ru](mailto:kambulov.s@mail.ru)

**Viktor I. Pakhomov**, Head of the Department of Technology and Equipment of Product Processing of AIC, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: [Y-7085-2019](#), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>, [vnptim@gmail.com](mailto:vnptim@gmail.com)

*Contribution of the authors:*

G. G. Parkhomenko – setting the problem, determining the methodology of research, collecting analytical and practical materials on the topic of research, analysis of scientific sources on the topic of research, critical analysis and finalizing the solution.

I. V. Bozhko – text analysis and revision.

S. I. Kambulov – scientific guidance, problem setting, critical analysis, and refinement of the solution.

V. I. Pakhomov – solution conceptualization.

**Acknowledgments:** The authors express their gratitude to the anonymous reviewers.

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



## Цифровые методы обработки данных при оценке тягового усилия тракторов

В. Ф. Федоренко<sup>1</sup>, В. Е. Таркинский<sup>2\*</sup>, Н. П. Мишуров<sup>1</sup>,  
Н. В. Трубицын<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБНУ «Росинформагротех» (р. п. Правдинский, Российская Федерация)

<sup>2</sup>Новокубанский филиал ФГБНУ «Росинформагротех»  
(г. Новокубанск, Российская Федерация)

\*[tarkivskiy@yandex.ru](mailto:tarkivskiy@yandex.ru)

**Введение.** При проведении энергетической оценки сельскохозяйственных машин и тяговых испытаний тракторов важнейшим показателем является величина тягового усилия. Существующие методы определения тягового усилия тракторов подразумевают использование специализированных средств измерений, таких как тензометрические датчики и устройства обработки и отображения информации. На точность определения тягового усилия оказывают значительное влияние физико-механические свойства почвы. Для обработки полезного сигнала во время измерения тягового усилия поток данных тензометрического датчика необходимо подвергать дополнительной цифровой фильтрации с учетом условий функционирования сельскохозяйственного агрегата.

**Материалы и методы.** Проанализированы функции изменения тягового усилия, полученные на тракторе К-744Р2 на различных передачах. Разработан алгоритм цифровой обработки сигнала тензометрического силоизмерителя на основе медианного фильтра, позволяющий повысить точность измерений. Преимуществом предложенного метода является способность отсекать резкие кратковременные импульсные помехи и колебания амплитуды измеренной величины.

**Результаты исследования.** Предложен метод определения величины тягового усилия с помощью медианной обработки сигнала. Разработано устройство для определения тягового усилия при испытаниях сельскохозяйственных тракторов и агрегатов. Обоснован выбор основных компонентов устройства определения величины тягового усилия. В результате исследований было сконструировано и изготовлено устройство для измерения и цифровой обработки сигнала силоизмерителя на базе микроконтроллера и специализированного программного обеспечения для обработки исходных данных в реальном времени.

**Обсуждение и заключение.** Разработанный метод позволяет исключить негативный эффект импульсных помех, возникающих в процессе измерения тягового усилия трактора. Предложенное устройство для измерения тягового усилия тракторов совместимо на уровне протокола обмена с существующими устройствами, обладает высокой скоростью работы в реальном времени, имеет многоканальный режим.

**Ключевые слова:** испытания, тяговое усилие, цифровой фильтр, импульсные помехи, тензометрический силоизмеритель, измерительная система

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

© Федоренко В. Ф., Таркинский В. Е., Мишуров Н. П., Трубицын Н. В., 2021



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

*Для цитирования:* Цифровые методы обработки данных при оценке тягового усилия тракторов / В. Ф. Федоренко, В. Е. Таркивский, Н. П. Мишуров, Н. В. Трубицын. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202101.127-142](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.127-142) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 1. – С. 127–142.

*Original article*

## Digital Data Processing Methods for Estimating Tractive Force of Tractors

V. F. Fedorenko<sup>a</sup>, V. E. Tarkivskiy<sup>b\*</sup>, N. P. Mishurov<sup>a</sup>,  
N. V. Trubitsyn<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Rosinformagrotech (Pravdinskiy, Russian Federation)*

<sup>b</sup>*Novokubansk Branch of Rosinformagrotech (Novokubansk, Russian Federation)*

\*[tarkivskiy@yandex.ru](mailto:tarkivskiy@yandex.ru)

**Introduction.** When carrying out an energy assessment of agricultural machines and traction tests of tractors, the most important indicator is the value of the tractive effort. The existing methods for determining the tractive effort of tractors imply the use of specialized measuring instruments, such as strain gauges and devices for processing and displaying information. The accuracy of determining the tractive effort is significantly influenced by the physical and mechanical properties of soil. To process the useful signal during the measurement of tractive effort, the data stream of the strain gauge sensor must be subjected to additional digital filtering taking into account the operating conditions of the agricultural unit.

**Materials and Methods.** The functions of changing the tractive effort obtained on the K-744R2 tractor in various gears have been analyzed. An algorithm for digital processing of the signal of a strain gauge force meter based on a median filter has been developed that makes it possible to increase the measurement accuracy. The advantage of the proposed method is the ability to cut off sharp short-term impulse noise and sharp fluctuations in the amplitude of the measured value.

**Results.** A method for determining the amount of tractive effort using median signal processing has been proposed. A device for determining the tractive effort during testing of agricultural tractors and units has been developed. The choice of the main components of the device for determining the magnitude of the tractive effort has been substantiated. As a result of the research, a device for measuring and digital processing of the signal of a force meter based on a microcontroller and specialized software for processing initial data in real time was designed and manufactured.

**Discussion and Conclusion.** The developed method makes it possible to exclude the negative effect of impulse noise arising in the process of measuring the tractive effort of the tractor. The proposed device for measuring the tractive effort of tractors is compatible at the level of the exchange protocol with existing devices, has a high speed of operation in real time, multi-channel operation.

**Keywords:** tests, tractive force, digital filter, pulse interference, strain gauge, measuring system

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

**For citation:** Fedorenko V.F., Tarkivskiy V.E., Mishurov N.P., et al. Digital Data Processing Methods for Estimating Tractive Force of Tractors. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(1):127-142. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.127-142>





## Введение

При испытаниях сельскохозяйственных тракторов с целью определения их характеристик важным условием является установившийся режим работы при номинальном тяговом усилии. Экспериментальный и расчетный методы определения номинального тягового усилия тракторов сельскохозяйственного назначения отражены в межгосударственном стандарте ГОСТ 27021-86<sup>1</sup>.

Экспериментальный метод заключается в определении номинального тягового усилия при испытаниях на невзлущенной стерне озимых колосовых в соответствии с межгосударственным стандартом определения тяговых показателей<sup>2</sup>. В этом стандарте определены общие требования к испытываемому трактору и точности средств измерения для определения показателей. Также сделан акцент на требованиях к линии действия тягового усилия, которая должна быть горизонтальной и лежать в продольной плоскости симметрии трактора, отклонение не должно превышать 3°.

Наибольшую точность при определении тягового усилия, развиваемого трактором в реальном времени, дает метод прямого измерения. Он заключается в использовании силоизмерителя, устанавливаемого в соответствии с требованиями [1; 2]. Сигнал, полученный от силоизмерителя, увеличивается аппаратным усилителем. Далее нормализуется аппаратно-программным устройством, где убираются помехи и паразитные шумы. И, наконец, аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) превращает значение напряжения сигнала в числовой двоичный код, который используется при расчете показателей.

В стандартах на испытания тракторов определено, что начинать измерения тягового усилия можно только после обеспечения стабильного режима работы, но методы получения тягового усилия не конкретизируются. Также отсутствуют алгоритмы расчета значений тягового усилия в зависимости от режимов работы трактора (скорости, тягового усилия, буксования) и почвенного фона, которые обеспечивали бы высокую точность измерений и возможность получения информации непосредственно во время испытаний [3].

Широко распространенные в НИИ, вузах и системе испытаний сельскохозяйственной техники Минсельхоза России измерительные информационные системы для испытаний ИП-264 основаны на модулях ввода аналоговых сигналов I-7016 фирмы ICP или аналогичных. Частота преобразования аналоговых сигналов у них составляет 10 с<sup>-1</sup>. Модуль имеет 24-разрядный сигма-дельта АЦП и внутренний нормализатор входных сигналов в диапазоне от -20 до +20 мВ. В 1970–80-х годах было найдено широкое применение измерительным системам ЭМАП и ЭМАПМ. Частота преобразования сигналов тензометрических датчиков у них также составляла 10 с<sup>-1</sup> [4].

Во время проведения испытаний измерительная система аккумулирует и усредняет полученные значения напряжения аналогового сигнала, сформированного силоизмерительным датчиком.

Так как почва на участке испытаний в силу своей природы не является однородной, это может привести к резким изменениям значений тягового усилия. При использовании обычного усреднения эти скачки значений могут оказать

<sup>1</sup> ГОСТ 27021-86. Тракторы сельскохозяйственные и лесохозяйственные. Тяговые классы. М., 1986. 6 с.

<sup>2</sup> ГОСТ 30745-2001 (ИСО 789-9-90). Тракторы сельскохозяйственные. Определение тяговых показателей. М., 2002. 22 с.

существенное влияние на конечный результат. Исходя из вышесказанного, важной задачей при прямом измерении тягового усилия с помощью тензометрического силоизмерителя является разработка дополнительного метода обработки значений в реальном времени с целью отсеки значительных выбросов с учетом характера среды, где происходит измерение.

Цель работы – совершенствование технологии измерения величины тягового усилия во время испытаний сельскохозяйственных тракторов и агрегатов на основе цифровой обработки сигнала тензометрического силоизмерителя.

### Обзор литературы

Анализ отечественной и зарубежной литературы, посвященной точным измерениям с использованием тензометрических силоизмерителей, показывает, что комплексный подход повышения качества измерений включает в себя аппаратные и программные решения, которые комбинируются в той или иной степени. Для компенсации смещения нуля (разбалансировки тензометрического моста) и устранения негативного влияния длины проводов между датчиком и измерительной системой применяются различные варианты подключения, каскад усилителей, дополнительное измерение напряжения возбуждения датчика и т. д. Существуют различные аппаратные решения для повышения точности измерений, например, использование дополнительного АЦП, измеряющего величину компенсации сигнала длины информационных проводов между измерительной системой и датчиком [5–8]. Такие решения при испытаниях сельскохозяйственной техники применяются редко, так как требуют существенного усложнения аппаратной и программной частей измерительного комплекса, дополнительных проводов между датчиком и измерительной системой и служат только для

нейтрализации влияния электромагнитной составляющей помехи при измерении сигнала [9–12].

С целью выполнения задачи обработки сигнала от датчика до получателя последовательность данных необходимо преобразовать. Сигнал преобразуется в соответствии с алгоритмом, реализующим конкретную математическую задачу. Устройства, или программные алгоритмы обработки сигнала, называются фильтрами. Они бывают аппаратными и программными. Их характеристики выражаются в виде изменений таких параметров сигнала, как частота, фаза или амплитуда.

Цифровой обработке сигналов посвящены многочисленные исследования, основная цель которых улучшение качества полезного сигнала из последовательности данных, а также подавление вредных сигналов в входящих последовательностях отсчетов [13–15].

В зарубежной литературе предлагаются варианты обработки цифровых данных с помощью различных вариантов фильтров Калмана [16–19]. Такой подход имеет ряд недостатков, так как фильтры Калмана требуют предварительной настройки в зависимости от характера обрабатываемого сигнала, а также предъявляют высокие требования к аппаратной части (высокая производительность, объем памяти). Эти недостатки не позволяют использовать фильтры Калмана при обработке данных датчика тягового усилия трактора.

На рисунке 1 показаны графики зависимости значений тягового усилия, развиваемого трактором К-744Р2 на различных передачах. Диаграммы получены измерительной информационной системой ИП-264 без предварительной обработки с частотой преобразования  $10 \text{ с}^{-1}$ .

Для анализа функции сигнала тягового усилия применялось дискретное преобразование Фурье. С его помощью

можно преобразовать сигнал из временной области в частотную и представить любую функцию в виде набора гармонических сигналов разных частот.

На рисунке 2 представлены гистограммы плотности распределения вероятностей функции изменения тягового усилия.

На рисунке 3 представлены графики распределения частот по спектру сигнала датчика тягового усилия.

Из гистограмм на рисунке 2 следует, что вероятность изменения тягового сопротивления при установившемся режиме подчиняется нормальному закону распределения.

Как следует из зависимостей на рисунке 3, выбросы имеют случайный характер в диапазоне частот до 10 Гц. При этом амплитуда может достигать 97 кН, что при использовании обычного усреднения сигнала может существенно повлиять на результат измерения.

Для обработки сигнала тензометрического датчика тягового усилия предлагается применить алгоритм медианной фильтрации [20; 21].

Алгоритм медианной фильтрации выглядит следующим образом:

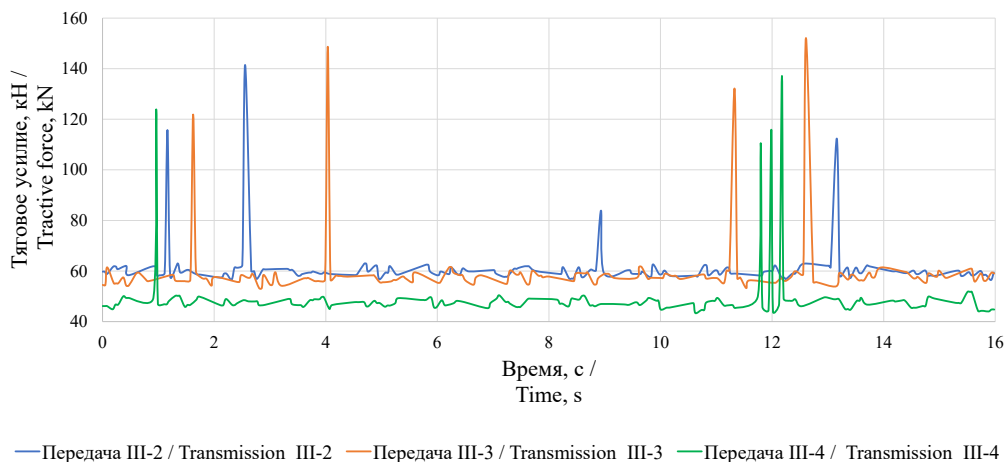
1) новое значение поступает в последовательный буфер, имеющий нечетный размер  $K$ , смещая все остальные на один шаг;

2) с помощью алгоритма быстрой сортировки значения в буфере перераспределяются по возрастанию или убыванию;

3) выходное значение фильтра принимается как элемент буфера со средним индексом  $K/2 + 1$ .

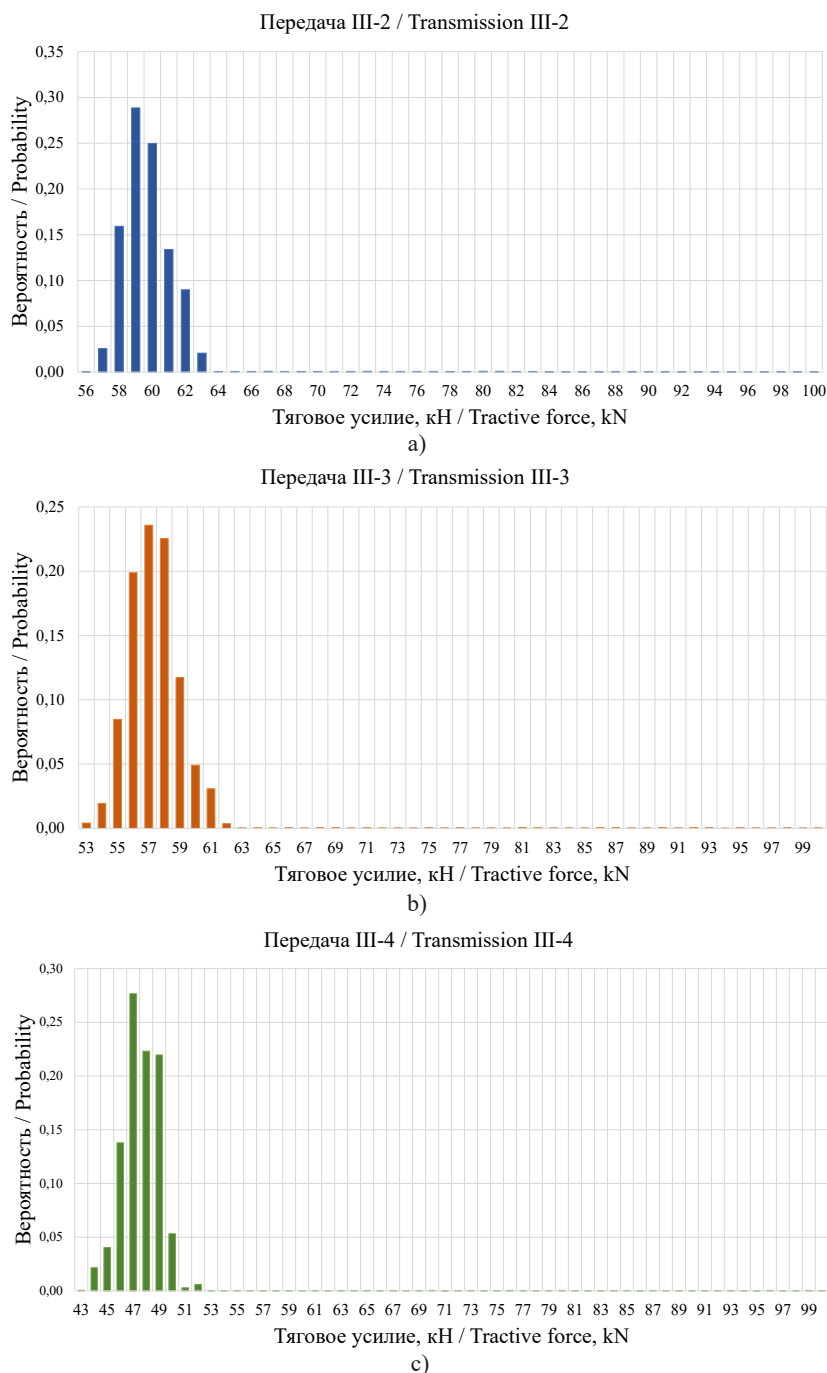
В случае использования буфера четной длины за результирующее значение принимается среднее двух соседних элементов с индексами  $K/2$  и  $K/2 + 1$ .

Алгоритм медианной фильтрации имеет ряд преимуществ по сравнению с фильтрами Калмана: эффективно удаляет импульсные помехи при высокочастотной оцифровке сигналов тензометрических датчиков, значения которых резко выделяются на фоне основного потока данных; нелинейный, что позволяет использовать его для обработки рядов данных неоднородных и нестационарных процессов, например при измерении тягового усилия трактора; прост в программной реализации и не требует производительной аппаратной части.



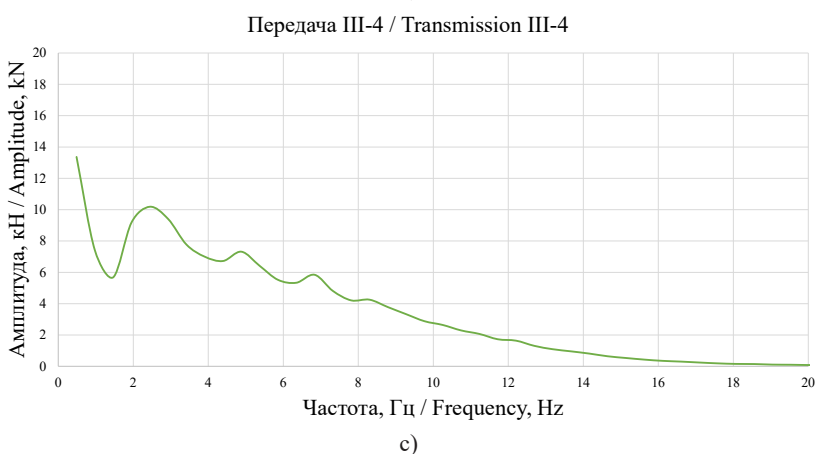
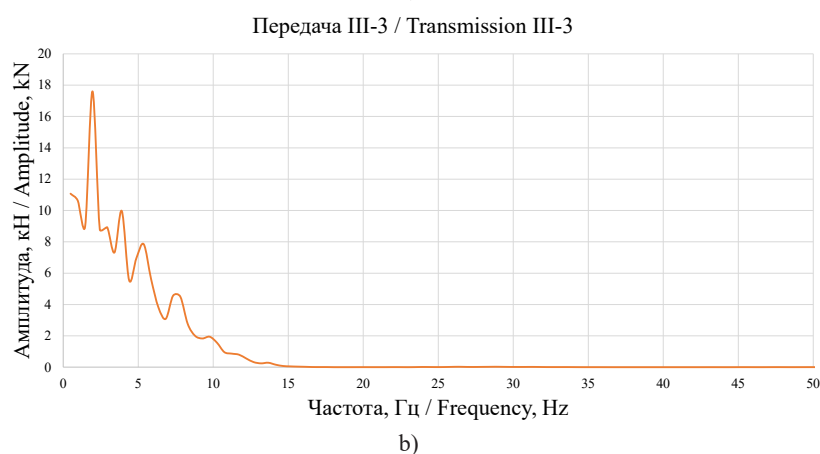
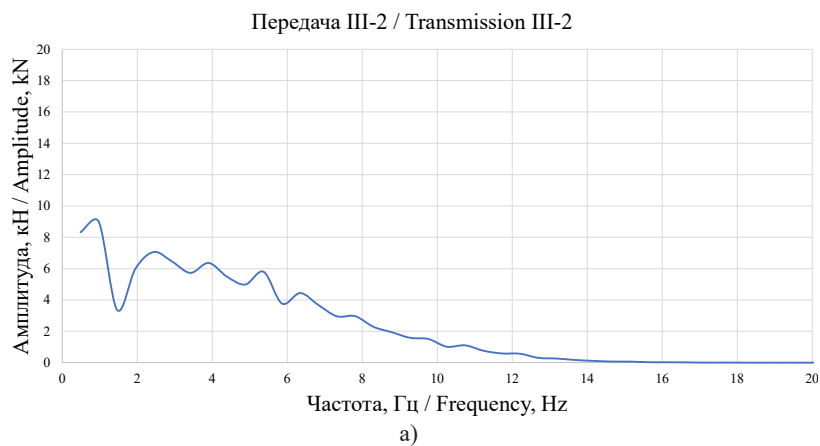
Р и с. 1. Графики значений тягового усилия трактора К-744Р2

F i g. 1. Graphs of tractor traction force values K-744P2



Р и с. 2. Гистограммы плотности распределения вероятностей:  
а) передача III-2; б) передача III-3; в) передача III-4

F i g. 2. Density histograms of the probability distribution:  
a) transmission III-2; б) transmission III-3; в) transmission III-4



Р и с. 3. Графики спектральной плотности сигнала датчика тягового усилия:  
а) передача III-2; б) передача III-3; в) передача III-4

F i g. 3. Graphs of the spectral density of the tractive effort sensor signal:  
а) transmission III-2; б) transmission III-3; в) transmission III-4



## Материалы и методы

Для проверки разработанного метода определения тягового усилия были проведены экспериментальные исследования, включающие следующие этапы:

1) разработка микропроцессорного устройства для определения тягового усилия трактора;

2) реализация алгоритма обработки данных в режиме реального времени в устройстве для определения тягового усилия;

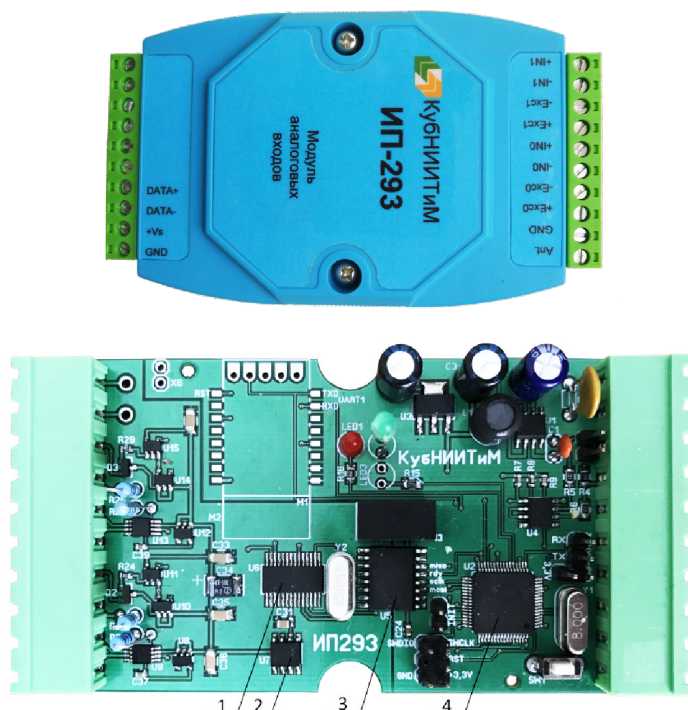
3) проведение измерений на тракторе, оборудованном устройством для определения тягового усилия;

4) анализ полученных результатов.

В результате исследований разработано измерительное устройство «Модуль

аналоговых входов ИП-293» для измерения величины тягового усилия трактора. Высокопроизводительный микропроцессор STM32 позволяет обрабатывать входной поток данных в режиме реального времени с помощью адаптивного цифрового фильтра. Частота преобразования сигнала тензодатчика достигает 2 кГц. Модуль имеет стандартные размеры и может устанавливаться в любой измерительной системе вместо модулей типа ICP или ADAM. Также поддерживаются протоколы связи DCON и Modbus.

Для преобразования сигнала датчика в цифровой вид служит микросхема АЦП AD7734, которая представляет собой сигма-дельта АЦП или АЦП с балансировкой заряда.



Р и с. 4. Модуль аналоговых входов ИП-293: 1 – четырехканальное АЦП AD7734; 2 – преобразователь интерфейсов UART-RS485; 3 – модуль буферной памяти Micron M25P80; 4 – процессор STM32F405RG

F i g. 4. Analog input module IP-293: 1 – 4-channel ADC AD7734; 2 – interface converter UART-RS485; 3 – Micron M25P80 Buffer Memory Module; 4 – processor STM32F405RG

Благодаря низкому уровню собственного шума сигма-дельта АЦП достигают высокой точности преобразования аналогового сигнала в цифровой. Для достижения высокой точности преобразования необходимо, чтобы частота работы цифрового фильтра была ниже частоты работы сигма-дельта модулятора, поэтому сигма-дельта АЦП имеют относительно низкую скорость преобразования (до 2 000 с<sup>-1</sup>).

Для расчета значений датчика тягового усилия применен контроллер STM32F405RG с «прошитой» программой цифровой фильтрации на основе предложенного алгоритма. Краткая техническая характеристика модуля аналоговых входов ИП-293 представлена в таблице 1.

В модуле имеется возможность записи напрямую во встроенную память модуля ИП-293 с частотой 2 000 преобразований в секунду одновременно по двум каналам. Емкость внутренней памяти на 30 мин непрерывной записи.

Также значения тягового усилия могут передаваться в режиме «запрос-

ответ» по протоколу Modbus RTU или DCON. Так как модули могут объединяться в сеть на основе интерфейса связи RS-485, у каждого модуля должен быть индивидуальный адрес от 0 до 99. Программное обеспечение модуля ИП-293 датчика написано в среде разработки MikroElektronika MikroC [22].

Проверка разработанного модуля и цифрового фильтра обработки была произведена на тракторе К-744 в агрегате с тяговой тележкой УВТН-100. Для измерения тягового усилия трактора использовался тензометрический силоизмеритель на 100 кН, подключенный к модулю ИП-293, установленному в измерительной системе СИ-302 (ИП-264).

### Результаты исследования

В результате проведенных экспериментальных исследований были получены графики-зависимости изменения тягового усилия трактора К-744Р2 на передачах III-2, III-3 и III-4 во время тяговых испытаний. Они обработаны с помощью цифрового фильтра в модуле аналогового ввода ИП-293 (рис. 4).

Таблица 1

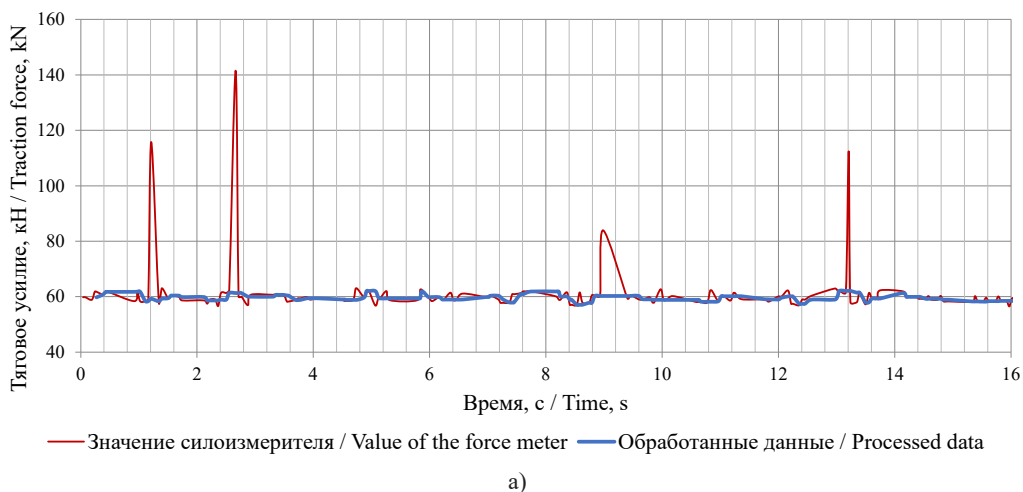
Table 1

### Краткая техническая характеристика модуля аналоговых входов ИП-293

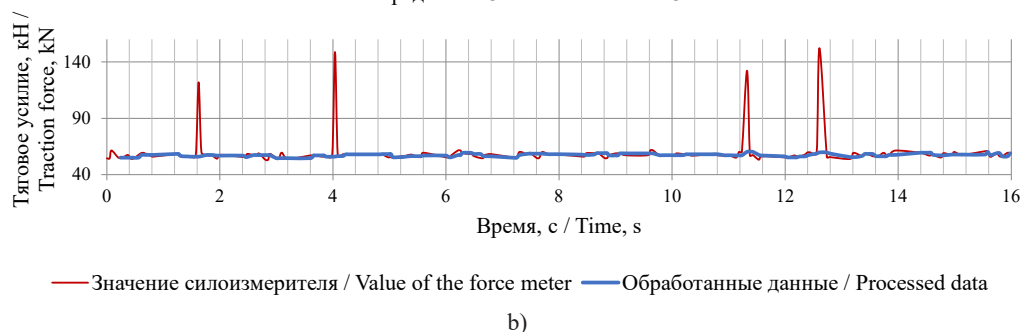
#### Brief technical characteristics of the analog input module IP-293

Показатели / Indicators	Значения / Indicator values
Напряжение питания, В / Supply voltage, V	10–30
Максимальная потребляемая мощность, Вт / Maximum power consumption, W	3
Количество аналоговых входов, ед. / Number of analog inputs, unit	2
Характеристики АЦП / ADC Specifications: – тип преобразования / type of conversion – разрядность, бит / resolution, bit – скорость преобразования, с <sup>-1</sup> / conversion rate, c <sup>-1</sup>	Сигма-дельта / Sigma-delta 24 2 000
Напряжение питания датчиков, В / Sensor supply voltage, V	5
Интерфейс связи / Communication interface	RS-485
Габаритные размеры, мм / Overall dimensions, mm	120 × 70 × 35
Масса, г / Weight, g	130
Рабочий диапазон температур окружающей среды, °C / Operating ambient temperature range, °C	0–55

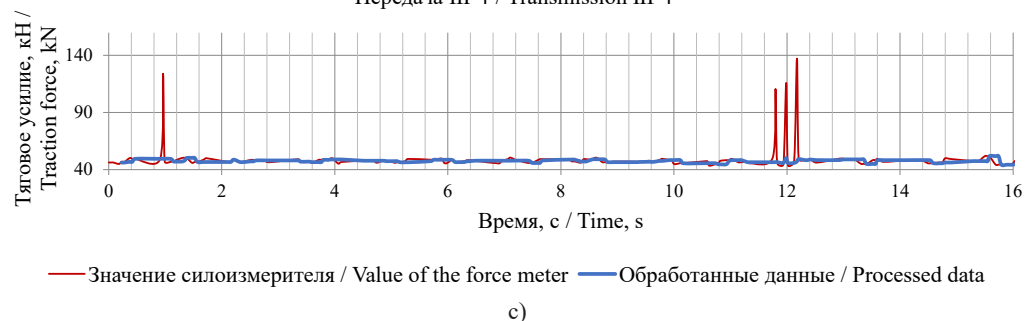
## Передача III-2 / Transmission III-2



## Передача III-3 / Transmission III-3



## Передача III-4 / Transmission III-4



Р и с. 5. Графики исходных и обработанных цифровым фильтром значений тягового усилия трактора К-744Р2: а) передача III-2; б) передача III-3; в) передача III-4

F i g. 5. Graphs of source and processed by digital filter values of traction of the tractor K-744P2: а) transmission III-2; б) transmission III-3; в) transmission III-4

На передаче III-2 (рис. 5a) отмечено шесть кратковременных выбросов значений тягового усилия, при этом пиковое значение достигает 154 кН при установившемся значении тягового усилия  $\approx 60$  кН. После обработки цифровым фильтром выбросов больше нет. На передаче III-3 (рис. 5b) отмечено четыре кратковременных выброса значений тягового усилия, при этом пиковое значение достигает 152 кН при установившемся значении тягового усилия  $\approx 57$  кН. После обработки выбросы отсутствуют. На передаче III-4 (рис. 5c) отмечено четыре кратковременных выброса значений тягового усилия, при этом пиковое значение достигает 137 кН при установившемся значении тягового усилия  $\approx 48$  кН.

В таблице 2 приведены результаты экспериментальных исследований.

### Обсуждение и заключение

После обработки сигнала разработанным цифровым фильтром изменилась в сторону уменьшения амплитудная характеристика, но при этом частотная осталась без изменений. Резко уменьшилась дисперсия и коэффициент вариации за счет отсека пиков.

Предложенные решения для определения тягового усилия трактора при испытаниях имеют следующие преимущества:

- эффективная работа цифрового фильтра по отсеку импульсных помех;
- несложный алгоритм предложенного цифрового фильтра, который позволяет реализовывать его на маломощных микроконтроллерах;
- возможность функционирования фильтра в режиме реального времени;

Т а б л и ц а 2

Table 2

**Результаты применения цифрового фильтра при измерении тягового усилия трактора**  
**Results of applying a digital filter when measuring tractor traction**

Диапазон, передача / Range, transmission	Параметр / Parameter				
	Среднее, кН / Average, kN	Размах колебаний, кН / Fluctuation change, kN	Дисперсия, кН <sup>2</sup> / Dispersion, kN <sup>2</sup>	Стандартное отклонение, кН / Standard deviation, kN	Коэффициент вариации, % / The coefficient of variation, %
III-2: – значения силоизмерителя / force meter values – обработанные цифровым фильтром / digitally filtered	61,525	97,837	143,363	11,973	20,461
	59,524	5,054	1,358	1,165	1,957
III-3: – значения силоизмерителя / force meter values – обработанные цифровым фильтром / digitally filtered	59,149	98,888	152,201	12,337	20,857
	57,337	5,586	1,702	1,305	2,275
III-4: – значения силоизмерителя / force meter values – обработанные цифровым фильтром / digitally filtered	49,028	93,725	118,269	10,875	22,181
	47,470	7,482	1,988	1,410	2,970

– многоканальная реализация модуля аналогового ввода ИП-293, что позволяет подключать к нему одновременно несколько независимых датчиков;

– полная физическая и электрическая совместимость модуля ИП-293 с аналогичными модулями типа I-7016, что позволяет устанавливать его в штатное место измерительной информационной системы;

– совместимость на уровне протокола обмена данными с аналогами, что помогает использовать штатное программное обеспечение измерительных информационных систем;

– возможность непрерывной записи во внутреннюю память модуля ИП-293 процесса измерений.

Применение разработанного модуля аналогового ввода ИП-293 со встроенным цифровым фильтром обработки сигнала датчика тягового усилия позволяет: повысить точность измерения тягового усилия независимо от скорости движения агрегата и почвенного фона; сократить время испытаний сельскохозяйственных тракторов и машин за счет возможности мониторинга режима работы агрегата в реальном времени.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Трубицын, Н. В. Современные микропроцессорные системы для разработки средств испытаний / Н. В. Трубицын, В. Е. Таркинский // Техника и оборудование для села. – 2013. – № 12. – С. 31–32. – URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/download/60-arkhiv-zhurnala-za-2013/401-tehnika-i-oborudovanie-dlya-sela-dekabr-12-198-2013-g> (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

2. Арженовский, А. Г. Метод получения тяговой характеристики трактора в эксплуатационных условиях / А. Г. Арженовский, Д. С. Козлов, Н. А. Петрищев. – DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-5-25-30 // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2018. – № 5. – С. 25–30. – URL: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/287> (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

3. Джаббаров, Н. И. Оценка тягово-динамических показателей почвообрабатывающих агрегатов / Н. И. Джаббаров, Д. А. Максимов, Г. А. Семенова // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2017. – № 93. – С. 53–64. – URL: <https://e.lanbook.com/reader/journalArticle/401479/#1> (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

4. Уникальная система / В. Ф. Федоренко, Н. В. Трубицын, В. Е. Таркинский, М. В. Сазонов // Информационный бюллетень. – 2017. – № 8. – С. 45–47. – URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/byulleten/arkhiv-vypuskov/download/35-arkhiv-vypuskov-za-2017-god/317-avgust> (дата обращения: 08.02.2021).

5. Метод повышения точности измерения тягового сопротивления в навесном устройстве трактора / Р. А. Косульников, А. А. Карсаков, С. Д. Фомин, Е. А. Назаров // Известия нижегородского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2018. – № 1 (49). – С. 326–333. – URL: [http://www.volgau.com/Portals/0/izv\\_auk/izv\\_auk\\_full/izvestiya\\_2018\\_49\\_1.pdf?ver=2018-03-26-143653-023](http://www.volgau.com/Portals/0/izv_auk/izv_auk_full/izvestiya_2018_49_1.pdf?ver=2018-03-26-143653-023) (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

6. Шилин, Д. В. Повышение точности взвешивания сыпучих материалов на поточном расходомере-дозаторе с двумя тензометрическими датчиками / Д. В. Шилин, Д. А. Шестов, П. Е. Ганин. – DOI 10.24160/1993-6982-2019-3-116-123 // Вестник Московского энергетического института. – 2019. – № 3. – С. 116–123. – URL: <http://vestnik.mpei.ru/index.php/vestnik/article/view/446> (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

7. Пахоменков, Ю. М. Преобразователь сигналов мостовых тензометрических датчиков / Ю. М. Пахоменков // Системы управления и обработки информации. – 2017. – № 1. – С. 80–93. –





URL: <https://www.avrorasystems.com/upload/iblock/ef2/ef288dc4bda27d1b9dd828ef1786c97e.pdf> (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

8. **Зеленцов, Ю. А.** Исследование влияния схем термокомпенсации дрейфа начального разбаланса мостовых схем на выходной сигнал тензометрического датчика / Ю. А. Зеленцов, В. Ю. Зеленцов // Метрология. – 2007. – № 4. – С. 39–47. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15245956> (дата обращения: 08.02.2021).

9. **Костюченко, В. И.** Удельное тяговое усилие колесного трактора, оптимальное по тяговому КПД / В. И. Костюченко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2011. – № 31. – С. 49–53. – URL: [https://www.susu.ru/sites/default/files/v\\_31\\_248\\_2011.pdf](https://www.susu.ru/sites/default/files/v_31_248_2011.pdf) (дата обращения: 08.02.2021).

10. **Лашова, С. С.** Вывод зависимости относительного удлинения, возникающего в тензометрическом датчике от его геометрических параметров / С. С. Лашова, В. И. Клевеко // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2017. – Т. 2. – С. 115–120. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35090189> (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

11. **Мельник, В. И.** Согласование тяговых возможностей трактора и рабочего сопротивления почвообрабатывающих машин / В. И. Мельник, С. А. Чигрина // Инженерія природокористування. – 2016. – № 2 (6). – С. 113–118. – URL: <http://enm.khntusg.com.ua/index.php/enm/article/view/178/144> (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

12. **Арженовский, А. Г.** Совершенствование методов и средств определения тягово-динамических и топливно-экономических показателей трактора в эксплуатационных условиях / А. Г. Арженовский // Тракторы и сельхозмашины. – 2017. – № 11. – С. 29–35. – URL: [https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory\\_i\\_selhormashiny\\_No11\\_2017\\_dlya\\_sajta.pdf](https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory_i_selhormashiny_No11_2017_dlya_sajta.pdf) (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

13. Анализ функции преобразования датчика линейной плотности волокнистой ленты тензометрического типа / В. А. Авроров, В. В. Волков, В. С. Николаев, М. В. Горюнова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2009. – № 2. – С. 83–86. – URL: [https://tvp.ivgpu.com/?page\\_id=2526](https://tvp.ivgpu.com/?page_id=2526) (дата обращения: 08.02.2021).

14. **Куликова, М. В.** Численные методы нелинейной фильтрации для обработки сигналов и измерений / М. В. Куликова, Г. Ю. Куликов // Вычислительные технологии. – 2016. – Т. 21, № 4. – С. 64–98. – URL: <http://www.ict.nsc.ru/jct/getfile.php?id=1744> (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

15. Теоретические предпосылки создания математической модели тягового КПД трактора / К. А. Хафизов, Р. Н. Хафизов, А. А. Нурмиев, И. Г. Галиев. – DOI 10.12737/article\_5db9748fc053c2.28431294 // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2019. – Т. 14, № 3 (54). – С. 116–121. – URL: <https://naukaru.ru/en/nauka/article/33457/view> (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

16. Transducers for Measurement of Draft and Torque of Tractor-implement System / C. R. Chethan, V. K. Tewari, B. Nare, S. P. Kumar // Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. – 2018. – Vol. 49, No. 4. – Pp. 81–87. – URL: <https://clck.ru/TCgBc> (дата обращения: 08.02.2021).

17. **Rovira-Más, F.** Sensor Architecture and Task Classification for Agricultural Vehicles and Environments / F. Rovira-Más. – DOI 10.3390/s101211226 // Sensors. – 2010. – Vol. 10, Issue 12. – Pp. 11226–11247. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/10/12/11226> (дата обращения: 08.02.2021).

18. **Marcovich, L. A.** Inferences from Optimal Filtering Equation / L. A. Marcovich. – DOI 10.1007/s10986-015-9289-5 // Lithuanian Mathematical Journal. – 2015. – № 7. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10986-015-9289-5> (дата обращения: 08.02.2021).

19. **Kulikova, M. V.** Constructing Numerically Stable Kalman Filter-Based Algorithms for Gradient-Based Adaptive Filtering / M. V. Kulikova, J. V. Tsyganova. – DOI 10.1002/acs.2552 // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. – 2015. – Vol. 29, Issue 11. – Pp. 1411–1426. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/acs.2552> (дата обращения: 08.02.2021).

20. **Таркивский, В. Е.** Цифровая обработка данных при тензометрировании сельскохозяйственной техники / В. Е. Таркивский, Н. В. Трубицын // Техника и оборудование для села. – 2016. – № 1. – С. 28–30. – URL: <https://clck.ru/TPwuP> (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

21. **Федоренко, В. Ф.** Метод цифровой фильтрации при определении тягового усилия сельскохозяйственных тракторов / В. Ф. Федоренко, В. Е. Таркинский // Техника и оборудование для села. – 2019. – № 1. – С. 8–10. – URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/content/mera-259-2> (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

22. **Таркинский, В. Е.** Программное обеспечение измерительных информационных систем для испытаний сельскохозяйственной техники / В. Е. Таркинский, Н. В. Трубицын, Е. С. Воронин. – DOI [10.33267/2072-9642-2019-9-12-15](https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-9-12-15) // Техника и оборудование для села. – 2019. – № 1. – С. 12–15. – URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/content/mera-267-2> (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

*Поступила 17.08.2020; одобрена после рецензирования 20.10.2020; принята к публикации 27.10.2020*

*Об авторах:*

**Федоренко Вячеслав Филиппович**, научный руководитель ФГБНУ «Росинформагротех» (141261, Российская Федерация, р. п. Правдинский, ул. Лесная, д. 60), академик РАН, доктор технических наук, профессор, Researcher ID: [A-9022-2018](https://orcid.org/0000-0001-6398-4463), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6398-4463>, [fedorenko@rosinformagrotech.ru](mailto:fedorenko@rosinformagrotech.ru)

**Таркинский Виталий Евгеньевич**, заведующий лабораторией разработки средств измерений и программного обеспечения Новокубанского филиала ФГБНУ «Росинформагротех» (352243, Российская Федерация, г. Новокубанск, ул. Красная, д. 15), доктор технических наук, Researcher ID: [W-4417-2017](https://orcid.org/0000-0002-8488-0011), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8488-0011>, [tarkivskiy@yandex.ru](mailto:tarkivskiy@yandex.ru)

**Мишуров Николай Петрович**, заместитель директора по научной работе ФГБНУ «Росинформагротех» (141261, Российская Федерация, р. п. Правдинский, ул. Лесная, д. 60), кандидат технических наук, Researcher ID: [A-8970-2018](https://orcid.org/0000-0002-1058-6952), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1058-6952>, [mishurov@rosinformagrotech.ru](mailto:mishurov@rosinformagrotech.ru)

**Трубицын Николай Владимирович**, ведущий научный сотрудник Новокубанского филиала ФГБНУ «Росинформагротех» (352243, Российская Федерация, г. Новокубанск, ул. Красная, д. 15), кандидат технических наук, Researcher ID: [W-4426-2017](https://orcid.org/0000-0001-7451-9831), ORCID: [http://orcid.org/0000-0001-7451-9831](https://orcid.org/0000-0001-7451-9831), [trubicin@yandex.ru](mailto:trubicin@yandex.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

В. Ф. Федоренко – научное руководство, формулирование основной концепции исследования.

В. Е. Таркинский – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, проведение экспериментальных исследований, критический анализ полученных результатов, подготовка начального варианта текста и формирование выводов.

Н. П. Мишуров – формулирование основной концепции исследования, доработка текста.

Н. В. Трубицын – литературный и патентный анализ, проведение экспериментальных исследований, редактирование текста.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Trubitsin N.V., Tarkivsky V.E. Modern Microprocessor Systems for Testing Facilities Development. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2013; (12):31-32. Available at: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/download/60-arkhiv-zhurnala-za-2013/401-tehnika-i-oborudovanie-dlya-sela-dekabr-12-198-2013-g> (accessed 08.02.2021). (In Russ.)

2. Arzhenovskiy A.G., Kozlov D.S., Petrishchev N.A. Determining the Traction Characteristic of a Tractor in Operating Conditions. *Selskokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2018; (5):25-30. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-5-25-30>



3. Dzhabborov N.I., Maksimov D.A., Semenova G.A. Assessment of Traction and Dynamic Indicators of Soil Tilling Units. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktov rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies and Technical Means of Mechanized Production of Crop and Livestock Products. 2017; (93):53-64. Available at: <https://e.lanbook.com/reader/journalArticle/401479/#1> (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
4. Fedorenko V.F., Trubitsyn N.V., Tarkivskiy V.Ye., et al. [Unique system]. *Informatsionnyy byulleten* = Newsletter. 2017; (8):45-47. Available at: <https://rosinformagrotech.ru/data/byulleten/arkhiv-vypuskov/download/35-arkhiv-vypuskov-za-2017-god/317-avgust> (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
5. Kosulnikov R.A., Karsakov A.A., Fomin S.D., et al. Method of Increasing the Accuracy of Measurement of the Drive Resistance in the Outboard Accessories of the Tractor. *Izvestiya nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie* = Proceedings of Nizhnevolzhskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education. 2018; (1):326-333. Available at: [http://www.volgau.com/Portals/0/izv\\_auk/izv\\_full/izvestiya\\_2018\\_49\\_1.pdf?ver=2018-03-26-143653-023](http://www.volgau.com/Portals/0/izv_auk/izv_full/izvestiya_2018_49_1.pdf?ver=2018-03-26-143653-023) (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
6. Shilin D.V., Shestov D.A., Ganin P.E. Improving the Accuracy of Weighing Bulk Materials in a Dispenser On-Stream Flow Meter with Two Strain Gauges. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta* = Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. 2019; (3):116-123. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2019-3-116-123>
7. Pahomenkov Y.M. Converter Signals of the Bridge Strain Gauges. *Sistemy upravleniya i obrabotki informatsii* = Control and Information Processing Systems. 2017; (1):80-93. Available at: <https://www.avrorasystems.com/upload/iblock/ef2/ef288dc4bda27d1b9dd828ef1786c97e.pdf> (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
8. Zelentsov Yu.A., Zelentsov V.Yu. [Investigation of the Effect of Thermal Compensation Schemes for Initial Unbalance Drift of Bridge Circuits on the Output Signal of a Strain Gauge]. *Metrologiya* = Metrology. 2007; (4):39-47. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15245956> (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
9. Kostyuchenko V.I. [Specific Traction Force of the Wheeled Tractor, Optimal in Terms of Traction Efficiency]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta* = South Ural State University Bulletin. 2011; (31):49-53. Available at: [https://www.susu.ru/sites/default/files/v\\_31\\_248\\_2011.pdf](https://www.susu.ru/sites/default/files/v_31_248_2011.pdf) (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
10. Lashova S.S., Kleveko V.I. Derivation of the Dependence of the Relative Elongation Arising in the Strain Gauge Sensor on Its Geometric Parameters. *Sovremennye tekhnologii v stroitelstve. Teoriya i praktika* = Modern Technologies in Construction. Theory and Practice. 2017; 2:115-120. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35090189> (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
11. Melnik V.I., Chygryna S.A. Matching Tractor Traction Capabilities and Working Resistance Tillers. *Inzheneriya prirodokoristuvannya* = Engineering of Nature Management. 2016; (2):113-118. Available at: <http://enm.khntusg.com.ua/index.php/enm/article/view/178/144> (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
12. Arzhenovskiy A.G. Development of Methods and Means for Determining Traction-Dynamic and Fuel-Economic Parameters of the Tractor under Operating Conditions. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2017; (11):29-35. Available at: [https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory\\_i\\_selkhoz mashiny\\_No11\\_2017\\_dlya\\_sajta.pdf](https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory_i_selkhoz mashiny_No11_2017_dlya_sajta.pdf) (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
13. Avrorov V.A., Volkov V.V., Nikolaev V.S., et al. [Analysis of the Conversion Function of a Strain Gauge Type Fiber Tape Linear Density Sensor]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstilnoy promyshlennosti* = Proceedings of Higher Educational Institutions. Technology of Textile Industry. 2009; (2):83-86. Available at: [https://tp.ivgpu.com/?page\\_id=2526](https://tp.ivgpu.com/?page_id=2526) (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
14. Kulikova M.V., Kulikov G.Yu. Numerical Methods for Nonlinear Filtering of Signals and Measurements. *Vychislitelnye tekhnologii* = Computational Technologies. 2016; 21(4):64-98. Available at: <http://www.ict.nsc.ru/jct/getfile.php?id=1744> (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
15. Khafizov K.A., Khafizov R.N., Nurmiev A.A., et al. Theoretical Background of Creating a Mathematical Model of Tractor Traction Efficiency. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2019; 14(3):116-121. (In Russ.) DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_5db9748fc053c2.28431294](https://doi.org/10.12737/article_5db9748fc053c2.28431294)

16. Chethan C.R., Tewari V.K., Nare B., et al. Transducers for Measurement of Draft and Torque of Tractor-implement System. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2018; 49(4):81-87. Available at: <https://clck.ru/TCgBc> (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
17. Rovira-Más F. Sensor Architecture and Task Classification for Agricultural Vehicles and Environments. *Sensors*. 2010; 10(12):11226-11247. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/s101211226>
18. Marcovich L.A. Inferences from Optimal Filtering Equation. *Lithuanian Mathematical Journal*. 2015; (7). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10986-015-9289-5>
19. Kulikova M.V., Tsyganova J.V. Constructing Numerically Stable Kalman Filter-Based Algorithms for Gradient-Based Adaptive Filtering. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 2015; 29(11):1411-1426. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1002/acs.2552>
20. Tarkivsky V.E., Trubitsyn N.V. Digital Data Processing of Agricultural Machinery during Strain Measurement. *Tekhnika v selskom hozyaystve* = Machinery in Agriculture. 2016; (1):28-30. Available at: <https://clck.ru/TPwuP> (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
21. Fedorenko V.F., Tarkivsky V.E. Digital Filtration Method for Determining Traction Power of Agricultural Tractors. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2019; (1):8-10. Available at: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/content/mera-259-2> (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
22. Tarkivsky V.E., Trubitsyn N.V., Voronin E.S. Software for Measurement Information Systems for Agricultural Machinery Testing. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2019; (1):12-15. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-9-12-15>

*Submitted 17.08.2020; approved after reviewing 20.10.2020; accepted for publication 27.10.2020*

*About the authors:*

**Vyacheslav F. Fedorenko**, Scientific Director of Rosinformagrotech (60 Lesnaya St., Pravdinskiy 141261, Russian Federation), Academician of RAS, D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: A-9022-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6398-4463>, [fedorenko@rosinformagrotech.ru](mailto:fedorenko@rosinformagrotech.ru)

**Vitaly E. Tarkivskiy**, Head of the Laboratory for Development of Measuring Instruments and Software, Novokubansk Branch of Rosinformagrotech (15 Krasnaya St., Novokubansk 352243, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: W-4417-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8488-0011>, [tarkivskiy@yandex.ru](mailto:tarkivskiy@yandex.ru)

**Nikolay P. Mishurov**, Deputy Director for Scientific Work, Rosinformagrotech (60 Lesnaya St., Pravdinskiy 141261, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: A-8970-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1058-6952>, [mishurov@rosinformagrotech.ru](mailto:mishurov@rosinformagrotech.ru)

**Nikolay V. Trubitsyn**, Leading Researcher, Novokubansk Branch of Rosinformagrotech (15 Krasnaya St., Novokubansk 352243, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: W-4426-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7451-9831>, [trubicin@yandex.ru](mailto:trubicin@yandex.ru)

*Contribution of the authors:*

V. F. Fedorenko – scientific guidance, formulation of the basic research concept.

V. E. Tarkivskiy – scientific guidance, formulation of the basic concept of research, experimental research, critical analysis of the results, preparation of the initial version of the text and the formation of conclusions.

N. P. Mishurov – formulation of the main concept of research, finalization of the text.

N. V. Trubitsyn – literary and patent analysis, experimental research, text editing.

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



## Разработка подвижного модуля экспериментального стенда для определения тягово-сцепных свойств колесных движителей и результаты лабораторных исследований силы тяги на ведущих колесах мотоблока

В. Ф. Купряшкин<sup>1</sup>, А. С. Уланов<sup>1\*</sup>, М. Г. Шляпников<sup>1</sup>,  
А. Ю. Гусев<sup>1</sup>, В. И. Славкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск,  
Российская Федерация)

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный заочный  
университет» (г. Балашиха, Российская Федерация)

\*[ulanow.aleksandr2010@yandex.ru](mailto:ulanow.aleksandr2010@yandex.ru)

**Введение.** Обработка почвы является неотъемлемой операцией сельскохозяйственного производства, для проведения которой личными подсобными и крестьянско-фермерскими хозяйствами широко применяются мотоблоки, оснащенные тяговыми и тягово-приводными сменными адаптерами. Одним из главных показателей эффективного функционирования мотоблоков является обеспечение равномерного движения при минимально допустимом буксовании ведущих колес с почвой. При этом определяющим силовым фактором является сила тяги на ведущих колесах почвообрабатывающего агрегата, объективное значение которой, как показывают исследования, можно получить только в ходе проведения экспериментальных исследований.

**Материалы и методы.** Для определения силы тяги на ведущих колесах мотоблока экспериментальным путем была предложена и обоснована конструкция стенда (Патент РФ на полезную модель № 188610 «Подвижный модуль испытательного стенда»), а также составлена методика планирования и проведения многофакторного эксперимента по определению силы тяги.

**Результаты исследования.** В результате проведенных лабораторных испытаний были получены расчетные зависимости силы тяги на ведущих колесах мотоблока «Нева» МБ23-МультиАГРО Про в зависимости от почвенных условий и с учетом его конструктивно-технологических параметров, режимов функционирования, а также силы сопротивления перекачиванию.

**Обсуждение и заключение.** Совместное использование регрессионных моделей силы тяги с условиями обеспечения равномерного движения при минимально допустимом буксовании ведущих колес мотоблока с почвой в последующем позволит получить допустимые значения скорости движения и сформировать зоны наиболее эффективного его функционирования.

**Ключевые слова:** мотоблок, обработка почвы, тяговые и тягово-приводные сменные адаптеры, экспериментальный стенд, тягово-сцепные свойства, ведущие колеса, сила тяги, устойчивость движения

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

© Купряшкин В. Ф., Уланов А. С., Шляпников М. Г., Гусев А. Ю., Славкин В. И., 2021



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



**Для цитирования:** Разработка подвижного модуля экспериментального стенда для определения тягово-сцепных свойств колесных движителей и результаты лабораторных исследований силы тяги на ведущих колесах мотоблока / В. Ф. Купряшкин, А. С. Уланов, М. Г. Шляпников [и др.]. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202101.143-160](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.143-160) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 1. – С. 143–160.

*Original article*

## Experimental Stand Movable Module for Determining the Traction-Linked Properties of Wheel Engines and the Results of Laboratory Researches for Determining the Traction Force of Two-Wheel Tractors

V. F. Kupryashkin<sup>a</sup>, A. S. Ulanov<sup>a\*</sup>, M. G. Shlyapnikov<sup>a</sup>,  
A. Yu. Gusev<sup>a</sup>, V. I. Slavkin<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)*

<sup>b</sup>*Russian State Agrarian Correspondence University (Balashikha, Russian Federation)*

\**ulanow.aleksandr2010@yandex.ru*

**Introduction.** Farmers make extensive use of two-wheel tractors equipped with traction and drive interchangeable units. Two-wheel tractors are required to move evenly with minimal slip of the drive wheels on the soil. The tractive force on the drive wheels of the tillage unit is the decisive power factor in this case. An objective traction force value can be measured only by carrying out experimental studies.

**Materials and Methods.** To determine the traction force on the drive wheels of the two-wheel tractor, the design of the experimental stand was proposed and substantiated (RF patent for useful model No. 188610 “Movable module of the test stand”), and a methodology for planning and conducting a multifactor experiment to determine the traction force was developed.

**Results.** As a result of the laboratory tests the calculation dependencies of the tractive force on the drive wheels of the Neva MB23-MultiAGRO Pro two-wheel tractor were obtained. Soil conditions, design and technological parameters, operating modes of the two-wheel tractor, and rolling resistance forces were taken into account.

**Discussion and Conclusion.** The use of the developed regression models of the traction force under the condition of ensuring uniform movement with the minimum permissible slipping of the driving wheels of the two-wheel tractor on the soil will allow obtaining the permissible values of the two-tractor motion speed and form the zones of its most effective functioning.

**Keywords:** two-wheel tractor, tillage, traction and traction drive interchangeable adapters, experimental stand, traction and coupling properties, drive wheels, traction force, stability of movement

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

**For citation:** Kupryashkin V.F., Ulanov A.S., Shlyapnikov M.G., et al. Experimental Stand Movable Module for Determining the Traction-Linked Properties of Wheel Engines and the Results of Laboratory Researches for Determining the Traction Force of Two-Wheel Tractors. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(1):143-160. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.143-160>

## Введение

При производстве экологически чистого картофеля и других овощей на приусадебных участках важной операцией является обработка почвы (вспашка, фрезерование, культивация и т. д.) [1–3]. Для обработки почвы, учитывая малые площади и сложные контуры, достаточно широко используются средства малой механизации, среди которых наиболее распространёнными являются мотоблоки [4].

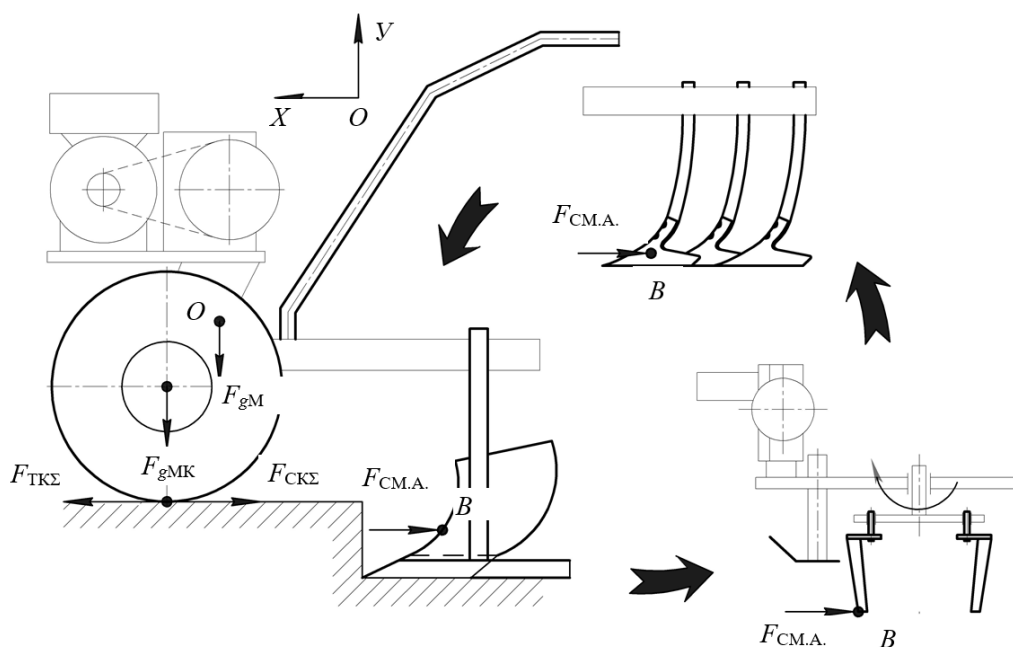
Согласно исследованиям основными критериями обеспечения высокой эффективности функционирования мотоблоков, агрегируемых с тяговыми и тягово-приводными сменными адаптерами, являются условия их прямолинейного движения при минимально допустимом буксовании ведущих ко-

лес, основанном на условии тягового баланса [5–7]. Так, согласно рисунку 1 данное условие для почвообрабатывающего агрегата на базе мотоблока с тяговыми и тягово-приводными сменными адаптерами будет иметь вид<sup>1</sup>:

$$F_{\text{ТКС}} - F_{\text{СКС}} - F_{\text{СМ.А.}} \geq 0, \quad (1)$$

где  $F_{\text{ТКС}}$  – сила тяги на ведущих колесах (суммарная), Н;  $F_{\text{СКС}}$  – сила сопротивления при перекаtywании колес, Н;  $F_{\text{СМ.А.}}$  – сила сопротивления на рабочем органе, определяемая в ходе динамометрирования, Н [8–10].

Из анализа условия (1) следует, что для функционирования почвообрабатывающего агрегата необходимо обеспечить преодоление сил  $F_{\text{СКС}}$  и  $F_{\text{СМ.А.}}$ .



Р и с. 1. Схема сил, действующих на мотоблок с тяговыми и тягово-приводными сменными адаптерами

F i g. 1. Scheme of forces acting on the two-wheel tractor with traction and traction drive interchangeable adapters

<sup>1</sup> Уланов А. С. Повышение эффективности функционирования мотоблока с лемешно-отвальным плугом: дис. ... канд. техн. наук. Саранск, 2019. 250 с.

Определяющим фактором для преодоления данных сопротивлений, согласно техническому регламенту, является сила тяги  $F_{\text{ТК}}$  на ведущих колесах<sup>2</sup>.

Сила тяги мотоблока определяется зависимостью [11]:

$$F_{\text{ТК}} = k_c \cdot F_{\text{гМК}}, \quad (2)$$

где  $k_c$  – коэффициент сцепления ведущих колес с почвой;  $F_{\text{гМК}}$  – сила тяжести мотоблока, приходящая на ось ведущих колес, Н.

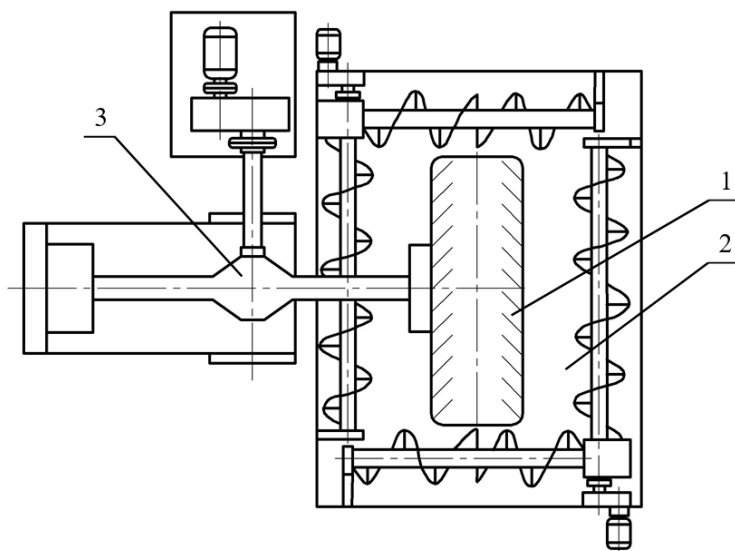
Значения коэффициента  $k_c$  можно принимать по рекомендациям [12]. Однако приводимые значения коэффициента не всегда отвечают нужным требованиям и условиям функционирования. Поэтому получение наиболее точных значений силы тяги на ведущих колесах мотоблока возможно только в результате проведения экспериментальных исследований.

## Обзор литературы

В настоящее время для исследования ведущих колес транспортно-технологических машин и определения их тягово-сцепных свойств применяются различные конструкции испытательных стендов. Рассмотрим особенности их конструкций и принципы функционирования.

С целью проведения испытаний ведущих колес путем моделирования их работы в Могилевском машиностроительном институте был разработан стенд для испытаний крупногабаритных колес (рис. 2) [13].

Отличительной особенностью данного стенда является то, что испытуемое колесо 1 устанавливается в ванну 2, заполненную землей. При включении привода 3 испытуемого колеса происходит имитация его проскальзывания на тяговом режиме. Однако данный стенд имеет основной недостаток, заключающийся



Р и с. 2. Стенд для испытания ведущих колес

F i g. 2. Test bench for driving wheels

<sup>2</sup> Иншаков А. П., Карпов А. М., Кувшинов А. Н. Технологические и технические аспекты эффективного использования машинно-тракторного парка в сельскохозяйственном производстве. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2012. 156 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005488674> (дата обращения: 10.02.2021).

в том, что твердость почвы в ходе испытаний меняется в небольшом диапазоне значений и определяется гранулометрическим составом и типом почвы.

Существует стенд для определения коэффициентов сцепления колес в продольном и поперечном направлениях (рис. 3) [14].

Данный стенд позволяет проводить исследования тягово-сцепных свойств колеса 1 при фиксированном значении давления воздуха в шине с одновременным контролем вертикальной и горизонтальной нагрузок при помощи тензометрической площадки 2 и осциллографа 3.

Однако предлагаемый стенд позволяет определять коэффициенты сцепления только колес с пневматическими шинами на твердых типах покрытия.

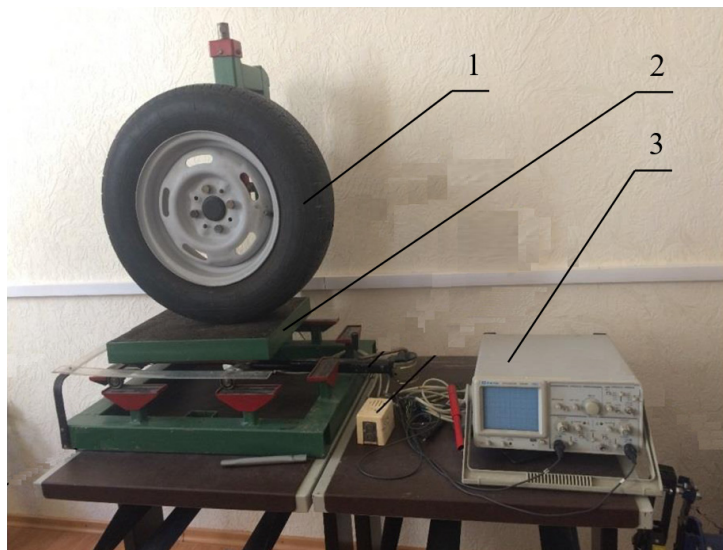
Также существует стенд для определения эксплуатационных показателей колесных движителей, разработанный Днепропетровским инженерно-строительным институтом (рис. 4) [15].

Принцип работы стенда заключается в передаче крутящего момента от ве-

дущего барабана 1 через тяговый канат 2 к ведомому барабану 3 с закрепленными на нем испытуемыми колесами 4 и 5. Ведущие колеса контактируют с имитатором дорожного покрытия 6, связанным с динамометром 7.

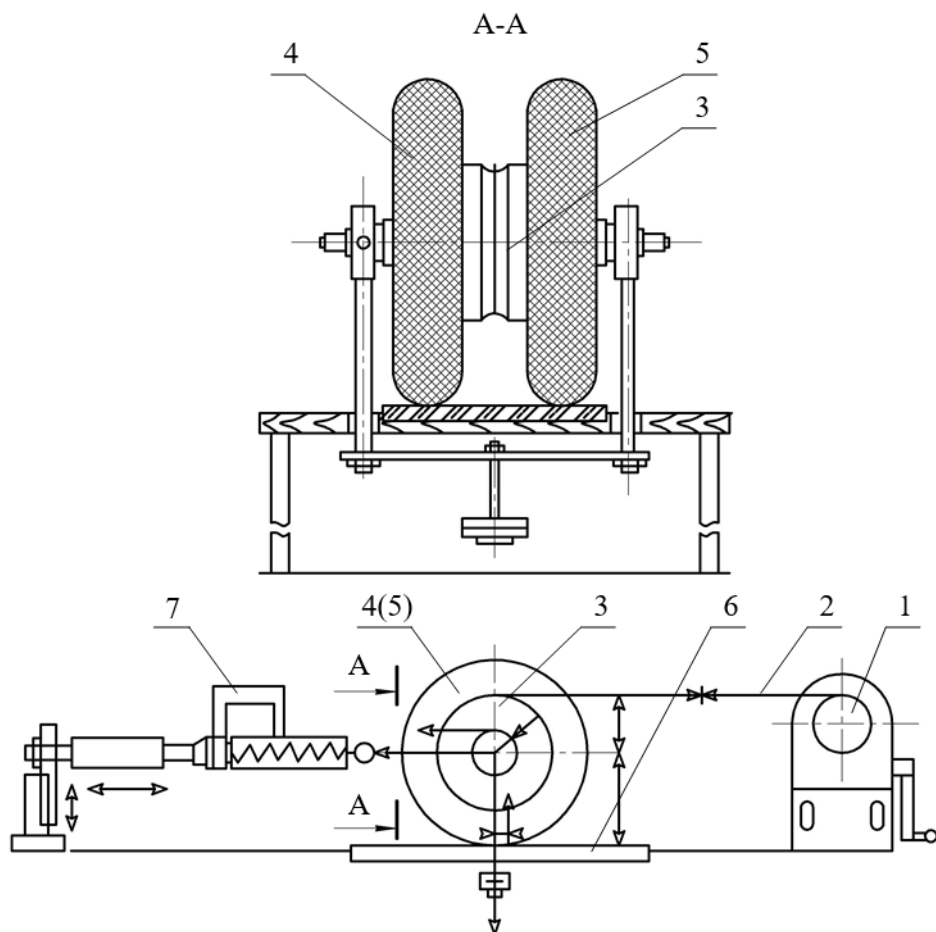
Особенностью данного стенда является то, что тяговое сопротивление приложено к оси испытуемых колес, что в свою очередь повышает точность воспроизведения режимов их работы. Однако, как и в предыдущем случае, данный стенд предназначен для испытания только колес на резиновом ходу при условии их движения по твердой поверхности.

Кроме выше указанных конструкций стендов для исследования тяговых показателей ведущих колес транспортно-технологических машин существуют разработки коллективов ученых во главе с В. В. Гуськовым, С. А. Владыкиным, М. А. Левиным, В. В. Кузнецовым и др. [16–19]. Однако данные разработки отличаются сложностью конструкций и ограниченностью функциональных возможностей, в связи с чем их использование, наряду



Р и с. 3. Стенд для определения коэффициентов сцепления

F i g. 3. Stand for determining the coefficient of adhesion



Р и с. 4. Стенд для исследования тягово-сцепных свойств колесного движителя

F i g. 4. Stand for the study of traction and coupling properties wheel mover

с рассмотренными стендами для испытания металлических грунтозацепов, используемых, как правило, в качестве ведущих колес мотоблока при обработке почвы, не представляется возможным.

### Материалы и методы

В результате изучения выше указанных конструкций стендов для исследования тягово-сцепных свойств колес транспортно-технологических машин был выявлен ряд недостатков, а именно: подавляющее большинство стендов направлено на исследование характеристик колес только на рези-

новом ходу и на твердых покрытиях [13–16].

Из патентного и литературного анализа следует, что для исследования тягово-сцепных свойств движителей мотоблока необходимо разработать установку, которая позволит определить значение силы тяги на его ведущих колесах с учетом массовых характеристик, скорости движения и свойств обрабатываемой среды.

Для этого была предложена и разработана конструкция экспериментального стенда (рис. 5), позволяющего



обеспечить натурное моделирование функционирования ведущих колес мотоблоков как с пневматическими шинами, так и с металлическими грунтозацепами и определить тяговые силы в зависимости от конкретных почвенных условий (патент РФ на полезную модель № 188610 «Подвижный модуль испытательного стенда») [20].



Р и с. 5. Подвижный модуль экспериментального стенда для исследования ведущих движителей

Fig. 5. Movable module to determine traction on the drive wheels of the two-wheel tractor

Возможность стенда устанавливать экспериментальным путем силу тяги на ведущих колесах будет способствовать определению наиболее оптимальных режимов функционирования почвообрабатывающих агрегатов на базе мотоблоков с тяговыми и тягово-приводными сменными адаптерами [21].

Для конкретизации значений силы тяги на ведущих колесах мотоблока экспериментальным путем рассмотрим методику планирования и проведения многофакторного эксперимента в зависимости от массы и скорости движения почвообрабатывающего агрегата и твердости почвы<sup>3</sup>.

Первоначальным этапом реализации методики планирования является выбор оптимальной математической модели и типа плана<sup>4</sup>. Приняв во внимание ранее проводимые исследования степени влияния почвенных условий, скоростных и массовых характеристик почвообрабатывающих агрегатов на их тяговые показатели, можно утверждать, что зависимость  $F_{\text{ТК}}$  имеет нелинейный характер<sup>5</sup> [22–24]. Следовательно, при проведении эксперимента первоначальной моделью функции отклика выберем полином второго порядка<sup>6</sup>.

Для планирования эксперимента необходимо определить область факторного пространства. Основываясь на анализе исследований, в которых отражены условия возникновения силы тяги  $F_{\text{ТК}}$  на ведущих колесах почвообрабатывающих машин, параметры, описывающие состояние обрабатываемой почвы, а также учитывая большое количество конструктивных и технологических характеристик почвообрабатывающих агрегатов, с большой долей вероятности основными показателями можно считать скорость движения

<sup>3</sup> Копылова И. Б. Методы обработки методических материалов для магистров направления подготовки 03.04.01 – «Прикладные математика и физика». Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2017. 48 с.; Методы и средства научных исследований. Методы планирования и обработки результатов экспериментов / А. Н. Чубинский [и др.]. СПб.: СПбГИТУ, 2018. 109 с. URL: <https://search.rsl.ru/record/01009792444> (дата обращения: 10.02.2021).

<sup>4</sup> Коптяев В. А. Повышение эффективности функционирования колесных энергосредств, работающих в составе машинно-тракторных агрегатов, за счет улучшения их тягово-сцепных свойств: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2002. 19 с. URL: <https://search.rsl.ru/record/01003231092> (дата обращения: 10.02.2021).

<sup>5</sup> Копылова И. Б. Методы обработки методических материалов для магистров направления подготовки...

<sup>6</sup> Методы и средства научных исследований...

$v_n$  (км/ч), твердость почвы  $p$  (МПа), массу мотоблока  $m$  (кг)<sup>7</sup> [12; 25].

Ввиду того, что передвижение мотоблока по обрабатываемому участку всегда сопровождается буксованием движителей относительно почвы, перед началом определения факторных пространств  $v_n$ ,  $p$  и  $m$  необходимо указать величину коэффициента буксования  $\delta$  ведущих колес, при котором достигается максимальная сила тяги почвообрабатывающего агрегата.

Учитывая исследования, проведенные В. В. Гуськовым, и приняв во внимание тяговый класс мотоблоков (0,1), которому соответствует максимальное значение силы тяги, равное 1,8 кН, сделаем вывод, что для мотоблоков коэффициент буксования находится в пределах от 31 до 32 %<sup>8</sup>.

Для выбора факторного пространства скорости движения мотоблока  $v_n$  и твердости обрабатываемой почвы  $p$  воспользуемся рекомендациями, из которых можно сделать некоторые выводы<sup>9</sup> [26; 27]:

- величина скорости мотоблока под управлением человека не должна превышать 4 км/ч;

- минимальная скорость передвижения в процессе обработки почвы (например вспашки) с учетом качества выполняемых работ составляет 2 км/ч;

- диапазон варьирования значений твердостей существующих типов почв, от легких до тяжелых, находится в пределах от 0,7 до 3 МПа соответственно;

- существующие конструкции мотоблоков эксплуатируются только на легких и средних почвах в диапазоне твердости от 0,7 до 1,6 МПа.

В основе выбора факторного пространства массовых характеристик  $m$  необходимо опираться на весовые показатели исследуемого мотоблока, в нашем случае «Нева» МБ23-МультиАГРО Pro с грузами-утяжелителями, оказывающими влияние на повышение тягово-сцепных свойств ведущих колес. В совокупности с массой мотоблока, сменного адаптера (плуга, фрезерного рабочего органа и др.) и установленных грузов-утяжелителей общая масса почвообрабатывающего агрегата находится в пределах от 140 до 180 кг.

Указанные значения массы соответствуют тяговому классу 0,1, к которому причисляются мотоблоки<sup>10</sup>. Однако, учитывая, что центр масс мотоблока расположен на определенном расстоянии от его центральной оси (оси симметрии), указанный диапазон его масс в полной мере не удовлетворяет условиям проведения эксперимента. В связи с этим целесообразно будет выбрать в качестве факторного пространства, учитывающего массу мотоблока, реакцию почвы, приходящуюся на каждое его ведущее колесо  $R_{K1}$  и  $R_{K2}$ , принимая во внимание балластные грузы.

После проведенного анализа исследований по определению статической

<sup>7</sup> Романов Ф. Ф. Малогабаритные энергосредства. Выбор оптимальных эксплуатационных параметров: монография. СПб.: Агропромиздат, 2000. 182 с. URL: <https://search.rsl.ru/record/01000691674> (дата обращения: 10.02.2021).

<sup>8</sup> ГОСТ 28523–90. Мобильные средства малой механизации сельскохозяйственных работ. Тракторы малогабаритные. Типы и основные параметры. М., 2005. 2 с.; Гуськов В. В., Велев Н. Н., Атаманов А. Ю. Тракторы: Теория: Учеб. для вузов по спец. «Автомобили и тракторы». М.: Машиностроение, 1988. 376 с. URL: <https://search.rsl.ru/record/01001407450> (дата обращения: 10.02.2021).

<sup>9</sup> Мотоблок «Агро»: Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. URL: <https://fermerinform.ru/wp-content/uploads/2017/12/agro2.pdf> (дата обращения: 10.02.2021); Мотоблок «Нева» МБ-23 МультиАГРО и его модификации. Руководство по эксплуатации 005.70.0100 РЭ1 [Электронный ресурс]. URL: <http://tehnoservis.ru/docs/mb23.pdf> (дата обращения: 10.02.2021).

<sup>10</sup> ГОСТ 27021–86. Тракторы сельскохозяйственные и лесохозяйственные. Тяговые классы. М., 1986. 6 с.



устойчивости мотоблока от опрокидывания было выяснено, что значения  $R_{K1}$  и  $R_{K2}$  с большой точностью можно вывести из соотношений:

$$R_{K1} = K_1 K_2 F_{gM} + K_4 F_{gB1} - K_5 F_{gB2}, \quad (3)$$

$$R_{K2} = K_1 K_3 F_{gM} - K_5 F_{gB1} + K_4 F_{gB2}. \quad (4)$$

Для наглядности величины  $R_{K1}$  и  $R_{K2}$  для мотоблока «Нева» МБ23-МультиАГРО Pro сведены в таблицу 1.

Из таблицы 1 следует, что значения  $R_{K1}$  и  $R_{K2}$ , действующие со стороны почвы, находятся в диапазоне от 570 до 990 Н. Таким образом, область факторного пространства для определения силы тяги на ведущих колесах мотоблока  $R_{Ki} = 570\text{--}990$  Н.

Проведя анализ вышеуказанных результатов, окончательно примем интервалы варьирования переменных факторов:  $v_n = 2\text{--}4$  км/ч,  $p = 0,7\text{--}1,6$  МПа и  $R_{Ki} = 570\text{--}990$  Н.

Далее, основываясь на ранее проведенных исследованиях с учетом рекомендаций, определим условия лабораторных исследований (координаты центра плана эксперимента, интервалы и уровни варьирования для принятых значений  $p$ ,  $v_n$  и  $R_{Ki}$ )<sup>11</sup>. Условия проведения лабораторных исследований представлены в таблице 2.

### Результаты исследования

В ходе проведения лабораторных исследований были определены коэффициенты регрессионной модели силы тяги  $F_{TKi}$  (табл. 3).

Т а б л и ц а 1

Table 1

**Значения  $R_{K1}$  и  $R_{K2}$  для мотоблока «Нева» МБ23-МультиАГРО Pro**  
 **$R_{K1}$  and  $R_{K2}$  values for the Neva MB-23-MultiAGRO Pro two-wheel tractor**

Сцепной вес мотоблока с утяжелителями $m$ , кг / Coupling weight of the two-wheel tractor with weights $m$ , kg	Реакция на ведущих колесах мотоблока со стороны почвы / The reaction to the drive wheels of tillers from the soil	
	$R_{K1}$ , Н / $R_{K1}$ , N	$R_{K2}$ , Н / $R_{K2}$ , N
140	814	570
160	903	679
180	990	790

Т а б л и ц а 2

Table 2

**Условия проведения лабораторных исследований**  
**Conditions for conducting laboratory tests**

Переменный фактор / Variable factor	Переменный интервал ( $\Delta X_i$ ) / Variable interval ( $\Delta X_i$ )	Звездное плечо ( $\alpha_i$ ) / Star Shoulder ( $\alpha_i$ )	Уровни переменных факторов / Levels of variable factors				
			0	+1,0	-1,0	-1,682	+1,682
Твердость почвы $p$ , МПа / Soil hardness $p$ , МПа	0,45	0,76	1,15	1,6	0,7	0,390	1,910
Скорость движения $v_n$ , км/ч / Travel speed $v_n$ , km/h	1,00	1,68	3,00	4,0	2,0	1,320	4,680
Реакция на ведущем колесе $R_{Ki}$ , Н / Reaction on the driving wheel $R_{Ki}$ , Н	210,00	143,00	780,00	990,0	570,0	427,000	1133,000

<sup>11</sup> Уланов А. С. Повышение эффективности функционирования мотоблока с лемешно-отвальным плугом...; Методы и средства научных исследований...

**Коэффициенты регрессионной модели силы тяги  $F_{TKi}$  ведущего колеса мотоблока в натуральном виде**

**Coefficients of the regression model of the traction force  $F_{TKi}$  of the drive wheel of the two-wheel tractor in natural form**

Характеристика уравнения регрессии / Characteristic regression equations	Коэффициенты регрессии в кодированном виде / Regression coefficients encoded	
	Обозначение, размерность / Designation, dimension	Значение / Value
Сила $F_{TKi}$ / Strength $F_{TKi}$	$K_{TK0}$ , Н / $K_{TK0}$ , N	132,600000
	$K_{TK1}$ , мм <sup>2</sup> / $K_{TK1}$ , mm <sup>2</sup>	351,600000
	$K_{TK2}$ , Н·ч/км / $K_{TK2}$ , N·h/km	38,400000
	$K_{TK3}$	0,019000
	$K_{TK12}$ , мм <sup>2</sup> ·ч/км / $K_{TK12}$ , mm <sup>2</sup> ·h/km	12,610000
	$K_{TK13}$ , мм <sup>2</sup> /Н / $K_{TK13}$ , mm <sup>2</sup> /N	0,608000
	$K_{TK23}$ , ч/км / $K_{TK23}$ , h/km	0,088000
	$K_{TK11}$ , мм <sup>4</sup> /Н / $K_{TK11}$ , mm <sup>4</sup> /N	87,400000
	$K_{TK33}$ , Н <sup>-1</sup> / $K_{TK33}$ , N <sup>-1</sup>	0,000186

На основании данных таблицы 3 было установлено уравнение регрессии силы тяги на ведущих колесах в натуральном виде:

$$F_{TKi} = 132,6 - 351,6p + 38,4v_{\pi} - 0,019R_{Ki} - 12,61pv_{\pi} + 0,608pR_{Ki} - 0,088v_{\pi}R_{Ki} + 87,4p^2 + 0,000186R_{Ki}^2. \quad (5)$$

Однако, как было отмечено ранее, масса мотоблока «Нева» МБ23-МультиАГРО Pro с целью повышения тягово-сцепных свойств колес мотоблока с почвой может варьироваться путем установки или снятия грузовой утяжелителей, масса которых имеет фиксированное значение (10 кг). Следовательно, масса мотоблока с утяжелителями может быть равной 140, 160 или 180 кг.

Для указанных значений массы мотоблока реакция  $R_{Ki}$  на ведущих колесах, с учетом положения его центра масс, будет равна:

– при  $m = 140$  кг  $R_{K1} = 709,3$  Н,  $R_{K2} = 671,5$  Н;  
– при  $m = 160$  кг  $R_{K1} = 808,7$  Н,  $R_{K2} = 770,9$  Н;  
– при  $m = 180$  кг  $R_{K1} = 908,1$  Н,  $R_{K2} = 870,3$  Н.

Учитывая значения  $R_{Ki}$ , регрессионное уравнение силы тяги (5) для каждого ведущего колеса мотоблока  $F_{TK1}$  и  $F_{TK2}$  будут иметь вид:

1. При  $m = 140$  кг

$$F_{TK1} = 212,7 + 79,7p - 24v_{\pi} - 12,67pv_{\pi} + 87,4p^2, \quad (6)$$

$$F_{TK2} = 203,7 + 56,7p - 20,7v_{\pi} - 12,67pv_{\pi} + 87,4p^2. \quad (7)$$

2. При  $m = 160$  кг

$$F_{TK1} = 238,8 + 140,1p - 33,7v_{\pi} - 12,67pv_{\pi} + 87,4p^2, \quad (8)$$

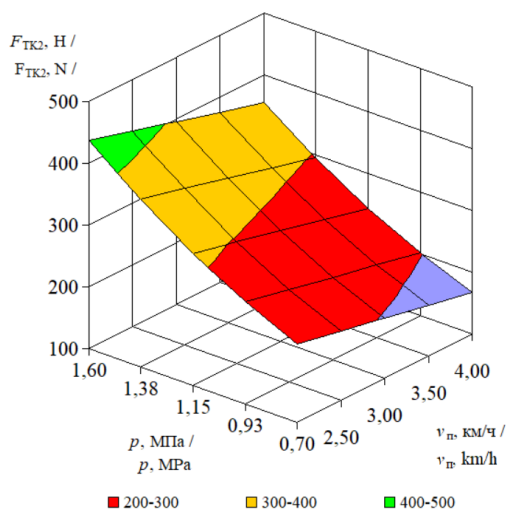
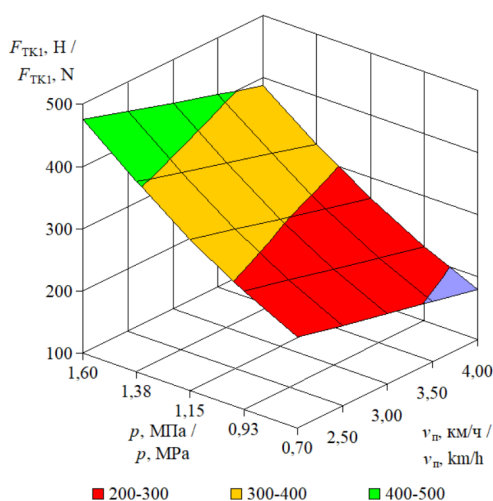
$$F_{TK2} = 228,5 + 117,1p - 29,4v_{\pi} - 12,67pv_{\pi} + 87,4p^2. \quad (9)$$

3. При  $m = 180$  кг

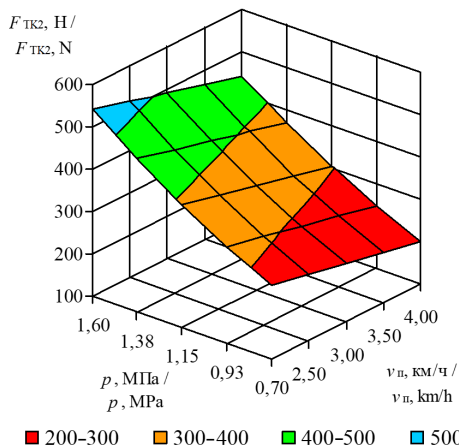
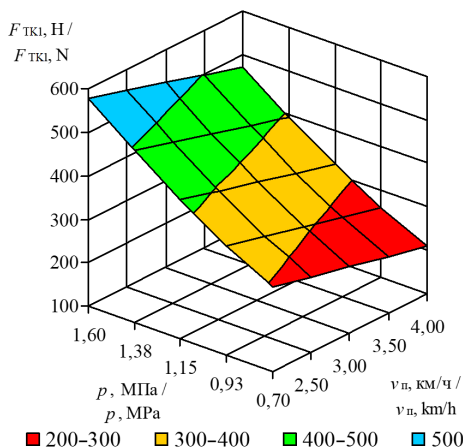
$$F_{TK1} = 268,7 + 200,5p - 41,5v_n - 12,67pv_n + 87,4p^2, \quad (10)$$

$$F_{TK2} = 257 + 177,5p - 38,2v_n - 12,67pv_n + 87,4p^2. \quad (11)$$

На рисунках 6–8 представлены частные графические решения уравнений (6) и (7), (8) и (9), (10) и (11) для массы мотоблока 140, 160 и 180 кг соответственно с осями координат  $F_{TK1}$  ( $F_{TK2}$ ),  $p$  и  $v_n$ . Полученные результаты коррелируют с ранее проведенными исследованиями [28–30].

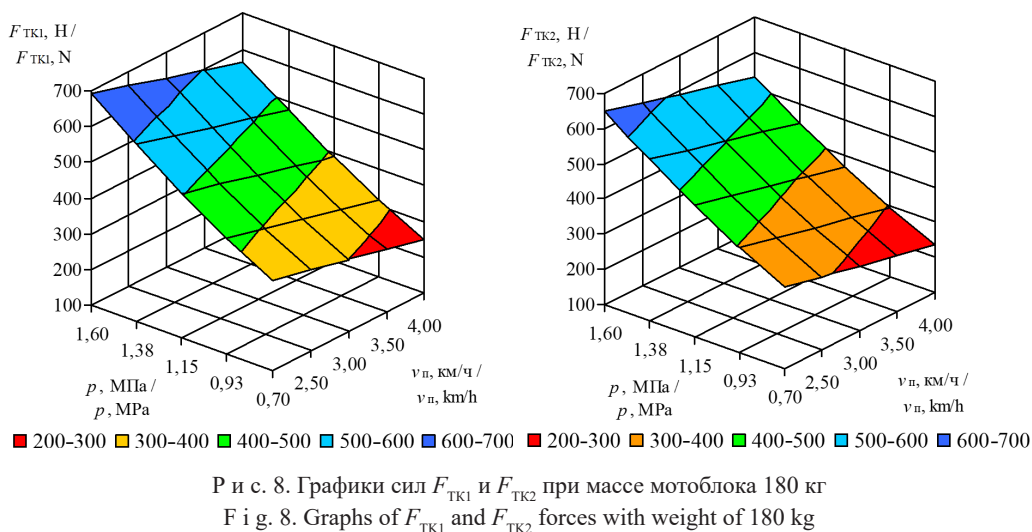


Р и с. 6. Графики сил  $F_{TK1}$  и  $F_{TK2}$  при массе мотоблока 140 кг  
F i g. 6. Graphs of  $F_{TK1}$  and  $F_{TK2}$  forces with weight of 140 kg



Р и с. 7. Графики сил  $F_{TK1}$  и  $F_{TK2}$  при массе мотоблока 160 кг  
F i g. 7. Graphs of  $F_{TK1}$  and  $F_{TK2}$  forces with weight of 160 kg





### Обсуждение и заключение

Таким образом, предложенная конструкция подвижного модуля экспериментального стенда позволяет в лабораторных условиях обеспечить проведение исследований функционирования ведущих колес мотоблока как с пневматическими шинами, так и с металлическими грунтозацепами с возможностью определения их силы тяги  $F_{TK}$  на различных режимах работы, в процессе проведения обработки почвы различными тяговыми и тягово-приводными сменными адаптерами [20].

В результате лабораторных испытаний были получены регрессионное уравнение в общем виде (5), его частные решения (6)–(11) и графические модели сил тяги  $F_{TK1} = f(p; v_n)$  и  $F_{TK2} = f(p; v_n)$  (рис. 6–8), показывающие изменение силовых характеристик для различных значений массы пахотного агрегата на каждом ведущем колесе мотоблока.

Использование полученных результатов позволит в дальнейшем определять наиболее эффективные режимы функционирования мотоблока при проведении различных технологических операций, связанных с обработкой почвы.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хвостов, Е. Н. Влияние приемов основной и предпосевной обработки почвы и удобрений на продуктивность звена полевого севооборота / Е. Н. Хвостов, Л. Н. Прокина. – DOI 10.30766/2072-9081.2018.67.6.115-120 // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2018. – Т. 67, № 6. – С. 115–120. – URL: <https://www.agronauka-sv.ru/jour/article/view/287> (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.
2. Тарчоков, Х. Ш. Агротехника в борьбе с сорняками / Х. Ш. Тарчоков, Ф. Х. Бжинаев. – DOI 10.31677/2311-0651-2018-0-4-46-50 // Инновации и продовольственная безопасность. – 2018. – № 4. – С. 46–50. – URL: <https://innfoodsecr.elpub.ru/jour/article/view/464> (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.
3. Эффективные севообороты и приемы возделывания культур при орошении / П. Д. Шевченко, А. Д. Дробилко, А. С. Елецкий [и др.] // Земледелие. – 2007. – № 4. – С. 33–34. – URL: <http://juzzemledelie.ru/arkhiv-nomerov/4-2007> (дата обращения: 10.02.2021).



4. Анализ энергоёмкости процесса вспашки почвы мотоблоком в агрегате с лемешно-отвальным плугом / В. Ф. Купряшкин, А. С. Уланов, Н. И. Наумкин [и др.]. – DOI [10.15507/2658-4123.029.201903.414-427](https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.414-427) // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 3. – С. 414–427. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/84-19-3/721-10-15507-0236-2910-029-201903-6> (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.
5. Повышение эффективности работы почвообрабатывающих фрез / А. В. Безруков, Н. И. Наумкин, В. Ф. Купряшкин, А. В. Брагин // Сельский механизатор. – 2016. – № 9. – С. 6–7. – URL: [http://selmech.msk.ru/916.html#\\_Повышение\\_эффективности\\_работы](http://selmech.msk.ru/916.html#_Повышение_эффективности_работы) (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.
6. Обоснование режимов работы пахотного агрегата на базе мотоблока «Нева» МБ-23-МУЛЬТИАГРО Pro с плугом П1-20/3 по критерию отсутствия буксования ведущих колес с почвой / В. Ф. Купряшкин, А. С. Уланов, М. Г. Шляпников, А. С. Князьков // Вестник НГИЭИ. – 2019. – № 7 (98). – С. 5–15. – URL: <https://yadi.sk/i/BJtkW-KB3I5HQ> (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.
7. Уланов, А. С. Теоретическое исследование устойчивости движения мотоблока с плугом при вспашке почвы / В. Ф. Купряшкин, А. С. Уланов // Нива Поволжья. – 2019. – № 1 (50). – С. 101–108. – URL: [https://niva-volga.ru/file/vipuski/2019\\_1\\_50/Содержание.pdf](https://niva-volga.ru/file/vipuski/2019_1_50/Содержание.pdf) (дата обращения: 10.02.2021).
8. Купряшкин, В. Ф. Обоснование конструкции динамометрического модуля для исследования лемешно-отвального плуга мотоблока и его практическая апробация с использованием технологий реверс-инжиниринга / В. Ф. Купряшкин, А. С. Уланов, Н. И. Наумкин. – DOI [10.15507/0236-2910.028.201803.400-415](https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.400-415) // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 3. – С. 400–415. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/62-18-3/431-10-15507-0236-2910-028-201803-9> (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.
9. Донцов, И. Е. Установки для объемного динамометрирования почвообрабатывающих рабочих органов и результаты ее использования / И. Е. Донцов, М. Н. Лысыч // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2017. – № 2. – С. 9–15. – URL: [https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory\\_i\\_selhoz mashiny\\_2\\_2017.pdf](https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory_i_selhoz mashiny_2_2017.pdf) (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.
10. Мясенко, В. И. Пространственное динамометрирование рабочих органов почвообрабатывающих орудий / В. И. Мясенко, Н. А. Маринов. – DOI [10.22314/2073-7599-2017-5-22-26](https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-5-22-26) // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2017. – № 5. – С. 22–26. – URL: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/207> (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.
11. Исследование процесса взаимодействия ведущих колес трактора с грунтовой поверхностью / В. В. Гуськов, А. А. Дзёма, А. С. Колола [и др.] – DOI: [10.21122/2227-1031-2017-16-1-83-88](https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-1-83-88) // Наука и техника. – 2017. – Т. 16, № 1. – С. 83–88. – URL: <https://sat.bntu.by/jour/article/view/982> (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.
12. Дунаев, А. В. Совершенствование технической эксплуатации машинно-тракторного парка агропромышленного комплекса / А. В. Дунаев, В. И. Балабанов // Техника и оборудование для села. – 2014. – № 11. – С. 28–31. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22515097> (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.
13. Патент № 1499145 СССР, МПК G01M 17/02. Стенд для испытаний шин : № 3891043 : заявл. 06.05.1985 : опубл. 07.08.1989 / Щемелев А. М., Хустенко А. Н., Похвалов С. В. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/SU1499145A1\\_19890807](https://yandex.ru/patents/doc/SU1499145A1_19890807) (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.
14. Черепанов, Л. А. Стенд для испытаний сцепных свойств колес легковых автомобилей / Л. А. Черепанов, А. А. Елизаров. – DOI [10.46960/62045\\_2018\\_4\\_22](https://doi.org/10.46960/62045_2018_4_22) // Транспортные системы. – 2018. – № 4 (10). – С. 22–26. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36664117> (дата обращения: 10.02.2021).
15. Патент № 1437723 СССР, МПК G01M 17/02. Стенд для исследования тягово-сцепных свойств колесного движителя : № 4250017 : заявл. 26.05.1987 : опубл. 15.11.1988 / Тимошенко В. К., Хмара Л. А., Деревянчук М. И., Шипилов А. С. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/SU1437723A1\\_19881115](https://yandex.ru/patents/doc/SU1437723A1_19881115) (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.
16. Патент № 1562730 СССР, МПК G01M 17/02. Стенд для испытаний пневматических шин : № 4484627 : заявл. 29.07.1988 : опубл. 07.05.1990 / Гуськов В. В., Бойков В. П., Козачевский Г. Г.,

Свирищевский И. Ю. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/SU1562730A1\\_19900507](https://yandex.ru/patents/doc/SU1562730A1_19900507) (дата обращения: 10.02.2021).

17. Патент № 1029028 СССР, МПК G01M 17/02. Стенд для испытания движителей : № 3361468 : заявл. 05.12.1981 : опубл. 15.07.1983 / С. А. Владыкин, В. В. Гринев, М. И. Маленков [и др.]. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/SU1029028A1\\_19830715](https://yandex.ru/patents/doc/SU1029028A1_19830715) (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.

18. Патент № 875240 СССР, МПК G01M 17/02. Стенд для испытания колес и способ испытания колес на стенде : № 2788153 : заявл. 02.08.1979 : опубл. 23.10.1981 / Левин М. А., Бойков В. П. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/SU875240A1\\_19811023](https://yandex.ru/patents/doc/SU875240A1_19811023) (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.

19. Патент № 192280 Российская Федерация, МПК G01M 17/00. Стенд для исследования шин пневматических колес : № 2019108499 : заявл. 25.03.2019 : опубл. 11.09.2019 / Кузнецов В. В., Гринь А. М., Блохин В. Н. [и др.]. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU192280U1\\_20190911](https://yandex.ru/patents/doc/RU192280U1_20190911) (дата обращения: 10.02.2021).

20. Патент № 188610 Российская Федерация, МПК G01M 17/00. Подвижный модуль испытательного стенда : № 2019102333 : заявл. 29.01.2019 : опубл. 17.04.2019 / Купряшкин В. Ф., Уланов А. С., Купряшкин В. В. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва». – 5 с. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU192280U1\\_20190911](https://yandex.ru/patents/doc/RU192280U1_20190911) (дата обращения: 10.02.2021).

21. Стенд для определения силы тяги на ходовых колесах малогабаритной техники / В. Ф. Купряшкин, А. С. Уланов, В. Н. Купряшкина [и др.] // Сельский механизатор. – 2019. – № 2. – С. 38–39. – URL: <http://www.selmech.msk.ru/219.html> (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.

22. Гапич, Д. С. К вопросу о тяговых испытаниях колесных тракторов различных конструктивных схем / Д. С. Гапич // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2014. – № 1 (33). – С. 229–234. – URL: [http://www.volgau.com/Portals/0/izv\\_auk/izv\\_auk\\_full/izvestiya\\_2014\\_33\\_1.pdf?ver=2014-03-26-132210-130](http://www.volgau.com/Portals/0/izv_auk/izv_auk_full/izvestiya_2014_33_1.pdf?ver=2014-03-26-132210-130) (дата обращения: 10.02.2021).

23. Крупчатников, Р. А. Анализ результатов сравнительных тяговых испытаний малогабаритных тракторов / Р. А. Крупчатников, Б. М. Ковынев // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2008. – № 3. – С. 39–41. – URL: <https://clck.ru/Ted7o> (дата обращения: 10.02.2021).

24. Соловьев, Е. Т. Обоснование тягового диапазона малогабаритного трактора / Е. Т. Соловьев // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2008. – № 3. – С. 37–39. – URL: <https://clck.ru/TedBh> (дата обращения: 10.02.2021).

25. Самсонов, В. А. Расчет максимальной энергонасыщенности сельскохозяйственного трактора / В. А. Самсонов, Ю. Ф. Лачуга // Тракторы и сельхозмашины. – 2017. – № 10. – С. 33–38. – URL: [https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory\\_i\\_selhoz mashiny\\_No10\\_2017\\_dlya\\_sajta.pdf](https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory_i_selhoz mashiny_No10_2017_dlya_sajta.pdf) (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.

26. Калинин, А. Б. Обоснование шага измерения твердости дерново-подзолистых почв при проведении картографирования в технологиях точного земледелия / А. Б. Калинин, А. А. Устроев, П. П. Кудрявцев // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2018. – № 1 (94). – С. 112–117. – URL: <https://www.sznii.ru/images/IAEP/jurnal/jurnali/Jurnal94.pdf> (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.

27. Гаранин, Г. В. Объекты, показатели, средства управления и контроля качества работ в полеводстве / Г. В. Гаранин // Международный технико-экономический журнал. – 2016. – № 2. – С. 80–85. – URL: <http://www.tite-journal.com/content/2016/vypusk-no2/#c10356> (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.

28. Баландин, Е. А. Результаты сравнительных испытаний тяговых колес мотоблоков «Ко – Нева» / Е. А. Баландин // Вестник студенческого научного общества. – 2017. – Т. 8, № 2. – С. 87–91. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34921104> (дата обращения: 10.02.2021).

29. Narang, S. Draftability of a 8.95 kW Walking Tractor on Tilled Land / S. Narang, A. C. Varshney. – DOI 10.1016/j.jterra.2005.04.006 // Journal of Terramechanics. – 2006. – Vol. 43, Issue 4. – Pp. 395–409. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022489805000406?via%3Dihub> (дата обращения: 10.02.2021).

30. **Rasool, S.** Improving the Tractive Performance of Walking Tractors Using Rubber Tracks / S. Rasool, H. Raheman. – DOI [10.1016/j.biosystemseng.2017.12.013](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.12.013) // Biosystems Engineering. – 2018. – Vol. 167. – Pp. 51–62. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S153751101730822X?via%3Dihub> (дата обращения: 10.02.2021).

*Поступила 10.10.2020; одобрена после рецензирования 14.12.2020; принята к публикации 21.12.2020*

*Об авторах:*

**Купряшкин Владимир Федорович**, заведующий кафедрой мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина 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: [L-5153-2018](https://orcid.org/0000-0002-7512-509X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7512-509X>, [kupwf@mail.ru](mailto:kupwf@mail.ru)

**Уланов Александр Сергеевич**, преподаватель кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина 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: [L-4662-2018](https://orcid.org/0000-0001-6041-6911), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6041-6911>, [ulanow.aleksandr2010@yandex.ru](mailto:ulanow.aleksandr2010@yandex.ru)

**Шляпников Михаил Геннадьевич**, инженер кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4784-4695>, [mix.shlyapnickoff2015@yandex.ru](mailto:mix.shlyapnickoff2015@yandex.ru)

**Гусев Александр Юрьевич**, аспирант кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5808-4169>, [a.gusev57@yandex.ru](mailto:a.gusev57@yandex.ru)

**Славкин Владимир Иванович**, профессор кафедры эксплуатации и технического сервиса машин ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный заочный университет» (143907, Российская Федерация, г. Балашиха, ш. Энтузиастов, д. 50), доктор технических наук, Researcher ID: [AAF-2576-2021](https://orcid.org/0000-0002-6116-6616), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6116-6616>, [mcht@rambler.ru](mailto:mcht@rambler.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

В. Ф. Купряшкин – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, формирование выводов, доработка текста.

А. С. Уланов – литературный и патентный анализ, проведение лабораторных исследований ведущих колес мотоблока, обработка результатов эксперимента, подготовка начального варианта текста и редактирование текста.

М. Г. Шляпников – проведение лабораторных исследований ведущих колес мотоблока, обработка результатов эксперимента.

А. Ю. Гусев – проведение лабораторных исследований, визуализация текста.

В. И. Славкин – формулирование основной концепции исследования, формирование выводов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Khvostov E.N., Prokina L.N. The Effect of Primary and Preliminary Methods of Soil Treatments and Fertilizers on the Productivity of Field Crop Rotation Link. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*. 2018; 67(6):115-120. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.67.6.115-120>

2. Tarchokov H.Sh., Bzhinaev F.H. Agrotechnology in Fight against Weeds. *Innovatsii i proizvodstvennaya bezopasnost* = Innovations and Food Safety. 2018; (4):46-50. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31677/2311-0651-2018-0-4-46-50>
3. Shevchenko P.D., Drobilko A.D., Yeletskiy A.S., et al. [Effective Crop Rotations and Cultivation Methods under Irrigation]. *Zemledelie* = Agriculture. 2007; (4):33-34. Available at: <http://jurzemledelie.ru/arkhiv-nomerov/4-2007> (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
4. Kupryashkin V.F., Ulanov A.S., Naumkin N.I., et al. Analysis of Energy Consumption during Plowing Using a Motor-Block with Moldboard Plow. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):414-427. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.414-427>
5. Bezrukov A.V., Naumkin N.I., Kupriashkin V.Ph., et al. Improving the Efficiency of Tillage Cutters. *Selskiy Mekhanizator* = Rural Mechanic. 2016; (9):6-7. Available at: [http://selmech.msk.ru/916.html#\\_ПОВЫШЕНИЕ\\_ЭФФЕКТИВНОСТИ\\_РАБОТЫ](http://selmech.msk.ru/916.html#_ПОВЫШЕНИЕ_ЭФФЕКТИВНОСТИ_РАБОТЫ) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
6. Kupryashkin V.F., Ulanov A.S., Shlyapnikov M.G., et al. Substantiation of Modes of Arable Unit on the Basis of Motoblock Neva MB-23c-Multiagro Pro Plow P1-20/3 by the Criterion of Absence of Slipping of Wheels with the Soil. *Vestnik NGIEI* = Bulletin NGIEI. 2019; (7):5-15. Available at: [https://yadi.sk/i/BJtkW\\_KB3I5HQ](https://yadi.sk/i/BJtkW_KB3I5HQ) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
7. Kupryashkin V.F., Ulanov A.S. [Theoretical Study of the Stability of a Power Tiller with a Plow When Plowing the Soil]. *Niva Povolzhya* = Cornfield of Volga Region. 2019; (1):101-108. Available at: [https://niva-volga.ru/file/vipuski/2019\\_1\\_50/Содержание.pdf](https://niva-volga.ru/file/vipuski/2019_1_50/Содержание.pdf) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
8. Kupryashkin V.F., Ulanov A.S., Naumkin N.I. Design of a Dynamometric Module for Studying a Motoblock Share-Moldboard Plow and Its Practical Testing by Using Reverse Engineering. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):400-415. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.400-415>
9. Dontsov I.E., Lysych M.N. Installation for Three-Dimensional Dynamic Measurement of the Tilling Tools and the Results of Its Use. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2017; (2):9-15. Available at: [https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory\\_i\\_selkhoz mashiny\\_2\\_2017.pdf](https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory_i_selkhoz mashiny_2_2017.pdf) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
10. Myalenko V.I., Marinov N.A. Spatial Dynamometering of Working Tools of Agricultural Implements. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2017; (5):22-26. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-5-22-26>
11. Guskov V.V., Dzioma A.A., Kolola A.S., et al. Investigation of Process Pertaining to Interaction of Tractor Driving Wheels with Ground Surface. *Nauka i tekhnika* = Science & Technique. 2017; 16(1):83-88. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-1-83-88>
12. Dunayev A.V., Balabanov V.I. Improvement of Technical Maintenance of Machine-and-Tractor Fleet in Agro-Industrial Complex. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2014; (11):28-31. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22515097> (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
13. Bed for Testing Pneumatic Tyres: Patent 1499145 USSR. No. 3891043; appl. 06.05.1985; publ. 07.08.1989. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/SU1499145A1\\_19890807](https://yandex.ru/patents/doc/SU1499145A1_19890807) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
14. Cherepanov L.A., Yelizarov A.A. [Traction Test Bench for Passenger Car Wheels]. *Transportnyye sistemy* = Transport Systems. 2018; (4):22-26. (In Russ.) DOI: [https://doi.org/10.46960/62045\\_2018\\_4\\_22](https://doi.org/10.46960/62045_2018_4_22)
15. Bed for Investigating Tractive-Cohesion Properties of Wheeled Propelling Gear: Patent 1437723 USSR. No. 4250017; appl. 26.05.1987; publ. 15.11.1988. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/SU1437723A1\\_19881115](https://yandex.ru/patents/doc/SU1437723A1_19881115) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
16. [Test Stand for Pneumatic Tires]: Patent 1562730 USSR. No. 4484627; appl. 29.07.1988; publ. 07.05.1990. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/SU1562730A1\\_19900507](https://yandex.ru/patents/doc/SU1562730A1_19900507) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
17. Propulsor Testing Stand: Patent 1029028 USSR. No. 3361468; appl. 05.12.1981; publ. 15.07.1983. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/SU1029028A1\\_19830715](https://yandex.ru/patents/doc/SU1029028A1_19830715) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)





18. Method and Stand for Testing Wheels on Stand: Patent 875240 USSR. No. 2788153; appl. 02.08.1979; publ. 23.10.1981. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/SU875240A1\\_19811023](https://yandex.ru/patents/doc/SU875240A1_19811023) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
19. [Stand for Pneumatic Wheel Tire Research]: Patent 192280 Russian Federation. No. 2019108499; appl. 25.03.2019; publ. 11.09.2019. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/RU192280U1\\_20190911](https://yandex.ru/patents/doc/RU192280U1_20190911) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
20. [Movable Module of the Test Bench]: Patent 188610 Russian Federation. No. 2019102333; appl. 29.01.2019; publ. 17.04.2019. 5 p. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/RU192280U1\\_20190911](https://yandex.ru/patents/doc/RU192280U1_20190911) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
21. Kupryashkin V.F., Ulanov A.S., Kupryashkina V.N., et al. Stand for Determining the Force of Traction on the Driving Wheels Compact Machinery. *Selskiy Mekhanizator* = Rural Mechanic. 2019; (2):38-39. Available at: <http://www.selmech.msk.ru/219.html> (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
22. Gapitch D.S. The Question of Various Constructive Schemes Wheel Tractors Traction Test. *Izvestiya Nizhevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie* = Proceedings of Nizhevolzhskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education. 2014; (1):229-234. Available at: [http://www.volgau.com/Portals/0/izv\\_auk/izv\\_auk\\_full/izvestiya\\_2014\\_33\\_1.pdf?ver=2014-03-26-132210-130](http://www.volgau.com/Portals/0/izv_auk/izv_auk_full/izvestiya_2014_33_1.pdf?ver=2014-03-26-132210-130) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
23. Krupchatnikov R.A., Kovynev B.M. [Analysis of the Results of Comparative Traction Tests of Small Tractors]. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Kursk State Agricultural Academy Bulletin. 2008; (3):39-41. Available at: <https://clck.ru/TED7o> (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
24. Solovov Ye.T. [Justification of Traction Range of a Small Tractor]. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Kursk State Agricultural Academy Bulletin. 2008; (3):37-39. Available at: <https://clck.ru/TEDBh> (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
25. Samsonov V.A., Lachuga Yu.F. Calculation of the Maximum Energy Saturation of an Agricultural Tractor. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2017; (10):33-38. Available at: [https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory\\_i\\_selkhoz mashiny\\_No10\\_2017\\_dlya\\_sajta.pdf](https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory_i_selkhoz mashiny_No10_2017_dlya_sajta.pdf) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
26. Kalinin A.B., Ustroev A.A., Kudriavtsev P.P. Substantiation of Measurement Interval of Sod-Podzolic Soil Penetration Index in Mapping Surveys as a Part of Precision Farming Technologies. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktov rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies and Technical Means of Mechanized Production of Crop and Livestock Products. 2018; (1):112-117. Available at: <https://www.sznii.ru/images/IAEP/jurnal/jurnali/Jurnal94.pdf> (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
27. Garanin G.V. Objects, Indicators, the Control Means and Quality Control of Works in the Field Husbandry. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskiy zhurnal* = The International Technical-Economic Journal. 2016; (2):80-85. Available at: <http://www.tite-journal.com/content/2016/vypusk-no2/#c10356> (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
28. Balandin Ye.A. [Results of Comparative Tests of Traction Wheels of the “Ko-Neva” Two-Wheel Traktor]. *Vestnik studencheskogo nauchnogo obshchestva* = Student Scientific Society Bulletin. 2017; 8(2):87-91. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34921104> (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
29. Narang S., Varshney A.C. Draftability of a 8.95 kW Walking Tractor on Tilled Land. *Journal of Terramechanics*. 2006; 43(4):395-409. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2005.04.006>
30. Rasool S., Raheman H. Improving the Tractive Performance of Walking Tractors Using Rubber Tracks. *Biosystems Engineering*. 2018; 167:51-62. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.12.013>

*Submitted 10.10.2020; approved after reviewing 14.12.2020; accepted for publication 21.12.2020*

*About the authors:*

**Vladimir F. Kupryashkin**, Head of the Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State Uni-

versity (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: L-5153-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7512-509X>, kupwf@mail.ru

**Aleksandr S. Ulanov**, Lecturer of the Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: L-4662-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6041-6911>, ulanow.aleksandr2010@yandex.ru

**Michail G. Shlyapnikov**, Engineer of the Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4784-4695>, mix.shlyapnickoff2015@yandex.ru

**Aleksandr Yu. Gusev**, Postgraduate Student of the Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5808-4169>, a.gusev57@yandex.ru

**Vladimir I. Slavkin**, Professor of the Chair of Operation and Technical Service of Machines, Russian State Agrarian Correspondence University (50 Shosse Entuziastov, Balashikha 143907, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: AAF-2576-2021, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6116-6616>, mcht@rambler.ru

*Contribution of the authors:*

V. F. Kupryashkin – scientific guidance, formulation of the main concept of the study, the formation of conclusions, finalization of the text.

A. S. Ulanov – literature and patent analysis, laboratory research of power tiller drive wheels, processing of experimental results, preparation of the initial version of the text and text editing.

M. G. Shlyapnikov – conducting laboratory tests of the drive wheels of a power tiller, processing the results of the experiment.

A. Yu. Gusev – conducting laboratory tests, text visualization.

V. I. Slavkin – formulation of the basic concept of research, the formation of conclusions.

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

# ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ / PHYSICS AND MATHEMATICS

УДК 519.85:622.276.42

DOI: [10.15507/2658-4123.031.202101.161-174](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.161-174)

Оригинальная статья



## Применение метода Галеркина с разрывными базисными функциями к исследованию динамики изменения температуры и давления в пласте с нагнетательной скважиной и трещиной гидроразрыва

Р. В. Жалнин<sup>1</sup>, В. Ф. Масыгин<sup>1\*</sup>, Е. Е. Пескова<sup>1</sup>,  
В. Ф. Тишкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск,  
Российская Федерация)

<sup>2</sup>ИПМ им. М. В. Келдыша РАН (г. Москва, Российская  
Федерация)

\*[masyaginvf@mrsu.ru](mailto:masyaginvf@mrsu.ru)

**Введение.** В данной работе численно моделируется задача распространения температуры в нефтеносном пласте с трещиной гидроразрыва, в который закачивается охлаждающая жидкость посредством вертикальной нагнетательной скважины.

**Материалы и методы.** Для описания процесса распространения температуры в пласте под действием нагнетаемой в него жидкости используется уравнение конвективного теплообмена Фурье – Кирхгофа. Для решения этого уравнения применяется метод Галеркина с разрывными базисными функциями на разнесенных неструктурированных сетках. Для описания процесса изменения давления в пласте под действием работы нагнетательной скважины применяется уравнение, полученное на основе уравнения неразрывности и закона Дарси. Для его решения используется метод Галеркина с разрывными базисными функциями на неструктурированной треугольной сетке. Для распараллеливания численного алгоритма применяется библиотека MPI.

**Результаты исследования.** В статье представлен численный алгоритм и результаты моделирования динамики полей температуры и давления в нефтеносном пласте с трещиной гидроразрыва, в который посредством вертикальной нагнетательной скважины закачивается охлаждающая жидкость.

**Обсуждение и заключение.** Реализована численная методика на основе разрывного метода Галеркина для математического моделирования температурного поля и поля давления в нефтеносном пласте с трещиной гидроразрыва и нагнетательной скважиной. Полученные картины для распределения температуры и давления в пласте адекватны и хорошо согласуются с заданными начально-краевыми условиями. Дальнейшая работа в данном направлении предполагает моделирование на тетраэдральных неструктурированных сетках для более точного исследования протекающих процессов.

© Жалнин Р. В., Масыгин В. Ф., Пескова Е. Е., Тишкин В. Ф., 2021



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

**Ключевые слова:** разрывный метод Галеркина, вертикальная нагнетательная скважина, гидравлический разрыв пласта, уравнение конвективного теплообмена, уравнение неразрывности, закон Дарси, неструктурированные сетки, разнесенные сетки, MPI

**Финансирование:** исследование выполнено при поддержке ФГБУ «Российский фонд фундаментальных исследований» (проекты № 18-41-130001, № 18-31-00102) и гранта Президента РФ для молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-2007.2018.1).

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

**Для цитирования:** Применение метода Галеркина с разрывными базисными функциями к исследованию динамики изменения температуры и давления в пласте с нагнетательной скважиной и трещиной гидроразрыва / Р. В. Жалнин, В. Ф. Масыгин, Е. Е. Пескова, В. Ф. Тишкин. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202101.161-174](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.161-174) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 1. – С. 161–174.

Original article

## Application of the Discontinuous Galerkin Method to the Study of the Dynamics of Temperature and Pressure Changes in a Formation with an Injection Well and a Hydraulic Fracture

R. V. Zhalnin<sup>a</sup>, V. F. Masyagin<sup>a\*</sup>, E. E. Peskova<sup>a</sup>,  
V. F. Tishkin<sup>b</sup>

<sup>a</sup>National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)

<sup>b</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

\*masyaginvf@mrsu.ru

**Introduction.** In this article, the problem of temperature distribution in an oil-bearing formation with a hydraulic fracture and a vertical injection well is numerically modeled.

**Materials and Methods.** To describe the process of temperature distribution in the formation under the action of the fluid injected into the formation, the Fourier-Kirchhoff equation of convective heat transfer is used. To solve this equation, the discontinuous Galerkin method on staggered unstructured grids is used. To describe the process of pressure change in the formation under the action of the injection well, an equation is used that is obtained based on the continuity equation and Darcy's law. To solve it, the discontinuous Galerkin method on an unstructured triangular grid is used. To parallelize the numerical algorithm, the MPI library is used.

**Results.** The article presents a numerical algorithm and the results of modeling the dynamics of the temperature fields in an oil reservoir with a hydraulic fracture and a vertical injection well.

**Discussion and Conclusion.** A numerical algorithm based on the discontinuous Galerkin method for math modeling of the temperature and pressure fields in a oil-bearing formation with a hydraulic fracture and injection well was developed and implemented. The results obtained for the distribution of temperature and pressure in the fracture are adequate and in good agreement with the specified initial-boundary conditions. Further work in this direction involves modeling on tetrahedral unstructured meshes for a more accurate study of the ongoing processes.

**Keywords:** discontinuous Galerkin method, vertical injection well, hydraulic fracturing, convective heat transfer equation, continuity equation, Darcy's law, unstructured grids, spaced grids, MPI

**Funding:** The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Projects No. 18-41-130001, No. 18-31-00102) and the grant from the President of the Russian Federation for young Russian Candidates of Science (MK-2007.2018.1).

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

**For citation:** Zhالنin R.V., Masyagin V.F., Peskova E.E., et al. Application of the Discontinuous Galerkin Method to the Study of the Dynamics of Temperature and Pressure Changes in a Formation with an Injection Well and a Hydraulic Fracture. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(1):161-174. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.161-174>

## Введение

В настоящее время в связи с вводом в эксплуатацию месторождений с трудноизвлекаемыми запасами и значительной выработкой многих крупных месторождений развитие нефтегазовой промышленности России происходит на фоне внушительного падения запасов нефти и газа. Одним из важнейших факторов, оказывающих влияние на извлечение нефти из месторождения, является состояние призабойной зоны пласта (ПЗП). Важным источником информации о ПЗП являются гидродинамические исследования пластов и скважин (ГДИС).

В устоявшихся методах ГДИС анализируются кривые давления в бесконечном пласте при неустановившемся режиме радиальной фильтрации. Основные подходы (анализ данных по кривой падения давления и по кривой восстановления давления) базируются на решении уравнения пьезопроводности. Однако для более полного исследования скважин очень важно рассматривать, наряду с методами ГДИС, методы термометрии<sup>1</sup>. Для скважин с гидравлическим разрывом пласта такие исследования особенно важны. Отсюда возникает необходимость в разработке математической модели для системы «скважина – трещина – пласт»<sup>2</sup>. Использование методов термометрии скважин и пластов на сегодняшний день

позволяет увеличить нефтеотдачу пластов за счет более эффективных мер по увеличению нефтедобычи.

## Обзор литературы

Настоящая работа посвящена математическому моделированию процесса изменения температурного поля и поля давления в пласте с трещиной гидроразрыва под действием нагнетания охлаждающей жидкости в вертикальную скважину [1]. Для описания математической модели данного процесса используются уравнения конвекции-диффузии. В настоящее время существует множество подходов к решению этих уравнений. Одним из перспективных и активно развивающихся является метод Галеркина с разрывными базисными функциями [2–4], который прекрасно зарекомендовал себя для решения уравнений конвективного типа [5–8]. Также активно развиваются подходы к созданию лимитеров повышенного порядка точности, которые обеспечивают монотонность решения, полученного с помощью разрывного метода Галеркина [9–11]. Дальнейшее развитие метода Галеркина с разрывными базисными функциями привело к его модификации с использованием разнесенных сеток (Staggered Discontinuous Galerkin Method), которая объединяет хорошие качества этих способов [12–15]. К примеру, в ряде работ был построен оригинальный вычисли-

<sup>1</sup> Гидродинамический разрыв пласта / Д. С. Кузнецов [и др.]. Томск, 2008. 114 с.

<sup>2</sup> Чекалюк Э. Б. Термодинамика нефтяного пласта. М.: Недра, 1965. 238 с.; Руководство по исследованию и интерпретации. Термодинамические исследования при различных режимах работы скважин. Уфа, 2002. 248 с.



тельный алгоритм, в котором вспомогательные переменные, введенные для понижения порядка исходных уравнений переноса тепла, рассчитываются на двойственной сетке, представленной в виде медианных контрольных объемов вокруг узлов основной сетки [16–19]. Искомые величины аппроксимируются на основной неструктурированной треугольной сетке.

### Материалы и методы

Для описания динамики изменения температуры, скорости и давления будем рассматривать следующие уравнения, которые подробно представлены в одной из наших работ<sup>3</sup>.

Процесс переноса тепла:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - c\rho \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right), (x, y) \in D, \\ 0 < t \leq T_{\max}, \quad (1)$$

$$T(x, y, 0) = T_0, 0 < t \leq T_{\max}, \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0, (x, y) \in \partial D, 0 < t \leq T_{\max}, \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta(T - T_\Gamma) n_x + \beta(T - T_\Gamma) n_y, \\ (x, y) \in \Gamma, 0 < t \leq T_{\max}.$$

Процесс изменения давления [20]:

$$c_r \frac{\partial p}{\partial t} - \operatorname{div} \left( \frac{\kappa}{\mu} \operatorname{grad}(p) \right) = 0, \\ (x, y) \in D, 0 < t \leq T_{\max}, \quad (2)$$

$$p(x, y, 0) = p_0(x, y), 0 < t \leq T_{\max}, \\ -\frac{\kappa}{\mu} \frac{\partial p}{\partial n} = 0, (x, y) \in \partial D, 0 < t \leq T_{\max}, \\ p = p_\Gamma, (x, y) \in \Gamma, 0 < t \leq T_{\max}.$$

Для описания скорости течения жидкости используется закон Дарси<sup>4</sup>:

$$\mathbf{u} = -\frac{\kappa}{\mu} \operatorname{grad}(p), (x, y) \in D. \quad (3)$$

Ранее авторами был представлен подробный вывод уравнений для решения систем (1)–(3) на неструктурированной двойственной сетке, здесь приведем лишь полученные выражения<sup>5</sup>.

Для решения системы (1) используются выражения:

$$c\rho \sum_{i=0}^2 \frac{dT_{ij}}{dt} \int_{K_j} \phi_i^j \phi_k^j dS = -\oint_{\partial K_j} n_x \omega_x^\Gamma \phi_k^j dl - \\ -\oint_{\partial K_j} n_y \omega_y^\Gamma \phi_k^j dl + \int_{K_j} \omega_x \frac{\partial \phi_k^j}{\partial x} dS + \int_{K_j} \omega_y \frac{\partial \phi_k^j}{\partial y} dS - \\ -c\rho \left( \oint_{\partial K_j} (uT)^\Gamma n_x \phi_k^j dl + \oint_{\partial K_j} (vT)^\Gamma n_y \phi_k^j dl \right) + \\ + c\rho \left( \int_{K_j} T_j \frac{\partial (u\phi_k^j)}{\partial x} dS + \int_{K_j} T_j \frac{\partial (v\phi_k^j)}{\partial y} dS \right), \\ \forall \phi_k^j(x, y), k = 0 \dots 2, \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^2 \omega_{xij} \int_{D_j} \psi_i^j \psi_k^j dS = \\ = -\oint_{\partial D_j} n_x \lambda T^\Gamma \psi_k^j dl + \int_{D_j} T \lambda \frac{\partial \psi_k^j}{\partial x} dS, \\ \forall \psi_k^j(x, y), k = 0 \dots 2, \quad (5)$$

<sup>3</sup> Жалнин Р. В., Масыгин В. Ф., Пескова Е. Е. Применение разрывного метода Галеркина для математического моделирования динамики распространения температуры в пласте с нагнетательной скважиной // Аналитические и численные методы моделирования естественно-научных и социальных проблем: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф., 3–6 декабря 2019 г., Пенза / под ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. И. В. Бойкова. Пенза: Изд-во ПГУ, 2019. С. 54–61. URL: [https://dep\\_vipm.pnsgu.ru/files/dep\\_vipm.pnsgu.ru/konference/achm\\_2019.pdf](https://dep_vipm.pnsgu.ru/files/dep_vipm.pnsgu.ru/konference/achm_2019.pdf) (дата обращения: 12.02.2021).

<sup>4</sup> Там же.

<sup>5</sup> Там же.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=0}^2 \omega_{yij} \int_{D_j} \psi_i^j \psi_k^j dS = \\ & = - \oint_{\partial D_j} n_y \lambda T^\Gamma \psi_k^j dl + \int_{D_j} T \lambda \frac{\partial \psi_k^j}{\partial y} dS, \\ & \forall \psi_k^j(x, y), k = 0 \dots 2. \end{aligned} \quad (6)$$

Для решения систем (2), (3) используются выражения:

$$\begin{aligned} & c_r \sum_{i=0}^2 \frac{dp_{ij}}{dt} \int_{K_j} \phi_i^j \phi_k^j dS = \oint_{\partial K_j} n_x u^\Gamma \phi_k^j dl + \\ & + \oint_{\partial K_j} n_y v^\Gamma \phi_k^j dl - \int_{K_j} u \frac{\partial \phi_k^j}{\partial x} dS - \int_{K_j} v \frac{\partial \phi_k^j}{\partial y} dS, \\ & \forall \phi_k^j(x, y), k = 0 \dots 2, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=0}^2 u_{ij} \int_{K_j} \phi_i^j \phi_k^j dS = \\ & = - \oint_{K_j} n_x \frac{\kappa}{\mu} p^\Gamma \phi_k^j dl + \int_{K_j} p \frac{\kappa}{\mu} \frac{\partial \phi_k^j}{\partial x} dS, \\ & \forall \phi_k^j(x, y), k = 0 \dots 2, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=0}^2 v_{ij} \int_{K_j} \phi_i^j \phi_k^j dS = \\ & = - \oint_{\partial K_j} n_y \frac{\kappa}{\mu} p^\Gamma \phi_k^j dl + \int_{K_j} p \frac{\kappa}{\mu} \frac{\partial \phi_k^j}{\partial y} dS, \\ & \forall \phi_k^j(x, y), k = 0 \dots 2, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\{\phi_i^j(x, y)\}$ ,  $\{\psi_i^j(x, y)\}$  – системы базисных функций, заданные на элементе  $K_j$  (элементы основной треугольной сетки) и  $D_j$  (элементы двойственной сетки) соответственно, в виде проекции на которые находятся температура, давление и компоненты вектора скорости<sup>6</sup>.

Для нахождения величин  $(uT)^\Gamma$  и  $(vT)^\Gamma$  на границах элементов в системе (4) используется потоковая функция

Лакса – Фридрихса<sup>7</sup>. При вычислении потоковых величин  $T^\Gamma$ ,  $\omega_x^\Gamma$ ,  $\omega_y^\Gamma$  на границе элементов в системах (4)–(6) применяется потоковая функция [21]. С учетом использования двойственных сеток потоковые величины представляются в виде:

$$T^\Gamma = T,$$

$$\omega_x^\Gamma = \omega_x - C_{11}(T^+ - T^-)n_x,$$

$$\omega_y^\Gamma = \omega_y - C_{11}(T^+ - T^-)n_y,$$

где  $T^+$  – значение температуры из ячейки, для которой нормаль  $\mathbf{n} = (n_x, n_y)$  является внешней, а  $T^+$  – значение температуры из ячейки, для которой нормаль  $\mathbf{n} = (n_x, n_y)$  является внутренней;  $C_{11}$  – стабилизирующая добавка.

На граничных ребрах, с учетом типа граничного условия, получаем:

$$T = T^+,$$

$$\omega_x^\Gamma = \beta(T - T_\Gamma)n_x,$$

$$\omega_y^\Gamma = \beta(T - T_\Gamma)n_y.$$

Для вычисления потоковых величин  $p^\Gamma$ ,  $u^\Gamma$ ,  $v^\Gamma$  в системах (7)–(9) также используются стабилизирующие добавки, но в данном случае аппроксимация строится только на треугольной сетке. Вид потоковых функций представлен ниже:

$$p^\Gamma = \frac{(p^+ + p^-)}{2},$$

$$u^\Gamma = \frac{(u^+ + u^-)}{2} - C_{11}(p^+ - p^-)n_x,$$

$$v^\Gamma = \frac{(v^+ + v^-)}{2} - C_{11}(p^+ - p^-)n_y,$$

<sup>6</sup> Там же.

<sup>7</sup> Shu C.-W. Numerical Methods for Hyperbolic Conservation Laws // Conference Proceedings (AM 257), 2007. 2007. 32 p. URL: <https://mathematician.de/dl/academic/notes/257/257.pdf> (дата обращения: 11.02.2021).

где верхний индекс «+» обозначает величины из ячейки, для которой нормаль  $\mathbf{n} = (n_x, n_y)$  является внешней, а верхний индекс «-» – величины из ячейки, для которой нормаль  $\mathbf{n} = (n_x, n_y)$  является внутренней;  $C_{11}$  – стабилизирующая добавка.

На граничных ребрах получаем следующий вид:

$$\begin{aligned} p^\Gamma &= p^+, \\ u^\Gamma &= qn_x, \\ v^\Gamma &= qn_y. \end{aligned}$$

В системах (4)–(9) необходимо с высокой точностью вычислять поверхностные и контурные интегралы. Для этого используются квадратурные формулы Гаусса [22]. Поверхностные интегралы вычисляются по трем точкам, контурные интегралы вычисляются с использованием двухточечного шаблона. Для подавления нефизических осцилляций используется лимитер TVD<sup>8</sup>. Для аппроксимации по времени используется явная схема Эйлера.

### Результаты исследования

Описанный вычислительный алгоритм был реализован в виде программного пакета для расчета динамики изменения температуры и давления в нефтеносном пласте. Для сокращения времени расчетов была использована технология параллельных вычислений MPI.

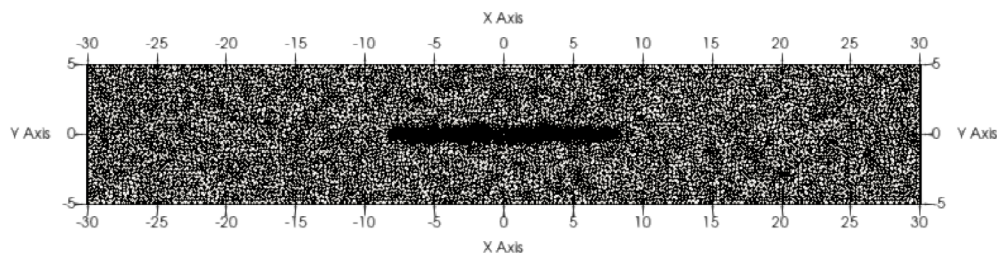
Для анализа полученных результатов рассматривалась следующая постановка задачи:  $T_0 = 363$  К,  $c = 2\,000$  Дж/кг·К,  $\rho = 950$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda = 2,5208$ ,  $\mu = 0,315 \cdot 10^{-4}$  Па·с,  $p_0 = 2,5 \cdot 10^7$  Па,  $p_\Gamma = 2,5 \cdot 10^7$  Па,  $\beta = 150$  Вт/м<sup>2</sup>·К. Для трещины были заданы следующие значения параметров:  $c_r = 4,18968 \cdot 10^{-9}$  Па<sup>-1</sup>,  $\kappa = 2,96 \cdot 10^{-15}$  м<sup>2</sup>. Для пласта были заданы следующие значения параметров:  $c_r = 0,2505 \cdot 10^{-9}$  Па<sup>-1</sup>,  $\kappa = 5 \cdot 10^{-17}$  м<sup>2</sup>.

Рассматривается область длиной 60 м и шириной 10 м. В центре области находится скважина с радиусом 0,025 м. Слева и справа к скважине симметрично примыкают трещины длиной 8 м и шириной 0,005 м каждая.

На рисунке 1 представлена расчетная сетка для описанной задачи. Вдоль трещины наблюдается заметное сгущение сетки. Расчетная сетка содержит 36 339 ячеек основной неструктурированной сетки.

Расчет производился с использованием параллельного комплекса программ на 12 процессорах [23]. На рисунке 2 представлена декомпозиция расчетной области по процессорам.

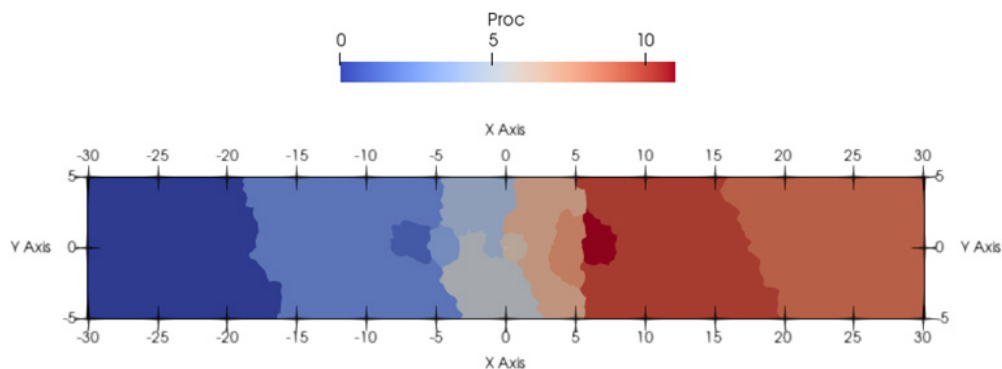
На практике наибольший интерес представляет состояние призабойной зоны пласта. В связи с этим, а также из-за большого масштаба задачи дальнейшие рисунки представляют не всю расчетную область, а ее часть, приближенную к скважине. На рисунке 3



Р и с. 1. Сетка

F i g. 1. Mesh

<sup>8</sup> Куликовский А. Г., Погорелов Н. В., Семенов А. Ю. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений. 2-е изд., испр. и доп. М.: Физматлит, 2012. 656 с.



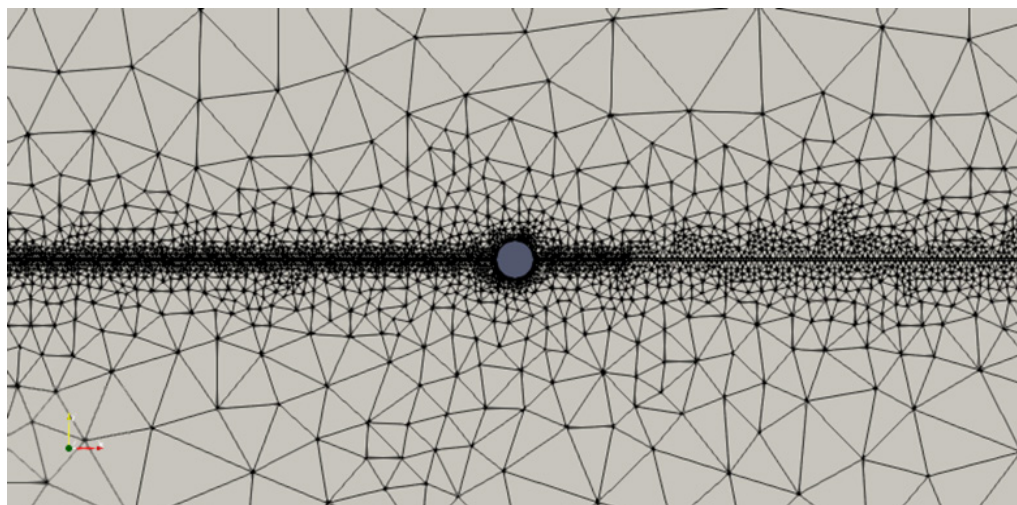
Р и с. 2. Декомпозиция расчетной области  
F i g. 2. Decomposition of the computational domain

представлена расчетная сетка возле скважины, диаметр скважины 0,05 м.

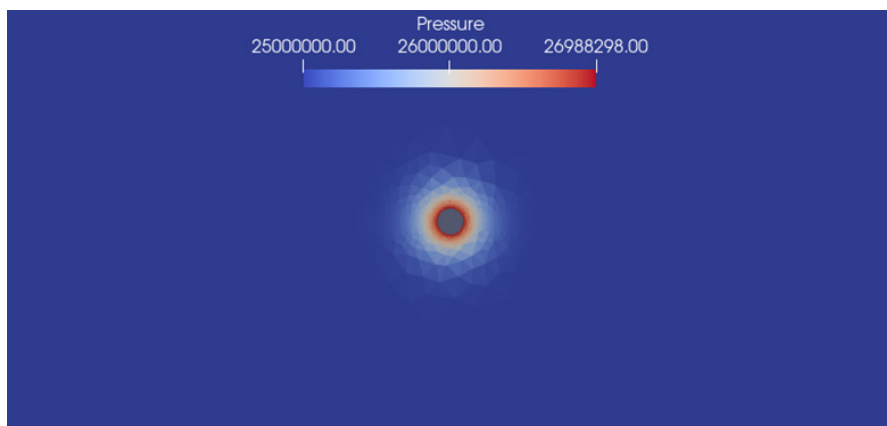
На рисунках 4–6 представлено распределение поля давления в различные моменты времени. Из рисунков видно, что с течением времени вдоль трещины давление растет заметно быстрее, по сравнению с пластом, что согласуется с заданными параметрами задачи.

На рисунках 7–9 представлены картины распределения поля температуры

в различные моменты времени. Из рисунков видно, что холодная закачиваемая через вертикальную нагнетательную скважину жидкость охлаждает пласт. Можно отметить, что вдоль трещины охлаждение происходит немного интенсивнее, что согласуется с наблюдаемой картиной распределения давления. Существенное уменьшение температуры наблюдаются вблизи скважины и вдоль трещины, в частности на ее створках.

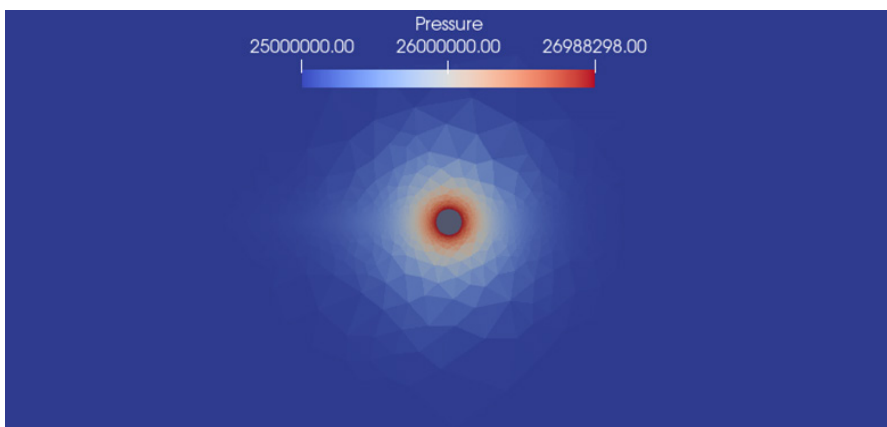


Р и с. 3. Сетка возле скважины  
F i g. 3. Mesh near the well



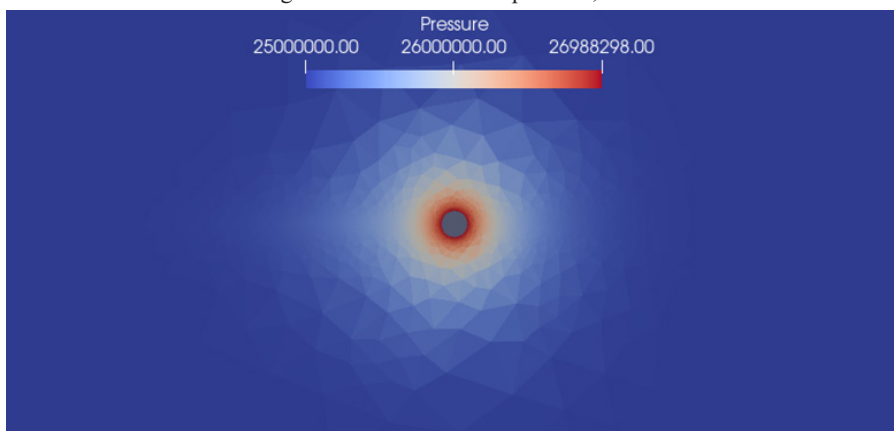
Р и с. 4. Распределение давления,  $t = 1$  с

F i g. 4. Distribution of the pressure,  $t = 1$  s



Р и с. 5. Распределение давления,  $t = 5$  с

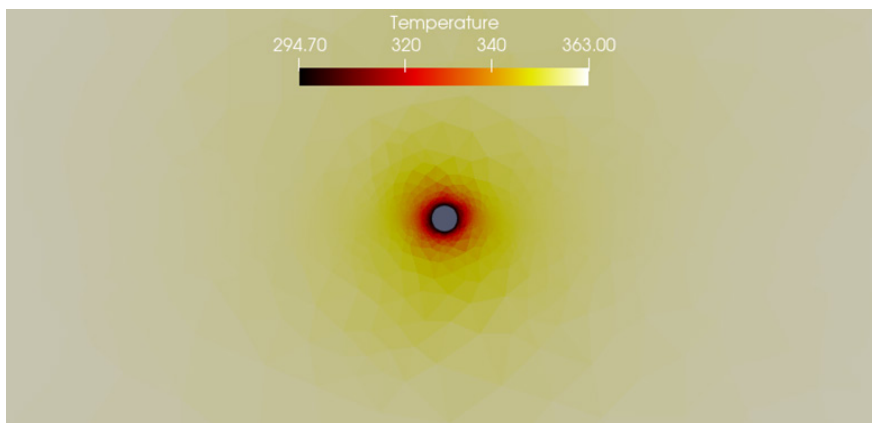
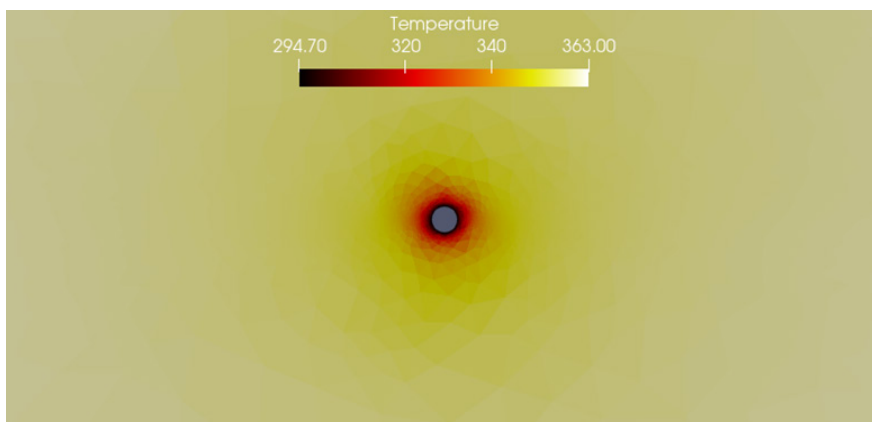
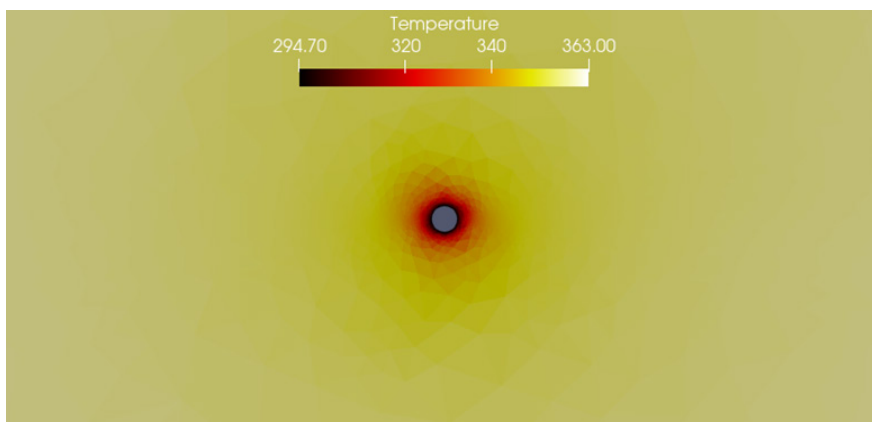
F i g. 5. Distribution of the pressure,  $t = 5$  s



Р и с. 6. Распределение давления,  $t = 10$  с

F i g. 6. Distribution of the pressure,  $t = 10$  s



Р и с. 7. Распределение температуры,  $t = 1$  сF i g. 7. Distribution of the temperature,  $t = 1$  sР и с. 8. Распределение температуры,  $t = 5$  сF i g. 8. Distribution of the temperature,  $t = 5$  sР и с. 9. Распределение температуры,  $t = 10$  сF i g. 9. Distribution of the temperature,  $t = 10$  s

### Обсуждение и заключение

В настоящей статье разработан и реализован вычислительный алгоритм для моделирования динамики изменения температуры и давления в нефтеносном пласте. Алгоритм построен на основе метода Галеркина с разрывными базисными функциями на разнесенных неструктурированных сетках с применением технологии параллельных вычислений MPI. С использованием разработанного программного кода была исследована задача закачивания

в пласт охлаждающей жидкости через вертикальную нагнетательную скважину. Можно сделать вывод, что результаты моделирования показывают адекватные картины для температурного поля и поля давления в пласте, соответствующие заданным начальным краевым условиям. Для более точного моделирования рассматриваемого процесса в дальнейшем планируется решать данную задачу в трехмерной постановке на неструктурированных тетраэдральных сетках.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Применение разрывного метода Галеркина для моделирования температурного поля в вертикальной скважине с трещиной гидроразрыва / В. Ф. Масыгин, Ю. О. Бобренева, И. М. Губайдуллин, Р. В. Жалнин // Системы управления и информационные технологии. – 2016. – № 1 (63). – С. 13–16. – URL: <http://www.sbook.ru/suit/CONTENTS/160100.pdf> (дата обращения: 12.02.2021). – Рез. англ.
2. **Sudirham, J. J.** Space-Time Discontinuous Galerkin Method for Advection–Diffusion Problems on Time-Dependent Domains / J. J. Sudirham, J. J. W. Vegt, R. M. J. Damme. – DOI [10.1016/j.apnum.2005.11.003](https://doi.org/10.1016/j.apnum.2005.11.003) // Applied Numerical Mathematics. – 2006. – Vol. 56, Issue 12. – Pp. 1491–1518. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168927405002151?via%3Dihub> (дата обращения: 12.02.2021).
3. **Oikawa, I.** Hybridized Discontinuous Galerkin Method for Convection–Diffusion Problems / I. Oikawa. – DOI [10.1007/s13160-014-0137-5](https://doi.org/10.1007/s13160-014-0137-5) // Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics. – 2014. – Vol. 31, Issue 2. – Pp. 335–354. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13160-014-0137-5> (дата обращения: 12.02.2021).
4. Local Discontinuous Galerkin Methods with Implicit-Explicit Time-Marching for Multi-Dimensional Convection-Diffusion Problems / H. Wang, S. Wang, Q. Zhang, C.-W. Shu. – DOI [10.1051/m2an/2015068](https://doi.org/10.1051/m2an/2015068) // ESAIM: M2AN. – 2016. – Vol. 50, No. 4. – Pp. 1083–1105. – URL: <https://www.esaim-m2an.org/articles/m2an/abs/2016/04/m2an150054/m2an150054.html> (дата обращения: 12.02.2021).
5. **Cockburn, B.** An Introduction to the Discontinuous Galerkin Method for Convection-Dominated Problems / B. Cockburn. – DOI [10.1007/BFb0096353](https://doi.org/10.1007/BFb0096353) // Advanced Numerical Approximation of Nonlinear Hyperbolic Equations. Lecture Notes in Mathematics ; A. Quarteroni, ed. – Berlin : Springer, 1998. – Vol. 1697. – Pp. 150–268. – URL: <https://link.springer.com/chapter/10.1007%2FBFb0096353> (дата обращения: 12.02.2021).
6. **Cockburn, B.** The Development of Discontinuous Galerkin Methods / B. Cockburn, G. E. Karniadakis, C.-W. Shu. – DOI [10.1007/978-3-642-59721-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-59721-3_1) // Discontinuous Galerkin Methods. Lecture Notes in Computational Science and Engineering ; B. Cockburn, G. E. Karniadakis, C.-W. Shu (eds.). – Berlin : Springer, 2000. – Vol. 11. – Pp. 3–50. – URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-59721-3\\_1#citeas](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-59721-3_1#citeas) (дата обращения: 12.02.2021).
7. **Cockburn, B.** Runge–Kutta Discontinuous Galerkin Methods for Convection-Dominated Problems / B. Cockburn, C.-W. Shu. – DOI [10.1023/A:1012873910884](https://doi.org/10.1023/A:1012873910884) // Journal of Scientific Computing. – 2001. – Vol. 16, Issue 3. – Pp. 173–261. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1023%2FA%3A1012873910884#citeas> (дата обращения: 12.02.2021).
8. **Ladonkina, M. E.** Application of the RKDG Method for Gas Dynamics Problems / M. E. Ladonkina, O. A. Neklyudova, V. F. Tishkin. – DOI [10.1134/S207004821404005X](https://doi.org/10.1134/S207004821404005X) // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2014. – Vol. 6. – Pp. 397–407. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134%2F207004821404005X#citeas> (дата обращения: 12.02.2021).
9. **Ладонкина, М. Е.** Использование усреднений для сглаживания решений в разрывном методе Галеркина / М. Е. Ладонкина, О. А. Неклюдова, В. Ф. Тишкин. – DOI [10.20948/prepr-2017-89](https://doi.org/10.20948/prepr-2017-89) //

Препринт ИПИМ им. М. В. Келдыша. – 2017. – № 89. – 32 с. – URL: [https://keldysh.ru/papers/2017/prep2017\\_89.pdf](https://keldysh.ru/papers/2017/prep2017_89.pdf) (дата обращения: 12.02.2021). – Рез. англ.

10. **Ladonkina, M. E.** Impact of Different Limiting Functions on the Order of Solution Obtained by RKDG / M. E. Ladonkina, O. A. Neklyudova, V. F. Tishkin. – DOI [10.1134/S2070048213040091](https://doi.org/10.1134/S2070048213040091) // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2013. – Vol. 5 – Pp. 346–349. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS2070048213040091> (дата обращения: 12.02.2021).

11. **Krivodonova, L.** Limiters for High-Order Discontinuous Galerkin Methods / L. Krivodonova. – DOI [10.1016/j.jcp.2007.05.011](https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.05.011) // Journal of Computational Physics. – 2007. – Vol. 226, Issue 1. – Pp. 879–896. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999107002136?via%3Dihub> (дата обращения: 12.02.2021).

12. **Zhao, L.** A Priori and a Posteriori Error Analysis of a Staggered Discontinuous Galerkin Method for Convection Dominant Diffusion Equations / L. Zhao, E.-J. Park. – DOI [10.1016/j.cam.2018.06.040](https://doi.org/10.1016/j.cam.2018.06.040) // Journal of Computational and Applied Mathematics. – 2018. – Vol. 346. – Pp. 63–83. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377042718303923?via%3Dihub> (дата обращения: 12.02.2021).

13. **Du, J.** An Adaptive Staggered Discontinuous Galerkin Method for the Steady State Convection–Diffusion Equation / J. Du, E. Chung. – DOI [10.1007/s10915-018-0695-9](https://doi.org/10.1007/s10915-018-0695-9) // Journal of Scientific Computing. – 2018. – Vol. 77. – Pp. 1490–1518. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10915-018-0695-9#article-info> (дата обращения: 12.02.2021).

14. **Tavelli, M.** A Pressure-Based Semi-Implicit Space–Time Discontinuous Galerkin Method on Staggered Unstructured Meshes for the Solution of the Compressible Navier – Stokes Equations at All Mach Numbers / M. Tavelli, M. Dumbser. – DOI [10.1016/j.jcp.2017.03.030](https://doi.org/10.1016/j.jcp.2017.03.030) // Journal of Computational Physics. – 2017. – Vol. 341. – Pp. 341–376. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999117302255?via%3Dihub> (дата обращения: 12.02.2021).

15. **Chung, E. T.** A Sub-Grid Structure Enhanced Discontinuous Galerkin Method for Multiscale Diffusion and Convection-Diffusion Problems / E. T. Chung, W. T. Leung. – DOI [10.4208/cicp.071211.070912a](https://doi.org/10.4208/cicp.071211.070912a) // Communications in Computational Physics. – 2013. – Vol. 14, Issue 2. – Pp. 370–392. – URL: <https://clck.ru/TFW77> (дата обращения: 12.02.2021).

16. Решение трехмерных уравнений теплопроводности с помощью разрывного метода Галеркина на неструктурированных сетках / Р. В. Жалнин, М. Е. Ладонкина, В. Ф. Масыгин, В. Ф. Тишкин. – DOI [10.14498/vsgtu1351](https://doi.org/10.14498/vsgtu1351) // Вестник СамГТУ. Серия: Физико-математические науки. – 2015. – Т. 19, № 3. – С. 523–533. – URL: [http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=vsgtu&paperid=1351&option\\_lang=rus](http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=vsgtu&paperid=1351&option_lang=rus) (дата обращения: 12.02.2021). – Рез. англ.

17. Применение разрывного метода Галеркина для решения параболических задач в анизотропных средах на треугольных сетках / Р. В. Жалнин, М. Е. Ладонкина, В. Ф. Масыгин, В. Ф. Тишкин. – DOI [10.14529/mmp160313](https://doi.org/10.14529/mmp160313) // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». – 2016. – Т. 9, № 3. – С. 144–151. – URL: <https://mmp.susu.ru/pdf/v9n3st13.pdf> (дата обращения: 12.02.2021). – Рез. англ.

18. Решение задач о нестационарной фильтрации вещества с помощью разрывного метода Галеркина на неструктурированных сетках / Р. В. Жалнин, М. Е. Ладонкина, В. Ф. Масыгин, В. Ф. Тишкин. – DOI [10.7868/S0044466916060247](https://doi.org/10.7868/S0044466916060247) // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2016. – Т. 56, № 6. – С. 989–998. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?doi=10.7868/S0044466916060247> (дата обращения: 12.02.2021). – Рез. англ.

19. Применение разрывного метода Галеркина для решения обратной задачи диффузии лекарственных веществ из хитозановых пленок / И. М. Губайдуллин, Р. В. Жалнин, В. Ф. Масыгин [и др.] // Журнал Средневолжского математического общества. – 2016. – Т. 18, № 2. – С. 94–105. – URL: <http://journal.svmo.ru/archive/article?id=1420> (дата обращения: 12.02.2021). – Рез. англ.

20. **Васильев, В. И.** Решение задач однофазной фильтрации методом конечных элементов на вычислительном кластере / В. И. Васильев, М. В. Васильева, Д. Я. Никифоров // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. – 2016. – № 6. – С. 8–17. – URL: <https://clck.ru/TFXvw> (дата обращения: 12.02.2021). – Рез. англ.

21. Unified Analysis of Discontinuous Galerkin Methods for Elliptic Problems / D. N. Arnold, F. Brezzi, B. Cockburn, L. D. Marini. – DOI [10.1137/S0036142901384162](https://doi.org/10.1137/S0036142901384162) // SIAM Journal on Numerical Analysis. – 2002. – Vol. 39, Issue 5. – Pp. 1749–1779. – URL: <https://epubs.siam.org/doi/10.1137/S0036142901384162> (дата обращения: 12.02.2021).

22. Li, B. Q. Discontinuous Finite Elements in Fluid Dynamics and Heat Transfer / B. Q. Li. – DOI 10.1007/1-84628-205-5 // London : Springer, 2006. – 578 p. – URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/1-84628-205-5#authorsandaffiliationsbook> (дата обращения: 12.02.2021).

23. Жалнин, Р. В. Построение параллельного вычислительного алгоритма на основе разрывного метода Галеркина для решения задач конвективного теплообмена на разнесенных неструктурированных сетках / Р. В. Жалнин, В. Ф. Масыгин, Е. Е. Пескова. – DOI 10.15507/2079-6900.20.201804.448-459 // Журнал Средневолжского математического общества. – 2018. – Т. 20, № 4. – С. 448–459. – URL: <http://journal.svmo.ru/archive/article?id=1636> (дата обращения: 12.02.2021). – Рез. англ.

Поступила 09.10.2020; одобрена после рецензирования 10.12.2020; принята к публикации 20.12.2020

Об авторах:

**Жалнин Руслан Викторович**, ведущий научный сотрудник, заведующий кафедрой прикладной математики, дифференциальных уравнений и теоретической механики факультета математики и информационных технологий ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат физико-математических наук, доцент, Researcher ID: Q-6945-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1103-3321>, zhrv@mrsu.ru

**Масыгин Виктор Федорович**, старший научный сотрудник, доцент кафедры прикладной математики, дифференциальных уравнений и теоретической механики факультета математики и информационных технологий ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат физико-математических наук, Researcher ID: C-2439-2013, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6738-8183>, vmasyagin@mrsu.ru

**Пескова Елизавета Евгеньевна**, младший научный сотрудник, доцент кафедры прикладной математики, дифференциальных уравнений и теоретической механики факультета математики и информационных технологий ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат физико-математических наук, Researcher ID: U-7971-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2618-1674>, e.e.peskova@mail.ru

**Тишкин Владимир Федорович**, заведующий отделом ИПМ им. М. В. Келдыша РАН (125047, Российская Федерация, г. Москва, Миусская пл., д. 4), член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, Researcher ID: R-5820-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7295-7002>, v.f.tishkin@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Р. В. Жалнин – обсуждение численного алгоритма в части аппроксимации конвективных слагаемых в уравнении переноса тепла.

В. Ф. Масыгин – реализация основного параллельного численного алгоритма на основе метода Галеркина с разрывными базисными функциями, активное участие в разработке математической модели и в обсуждении выбора начально-краевых условий для расчетной задачи, проведение численных расчетов.

Е. Е. Пескова – обзор литературы по отечественным и зарубежным источникам, участие в разработке математической модели исследуемого процесса.

В. Ф. Тишкин – постановка задачи и общее руководство работой.

**Благодарности:** авторы выражают признательность анонимным рецензентам.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## REFERENCES

1. Masyagin V.F., Bobreneva Yu.O., Gubaidullin I.M., et al. Application of Discontinuous Galerkin Method for Modeling of the Temperature Field in a Vertical Well with Hydraulic Fracture. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* = Control Systems and Information Technology. 2016; (1):13-16. Available at: <http://www.sbook.ru/suit/CONTENTS/160100.pdf> (accessed 12.02.2021). (In Russ.)
2. Sudirham J.J., Vegt J.J.W., Damme R.M.J. Space-Time Discontinuous Galerkin Method for Advection-Diffusion Problems on Time-Dependent Domains. *Applied Numerical Mathematics*. 2006; 56(12):1491-1518. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apnum.2005.11.003>

3. Oikawa I. Hybridized Discontinuous Galerkin Method for Convection–Diffusion Problems. *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*. 2014; 31(2):335–354. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s13160-014-0137-5>
4. Wang H., Wang S., Zhang Q., et al. Local Discontinuous Galerkin Methods with Implicit-Explicit Time-Marching for Multi-Dimensional Convection-Diffusion Problems. *ESAIM: M2AN*. 2016; 50(4):1083–1105. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1051/m2an/2015068>
5. Cockburn B. An Introduction to the Discontinuous Galerkin Method for Convection-Dominated Problems. In: A. Quarteroni, ed. *Advanced Numerical Approximation of Nonlinear Hyperbolic Equations*. Lecture Notes in Mathematics. Vol. 1697. Berlin: Springer; 1998. p. 150–268. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/BFb0096353>
6. Cockburn B., Karniadakis G.E., Shu C.-W. The Development of Discontinuous Galerkin Methods. In: B. Cockburn, G.E. Karniadakis, C.-W. Shu (eds.). *Discontinuous Galerkin Methods*. Lecture Notes in Computational Science and Engineering. Vol. 11. Berlin: Springer; 2000. p. 3–50. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-59721-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-59721-3_1)
7. Cockburn B., Shu C.-W. Runge–Kutta Discontinuous Galerkin Methods for Convection-Dominated Problems. *Journal of Scientific Computing*. 2001; 16(3):173–261. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1012873910884>
8. Ladonkina M.E., Neklyudova O.A., Tishkin V.F. Application of the RKDG Method for Gas Dynamics Problems. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2014; 6:397–407. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S207004821404005X>
9. Ladonkina M.Ye., Neklyudova O.A., Tishkin V.F. Application of Averaging to Smooth the Solution in DG Method. *Preprint IPM im. M.V. Keldysha* = Keldysh Institute Preprints. 2017; (89). 32 p. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.20948/prepr-2017-89>
10. Ladonkina M.E., Neklyudova O.A., Tishkin V.F. Impact of Different Limiting Functions on the Order of Solution Obtained by RKDG. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2013; 5:346–349. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070048213040091>
11. Krivodonova L. Limiters for High-Order Discontinuous Galerkin Methods. *Journal of Computational Physics*. 2007; 226(1):879–896. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.05.011>
12. Zhao L., Park E.-J. A Priori and a Posteriori Error Analysis of a Staggered Discontinuous Galerkin Method for Convection Dominant Diffusion Equations. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2018; 346:63–83. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cam.2018.06.040>
13. Du J., Chung E. An Adaptive Staggered Discontinuous Galerkin Method for the Steady State Convection–Diffusion Equation. *Journal of Scientific Computing*. 2018; 77:1490–1518. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10915-018-0695-9>
14. Tavelli M., Dumbser M. A Pressure-Based Semi-Implicit Space–Time Discontinuous Galerkin Method on Staggered Unstructured Meshes for the Solution of the Compressible Navier–Stokes Equations at All Mach Numbers. *Journal of Computational Physics*. 2017; 341:341–376. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2017.03.030>
15. Chung E.T., Leung W.T. A Sub-Grid Structure Enhanced Discontinuous Galerkin Method for Multiscale Diffusion and Convection-Diffusion Problems. *Communications in Computational Physics*. 2013; 14(2):370–392. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4208/cicp.071211.070912a>
16. Zhalnin R.V., Ladonkina M.E., Masyagin V.F., et al. Solution of 3D Heat Conduction Equations Using the Discontinuous Galerkin Method on Unstructured Grids. *Vestnik SamGTU. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki* = J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci. 2015; 19(3):523–533. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu1351>
17. Zhalnin R.V., Ladonkina M.Ye., Masyagin V.F., et al. Discontinuous Finite-Element Galerkin Method for Numerical Solution of Parabolic Problems in Anisotropic Media on Triangle Grids. *Vestnik YuUrGU. Seriya “Matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniye”* = Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software. 2016; 9(3):144–151. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.14529/mmp160313>
18. Zhalnin R.V., Masyagin V.F., Ladonkina M.E., et al. Solving the Problem of Non-Stationary Filtration of Substance by the Discontinuous Galerkin Method on Unstructured Grids. *Zhurnal vychislitelnoy matematiki i matematicheskoy fiziki* = Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2016; 56(6):989–998. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.7868/S0044466916060247>



19. Gubaydullin I.M., Zhalnin R.V., Masyagin V.F., et al. Application of the DG Method for Solution of Inverse Problem of Medicine Diffusion Out from the Chitosan Film. *Zhurnal Srednevolzhskogo Matematicheskogo Obshchestva* = Middle Volga Mathematical Society Journal. 2016; 18(2):94-105. Available at: <http://journal.svmo.ru/archive/article?id=1420> (accessed 12.02.2021). (In Russ.)
20. Vasilev V.I., Vasileva M.V., Nikiforov D.Ya. Solving One Phase Filtration Problems Using Finite Element Method on Computing Cluster. *Vestnik Severo-Vostochnogo federalnogo universiteta im. M.K. Ammosova* = Vestnik of North-Eastern Federal University. 2016; (6):8-17. URL: <https://clck.ru/TFXvw> (accessed 12.02.2021). (In Russ.)
21. Arnold D.N., Brezzi F., Cockburn B., et al. Unified Analysis of Discontinuous Galerkin Methods for Elliptic Problems. *SIAM Journal on Numerical Analysis*. 2002; 39(5):1749-1779. Available at: <https://doi.org/10.1137/S0036142901384162>
22. Li B.Q. Discontinuous Finite Elements in Fluid Dynamics and Heat Transfer. London: Springer; 2006. 578 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/1-84628-205-5>
23. Zhalnin R.V., Masyagin V.F., Peskova E.E. Construction of a Parallel Computational Algorithm Based on the Galerkin Discontinuous Method for Solving Convective Heat Transfer Problems on Unstructured Staggered Grids. *Zhurnal Srednevolzhskogo Matematicheskogo Obshchestva* = Middle Volga Mathematical Society Journal. 2018; 20(4):448-459. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2079-6900.20.201804.448-459>

*Submitted 09.10.2020; approved after reviewing 10.12.2020; accepted for publication 20.12.2020*

*About the authors:*

**Ruslan V. Zhalnin**, Leading Researcher, Head of the Chair of Applied Mathematics, Differential Equations and Theoretical Mechanics of Faculty of Mathematics and Information Technology, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sc. (Phys.-Math.), Associate Professor, Researcher ID: Q-6945-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1103-3321>, [zhhrv@mrsu.ru](mailto:zhhrv@mrsu.ru)

**Victor F. Masyagin**, Senior Researcher, Associate Professor of the Chair of Applied Mathematics, Differential Equations and Theoretical Mechanics of Faculty of Mathematics and Information Technology, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sc. (Phys.-Math.), Researcher ID: C-2439-2013, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6738-8183>, [vmasyagin@mrsu.ru](mailto:vmasyagin@mrsu.ru)

**Elizaveta E. Peskova**, Researcher, Associate Professor of the Chair of Applied Mathematics, Differential Equations and Theoretical Mechanics of Faculty of Mathematics and Information Technology, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sc. (Phys.-Math.), Researcher ID: U-7971-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2618-1674>, [e.e.peskova@mail.ru](mailto:e.e.peskova@mail.ru)

**Vladimir F. Tishkin**, Head of the Department of Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences (4 Miusskaya Sq., Moscow 125047, Russian Federation), Corresponding Member of RAS, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, Researcher ID: R-5820-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7295-7002>, [v.f.tishkin@mail.ru](mailto:v.f.tishkin@mail.ru)

*Contribution of the authors:*

R. V. Zhalnin – discussion of the numerical algorithm for approximating convective terms in the heat transfer equation.

V. F. Masyagin – implementation of the main parallel numerical algorithm based on the Galerkin method with discontinuous basis functions, active participation in developing the mathematical model and in discussing the choice of initial and boundary conditions for the calculation problem, conducting numerical calculations.

E. E. Peskova – literature review of domestic and foreign sources, participation in the development of a mathematical model of the process under study.

V. F. Tishkin – formulation of the task and general management of the work.

**Acknowledgments:** The authors express gratitude to the anonymous reviewers.

*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 должны 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 (COPE).

Допускается свободное воспроизведение материалов журнала в личных целях и свободное использование в информационных, научных, учебных и культурных целях в соответствии со ст. 1273 и 1274 гл. 70 ч. IV Гражданского кодекса РФ. Иные виды использования возможны только после заключения соответствующих письменных соглашений с правообладателем.

Журнал распространяется по подписке, заявкам высших учебных заведений, учреждений образования и отдельных лиц. Подписной индекс – 70539.

Вдовин Сергей Михайлович – главный редактор. Тел.: +7 (8342) 24-48-88.

Сенин Петр Васильевич – заместитель главного редактора. Тел.: +7 (8342) 23-32-60.

Гордина Светлана Викторовна – ответственный секретарь. Тел.: +7 (8342) 48-14-24.

### Information for authors and readers of the journal

*Engineering Technologies and Systems* journal accepts unpublished earlier original research results promoting the development of science in the field of engineering systems and technologies.

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Technologies 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 (COPE).

Free reproduction of the journal's materials for personal purposes and free use for information, scientific, educational and cultural purposes is allowed in accordance with articles 1273 and 1274 of Chapter 70, part 4 of the Civil Code of the Russian Federation. Other types of use are possible only after the conclusion of relevant written agreements with the right holder.

The journal is distributed on the basis of a subscription, requests of higher education institutions, educational institutions and individuals. The subscription index is 70539.

Sergey M. Vdovin – Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 244888.

Petr V. Senin – Deputy Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 233260.

Svetlana V. Gordina – Executive Editor. Tel.: +7 (8342) 481424.



Редактор – *А. Д. Карпов*  
Перевод *С. В. Голованова, Н. Н. Плеханковой*  
Компьютерная верстка *Е. П. Гординой*  
Информационная поддержка *Р. В. Карасева*

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Подписано в печать 12.03.2021 г. Дата выхода в свет 30.03.2021 г.

Формат 70 × 100 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Усл. печ. л. 14,63.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 250 экз. Заказ № 270. 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 12.03.2021. Date of publishing 30.03.2021.

Sheet size  $70 \times 100 \frac{1}{16}$ , Conventional printed sheets 14,63.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 250 copies. Order no. 270. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation  
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)

