

doi: 10.15507/2658-4123.031.202104

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

Том 31, № 4. 2021

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

16+



Vol. 31, no. 4. 2021

SCIENTIFIC JOURNAL
Founded in January 1990
Periodicity:
Quarterly

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

doi: 10.15507/2658-4123

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

Предыдущее название (до 2019 года):
Вестник Мордовского университета

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

The previous name until beginning of 2019:
Mordovia University Bulletin

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

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

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

Подписной индекс – **70539**

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

Founder, Publisher and Editorial House address:
68/1 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:

01.03.02 Приборы и методы экспериментальной физики

01.03.06 Оптика

01.03.13 Электрофизика, электрофизические установки

04.03.01 Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

04.03.02 Электротехнологии, электрооборудование и электроснабжение агропромышленного комплекса

Журнал индексируется и архивируется в базах данных:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

EBSCO

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

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



The scientific journal **Engineering Technologies and Systems**

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

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

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

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

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

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

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Technologies, Machinery and Equipment for Agro-Industries

Electrotechnics, Electrical Equipment and Power Supply in Agro-Industries

The journal is indexed and archived by databases:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Index of Science Citation

EBSCO

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

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

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

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



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- Сенин Пётр Васильевич** – *главный редактор*, 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)
- Левцев Алексей Павлович** – *заместитель главного редактора*, заведующий кафедрой теплэнергетических систем ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-2429-6777, levtzevar@mail.ru (Саранск, Российская Федерация)
- Гордина Светлана Викторовна** – *ответственный секретарь*, член Европейской ассоциации научных редакторов (EASE), кандидат педагогических наук, ORCID: 0000-0003-2265-418X, vestnik_mrsu@mail.ru (Саранск, Российская Федерация)
- Аллахвердиев Сурхай Рагим оглы** – академик Российской Академии Естествознания, профессор кафедры экологии и природопользования ФГБОУ ВО «Московский педагогический государственный университет» (Москва, Российская Федерация); профессор кафедры лесной индустрии Бартынского государственного университета, доктор биологических наук (Бартын, Турция)
- Булгаков Алексей Григорьевич** – профессор кафедры промышленного и гражданского строительства ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Российская Федерация); профессор строительного факультета Дрезденского технического университета, доктор технических наук, ORCID: 0000-0003-4261-9840 (Дрезден, Германия)
- Димитров Валерий Петрович** – заведующий кафедрой управления качеством ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-1439-1674 (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
- Ерофеев Владимир Трофимович** – академик Российской академии архитектуры и строительных наук, декан архитектурно-строительного факультета ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-8407-8144 (Саранск, Российская Федерация)
- Железникова Ольга Евгеньевна** – директор Института электроники и светотехники ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат технических наук, доцент, Scopus ID: 56362747600 (Саранск, Российская Федерация)
- Игуменов Леонид Александрович** – заведующий кафедрой теоретической, компьютерной и экспериментальной механики ФГАОУ ВО «Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского», доктор физико-математических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-3035-0119 (Нижний Новгород, Российская Федерация)
- Истомина Наталья Леонидовна** – начальник отдела физических наук Российской академии наук, заместитель академика-секретаря по научно-организационной работе ОФН РАН; профессор кафедры управления инновациями ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»; главный редактор научно-технического журнала «Фотоника», доктор физико-математических наук, ORCID: 0000-0001-6008-1226 (Москва, Российская Федерация)
- Кечемайкин Владимир Николаевич** – директор Рузаевского института машиностроения ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат экономических наук, доцент (Саранск, Российская Федерация)
- Котин Александр Владимирович** – профессор кафедры механизации переработки сельскохозяйственной продукции ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор технических наук, ORCID: 0000-0001-8235-0052 (Саранск, Российская Федерация)
- Кусмарцев Федор Васильевич** – декан физического факультета Университета Лафборо (Лафборо, Великобритания); профессор Колледжа искусств и наук Университета Халифы, кандидат физико-математических наук, Scopus ID: 7006372417 (Абу-Даби, ОАЭ)
- Кухарев Олег Николаевич** – ректор ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-3519-4066 (Пенза, Российская Федерация)
- Микаева Светлана Анатольевна** – заведующий кафедрой электроники ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», доктор технических наук, доцент, Scopus ID: 8542764000 (Москва, Российская Федерация)
- Нищев Константин Николаевич** – директор Института физики и химии ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-7905-3700 (Саранск, Российская Федерация)
- Прытков Юрий Николаевич** – директор Аграрного института ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Саранск, Российская Федерация)
- Рябочкина Полина Анатольевна** – научный руководитель лаборатории оптической спектроскопии лазерных материалов ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор физико-математических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-8503-8486 (Саранск, Российская Федерация)
- Салем Абдель-Бадех Мохамед** – руководитель Исследовательских лабораторий в области искусственного интеллекта и знаний, профессор факультета компьютерных и информационных наук университета Ain Shams, доктор наук в области компьютерных технологий, заслуженный профессор, ORCID: 0000-0003-0268-6539 (Каир, Египет)
- Скрябин Владимир Александрович** – профессор кафедры технологий и оборудования машиностроения ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», доктор технических наук, ORCID: 0000-0001-7156-9198 (Пенза, Российская Федерация)
- Чучаев Иван Иванович** – доцент факультета математики и информационных технологий ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат физико-математических наук (Саранск, Российская Федерация)
- Шишелова Тамара Ильинична** – профессор кафедры физики ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», доктор технических наук, Scopus ID: 6507978465 (Иркутск, Российская Федерация)
- Ямашкин Анатолий Александрович** – декан географического факультета ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор географических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-9995-8371 (Саранск, Российская Федерация)

EDITORIAL BOARD

- Petr V. Senin** – *Editor-in-Chief*, Vice-Rector for Science and Research, National Research Mordovia State University, Dr.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: 0000-0003-3400-7780, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru (Saransk, Russian Federation)
- Alexey P. Levstev** – *Deputy Editor-in-Chief*, Head of the Heat and Power Systems Chair, National Research Mordovia State University, Dr.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: 0000-0003-2429-6777, levstevap@mail.ru (Saransk, Russian Federation)
- Svetlana V. Gordina** – *Executive Editor*, Member of European Association of Science Editors (EASE), Cand.Sci. (Ped.), ORCID: 0000-0003-2265-418X, vestnik_mrsu@mail.ru (Saransk, Russian Federation)
- Surhay Allahverdi** – Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Professor of the Ecology and Nature Management Chair, Moscow Pedagogical State University (Moscow, Russian Federation); Head of the Forest Industry Chair, Bartin University, Dr.Sci. (Biol.) (Bartın, Turkey)
- Aleksey G. Bulgakov** – Professor of the Chair of Industrial and Civil Engineering, Southwest State University (Kursk, Russian Federation); Professor of Faculty of Civil Engineering, Dresden University of Technology, Dr.Sci. (Engr.), ORCID: 0000-0003-4261-9840 (Dresden, Germany)
- Ivan I. Chuchayev** – Associate Professor of the Mathematics and Information Technology Faculty, National Research Mordovia State University, Cand.Sci. (Phys.-Math.) (Saransk, Russian Federation)
- Valeriy P. Dimitrov** – Head of the Chair of Quality Management, Don State Technical University, Dr.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: 0000-0003-1439-1674 (Rostov-on-Don, Russian Federation)
- Leonid A. Igumnov** – Head of the Numerical Simulation of Theoretical, Computer and Experimental Mechanics Chair, Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, ORCID: 0000-0003-3035-0119 (Nizhniy Novgorod, Russian Federation)
- Natalia L. Istomina** – Head of Physical Sciences Department, Russian Academy of Sciences, Deputy of Academic Secretary for Scientific and Organizational Work; Professor of the Innovation Management Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University); Editor-in-Chief, Photonics Russia, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID: 0000-0001-6008-1226 (Moscow, Russian Federation)
- Vladimir N. Kechemaykin** – Director of the Ruzaevka Institute of Mechanical Engineering, National Research Mordovia State University, Cand.Sci. (Econ.), Associate Professor (Saransk, Russian Federation)
- Aleksandr V. Kotin** – Professor of the Chair of Mechanization of Agricultural Production Processing, National Research Mordovia State University, Dr.Sci. (Engr.), ORCID: 0000-0001-8235-0052 (Saransk, Russian Federation)
- Fedor V. Kusmartsev** – Head of Physics Department, Loughborough University (Loughborough, Great Britain); Professor of College of Art and Science, Khalifa University, Ph.D. (Phys.-Math.), Scopus ID: 7006372417 (Abu Dhabi, UAE)
- Oleg N. Kukharev** – Rector of Penza State Agrarian University, Dr.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: 0000-0002-3519-4066 (Penza, Russian Federation)
- Svetlana A. Mikayeva** – Head of the Electronics Chair, MIREA – Russian Technological University, Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, Scopus ID: 8542764000 (Moscow, Russian Federation)
- Konstantin N. Nishchev** – Director of Institute of Physics and Chemistry, National Research Mordovia State University, Cand.Sci. (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, Dr.Sci. (Agric.), Professor (Saransk, Russian Federation)
- Polina A. Ryabochkina** – Scientific Director of the Laboratory of Optical Spectroscopy of Laser Materials, National Research Mordovia State University, Dr.Sci. (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, Dr.Sci. (CS), Emeritus Professor, ORCID: 0000-0003-0268-6539 (Cairo, Egypt)
- Tamara I. Shishelova** – Professor of the Physics Chair, Irkutsk National Research Technical University, Dr.Sci. (Engr.), Scopus ID: 6507978465 (Irkutsk, Russian Federation)
- Vladimir A. Skryabin** – Professor of the Chair of Technology and Equipment in Mechanical Engineering, Penza State University, Dr.Sci. (Engr.), ORCID: 0000-0001-7156-9198 (Penza, Russian Federation)
- Anatoliy A. Yamashkin** – Dean of Geography Faculty, National Research Mordovia State University, Dr.Sci. (Geog.), Professor, ORCID: 0000-0001-9995-8371 (Saransk, Russian Federation)
- Vladimir T. Yerofeev** – Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Dean of Architectural and Civil Engineering Faculty, National Research Mordovia State University, Dr.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: 0000-0001-8407-8144 (Saransk, Russian Federation)
- Olga Ye. Zheleznikova** – Director of Institute of Electronics and Light Engineering, National Research Mordovia State University, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor, Scopus ID: 56362747600 (Saransk, Russian Federation)



СОДЕРЖАНИЕ

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Пьянзов С. В., Сенин П. В., Ионов П. А., Столяров А. В., Земсков А. М., Ильин М. В., Кравченко И. Н. Разработка программного обеспечения стенда для контроля технического состояния объемных гидроприводов	500
Скрябин В. А. Особенности обработки валов роторов турбокомпрессоров дизелей инструментом с многослойным покрытием.....	518

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Следков Ю. Г., Хорошко Л. Л., Кузнецов П. М., Бутко А. О. Цифровой двойник процессов восстановления сельскохозяйственной техники.....	530
Грядинов С. С., Сиваков В. В. Применение наплавочных материалов для повышения долговечности рабочих органов дисковых борон.....	544
Петрашев А. И., Князева Л. Г. Повышение пропускной способности шланга с электронагревательной спиралью для подачи загущенного консерванта на распыление.....	559

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Анисимов А. В., Рудик Ф. Я. Экспериментальное определение влияния конструктивных и режимных параметров шелушильной машины на критерии эффективности процесса шелушения....	577
Брагинец С. В., Бахчевников О. Н., Алферов А. С. Результаты экспериментальных исследований измельчения высушенных волокнистых растительных материалов.....	591
Чугунов М. В., Полунина И. Н., Дивин А. Г., Генералова А. А., Никулин А. А., Бычков Д. С. Интегрированная модель мобильной роботизированной платформы	609
<i>Информация для авторов и читателей (на рус. яз.).....</i>	628
<i>Информация для авторов и читателей (на англ. яз.).....</i>	630

CONTENTS

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

Pyanzov S. V., Senin P. V., Ionov P. A., Stolyarov A. V., Zemskov A. M., Ilyin M. V., Kravchenko I. N. Developing the Test Bench Software for the Technical Inspection of Volumetric Hydraulic Drives.....	500
Skryabin V. A. Features of Machining Rotor Shafts of Diesel Engine Turbochargers with a Multilayer-Coated Tool.....	518

TECHNOLOGIES AND MEANS OF MAINTENANCE IN AGRICULTURE

Sledkov Yu. G., Khoroshko L. L., Kuznetsov P. M., Butko A. O. The Digital Twin for Agricultural Machinery Restoration Processes.....	530
Gryadunov S. S., Sivakov V. V. The Use of Surfacing Materials to Increase the Durability of Disc Harrow Working Elements.....	544
Petrashev A. I., Knyazeva L. G. Increasing the Flow Capacity of Hoses with Electrical-Heater Coils to Supply Thickened Preservatives for Spraying.....	559

TECHNOLOGIES AND MEANS OF AGRICULTURAL MECHANIZATION

Anisimov A. V., Rudik F. Ya. Experimental Determination of the Influence of the Peeling Machine Constructive and Operating Parameters on the Criteria of the Peeling Process Efficiency ...	577
Braginets S. V., Bakhchevnikov O. N., Alferov A. S. Experimental Data of Grinding Dried Fibrous Plant Materials.....	591
Chugunov M. V., Polunina I. N., Divin A. G., Generalova A. A., Nikulin A. A., Bychkov D. S. Integrated Mobile Robotic Platform Model.....	609
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in Russian)</i>	628
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in English)</i>	630

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

УДК 621.45.018.2:62-82

doi: 10.15507/2658-4123.031.202104.500-517

Научная статья



Разработка программного обеспечения стенда для контроля технического состояния объемных гидроприводов

С. В. Пьянзов^{1*}, П. В. Сенин¹, П. А. Ионов¹, А. В. Столяров¹,
А. М. Земсков¹, М. В. Ильин¹, И. Н. Кравченко²

¹ *Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет*

(г. Саранск, Российская Федерация)

² *РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева*
(г. Москва, Российская Федерация)

* *serega.pyanzov@yandex.ru*

Аннотация

Введение. Статья посвящена описанию специализированного программного обеспечения стенда, разработанного для контроля технического состояния отечественных и зарубежных объемных гидроприводов в условиях ремонтных предприятий и сервисных центров. Представлены результаты стендовых испытаний с использованием гидравлического стенда и программного обеспечения.

Материалы и методы. Для разработки прикладного программного обеспечения в работе использован графический язык программирования G среды программирования Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench (LabView) компании National Instruments. Достоверность полученных результатов подтверждена серией стендовых испытаний с отечественными и зарубежными объемными гидроприводами.

Результаты исследования. Разработано и практически реализовано новое специализированное программное обеспечение стенда для контроля технического состояния разномарочных объемных гидроприводов отечественного и зарубежного производства в условиях ремонтных предприятий и сервисных центров. Программное обеспечение собирает, обрабатывает и сохраняет данные с датчиков в процессе испытания, рассчитывает и выводит измерительную информацию, проводит внелабораторный анализ процесса испытаний в графическом, текстовом и видеоформатах, а также тарировку датчиков, хранит результаты испытаний в электронной библиотеке программы. Специализированное программное обеспечение работает под управлением операционной системы Microsoft Windows 7 x86 (32-bit) и устанавливается на персональном компьютере блока обработки данных гидравлического стенда.

© Пьянзов С. В., Сенин П. В., Ионов П. А., Столяров А. В., Земсков А. М., Ильин М. В., Кравченко 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.

Разработанное программное обеспечение характеризуют эргономичность пользовательского интерфейса, возможность контролировать все параметры диагностирования испытуемых объемных гидроприводов.

Обсуждение и заключение. Специализированное программное обеспечение и стенд позволяют в условиях ремонтных предприятий и сервисных центров с высокой точностью определять (контролировать) все параметры технического состояния наиболее распространенных отечественных и зарубежных объемных гидроприводов в соответствии с требованиями заводов-изготовителей.

Ключевые слова: стенд, специализированное программное обеспечение, объемный гидропривод, параметры диагностирования, контроль технического состояния

Финансирование: публикация подготовлена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям. Проект № 4175ГС1/68670 от 23 июля 2021 г. «Разработка технологической основы формирования электроискровых покрытий с высокими функциональными свойствами».

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Разработка программного обеспечения стенда для контроля технического состояния объемных гидроприводов / С. В. Пьянзов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 4. С. 500–517. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.500-517>

Original article

Developing the Test Bench Software for the Technical Inspection of Volumetric Hydraulic Drives

S. V. Pyanzov^{a*}, P. V. Senin^a, P. A. Ionov^a, A. V. Stolyarov^a,
A. M. Zemskov^a, M. V. Ilyin^a, I. N. Kravchenko^b

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

^b Russian Timiryazev State Agrarian University
(Moscow, Russian Federation)

* serega.pyanzov@yandex.ru

Abstract

Introduction. The article describes the test bench specialized software, developed for technical inspection of domestic and foreign volumetric hydraulic drives in repair enterprises and service centers. The results of bench tests using a hydraulic bench and software are presented. **Materials and Methods.** For the application software development, G graphical programming language of the Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench (Lab-View) programming environment developed by the National Instruments Company has been used. The reliability of the results obtained has been confirmed by a series of bench tests of domestic and foreign volumetric hydraulic drives.

Results. There has been developed and implemented new test bench software for the technical inspection of hydraulic drives of different models from domestic and foreign manufacturers in repair plants and service centers. The software is used to capture, process and store data from the sensors during testing, to calculate and output measurement data, to conduct nonlaboratory analysis of the testing process in graphical, textual and video formats, to calibrate sensors, and to store the test results in the electronic library system. The specialized software runs under the Microsoft Windows 7 x86 (32-bit) operating system and is installed on a personal computer of the hydraulic bench data processing unit. The developed software is characterized by the ergonomics of the user interface, the ability to control all the parameters of diagnosing the tested volumetric hydraulic drives.

Discussion and Conclusion. Specialized software and the test bench permit high accurate monitoring of all technical condition parameters of the most common domestic and foreign volumetric hydraulic drives in accordance with the requirements of the manufacturers in the repair enterprises and service centers.

Keywords: test bench, specialized software, volumetric hydraulic drive, diagnostic parameters, technical inspection

Funding: The publication was prepared with the financial support of the Foundation for Assistance to Innovations. Project no. 4175GS1/68670 of July 23, 2021 “Development of the technological basis for the formation of electrospark coatings with high functional properties”.

The authors declare no conflict of interest.

For citation: Pyanzov S.V., Senin P.V., Ionov P.A., et al. Developing the Test Bench Software for the Technical Inspection of Volumetric Hydraulic Drives. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(4):500-517. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.500-517>

Введение

В настоящее время в различных отраслях экономики Российской Федерации активно развивается процесс цифровизации. Данный процесс не обошел стороной сельское хозяйство. Министерством сельского хозяйства РФ в рамках реализации национальной платформы «Цифровое сельское хозяйство» было обозначено, что одной из приоритетных задач является цифровое трансформирование сельскохозяйственной отрасли за счет внедрения новых цифровых, информационных, телекоммуникационных технологий и средств, обеспечивающих технологический прорыв за счет увеличения урожайности, производительности труда и других показателей.

Увеличение производительности труда в сельскохозяйственной отрасли невозможно без современной энергонасыщенной, высокопроизводительной техники, в конструктивное исполнение которой входят цифровые средства диагностирования, а именно бортовая компьютерная система, реализованная с помощью электронного блока управления (ЭБУ). Основной функцией ЭБУ является контролирование параметров работы различных систем, сообщение о неисправностях и плановом техническом обслуживании. В научных работах исследователи отмечают сложность контроля технического состояния гидроагрегатов привода ходовой части (объемного гидропривода) системой ЭБУ в процессе эксплуатации техники [1–3].

Это связано, прежде всего, с большим количеством диагностируемых параметров, различной конструкцией систем управления, защиты и контроля, невозможностью определения наиболее значимых параметров диагностирования (объемного КПД и выходного крутящего момента). Достоверно контролировать техническое состояние объемных гидроприводов и делать заключение об их работоспособности возможно только с помощью современных стационарных средств диагностирования (гидравлических стендов), имеющих в своем составе персональный компьютер со специализированным программным обеспечением (ПО) [4; 5].

Существующие и применяемые сегодня средства диагностирования в условиях ремонтных предприятий и сервисных центров не имеют в своем составе специализированного программного обеспечения и лишены возможности подключения к персональному компьютеру, что сказывается на качестве и достоверности диагностики.

Поэтому актуальным научным направлением является разработка стационарного средства диагностирования со специализированным программным обеспечением для контроля технического состояния отечественных и зарубежных объемных гидроприводов в условиях ремонтных предприятий и сервисных центров [6–8].

Цель исследования – описать функциональные возможности нового

Процессы и машины агроинженерных систем

специализированного ПО гидравлического стенда для контроля технического состояния отечественных и зарубежных объемных гидроприводов в условиях ремонтных предприятий и сервисных центров, а также реализовать стендовые испытания для подтверждения достоверности диагностирования объемных гидроприводов с использованием гидравлического стенда и ПО.

В статье содержатся не опубликованные ранее материалы, полученные в результате диссертационного исследования [1].

Обзор литературы

Отечественное и зарубежное оборудование, в составе которого имеется специализированное программное обеспечение с различным набором функциональных возможностей, используется для контроля технического состояния бывших в эксплуатации и отремонтированных объемных гидроприводов в условиях ремонтных предприятий и сервисных центров. В настоящее время серийно выпускается следующее оборудование: стенд СДГ-И компании ООО «Гидроспецстенд» (г. Москва) [9]; испытательный стенд компании ООО «ГидроСпецПрибор» (г. Омск) [10]; испытательный гидравлический стенд «Ярстройрезерв» (г. Ярославль) [11]; портативный гидротестер МУНТ производства Jinan Highland Hydraulic Pump Co. (Китай) [12]; гидротестер серии СТ 300R-SR-B-B-6 компании Webtec (Великобритания) [13].

Производственная компания ООО «Гидроспецстенд» выпускает стенды серий СДГ-И, в составе которых имеется ПО, позволяющее собирать и обрабатывать информацию с датчиков в режиме реального времени. В качестве

достоинств программного обеспечения отмечается возможность регистрации таких параметров диагностирования объемного гидропривода, как давление в гидравлических линиях, подача/расход и температура рабочей жидкости в режиме реального времени, а также хранение и обработка измерительной информации. Среди недостатков ПО ограниченные диапазоны и количество исследуемых параметров диагностирования объемного гидропривода, низкая точность и достоверность результатов (погрешность измерения 3 %), невозможность контролировать наиболее важные параметры диагностирования (фактический крутящий момент гидромотора и объемный КПД испытуемого объемного гидропривода)¹ [3].

ООО «ГидроСпецПрибор» производит испытательные стенды, в которых в качестве измерительной аппаратуры используются гидротестеры ГТ-600М, имеющие специализированное ПО и возможность подключения к персональному компьютеру [14; 15]. Достоинства гидротестера и ПО – простота пользовательского интерфейса, низкая стоимость, возможность регистрации в процессе испытаний подачи/расхода рабочей жидкости, давления, объемного КПД. Недостатки – невозможно контролировать температуру рабочей жидкости с помощью ПО и сохранять отчеты об испытаниях объемного гидропривода, гидротестер сложно монтировать в линию объемного гидропривода, нельзя определить фактический крутящий момент, развиваемый гидромотором [16].

В испытательном стенде компании «Ярстройрезерв» используется ПО, разработанное компанией Jinan Highland Hydraulic Pump Co. ПО позволяет

¹ Пьянзов С. В., Ионов П. А., Коломейченко А. А. Требования к программному обеспечению устройства для оценки технического состояния объемных гидроприводов // Материалы Междунар. науч.-практич. конф. «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы» (21–22 ноября 2019). Саранск, 2019. С. 406–413. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42493269> (дата обращения: 10.07.2021).

собирает и обрабатывает измерительную информацию со всех датчиков стенда в режиме реального времени и отображает ее в виде графических зависимостей (давление-время, объемный КПД – давление, давление, подача/расход-время, давление-подача/расход) [2; 17; 18]. У ПО есть следующие недостатки: необходимо наличие сложных и дорогостоящих электронных компонентов для реализации связи программы с датчиками стенда, невозможно контролировать и выводить на график такие параметры диагностирования, как фактический крутящий момент гидромотора, частота вращения гидронасоса/гидромотора и температура рабочей жидкости. Измерительная база данных об испытанных объемных гидроприводах отсутствует. Следует отметить и такой недостаток, как отсутствие русскоязычного пользовательского интерфейса, что затрудняет использование данного ПО на территории Российской Федерации [19; 20].

Компания Jinan Highland Hydraulic Pump Co. серийно выпускает портативные гидротестеры для контроля технического состояния объемных гидроприводов марки МУНТ, которые могут применяться в составе испытательных стендов. Гидротестеры имеют специализированное программное обеспечение с возможностью подключения к персональному компьютеру. ПО гидротестеров имеет следующие достоинства: программа обеспечивает контроль подачи/расхода и температуры рабочей жидкости, развиваемого давления испытываемого объемного гидропривода и рассчитывает величины объемного КПД объемного гидропривода [21]. Среди недостатков большая погрешность измерения (2,5 %); сложность монтажа в магистраль гидравлической системы объемного гидропривода; невозможно контролировать и выводить на график фактический крутящий момент

гидромотора испытываемого объемного гидропривода, частоты вращения гидронасоса/гидромотора; нельзя сохранять результаты проведенных испытаний; отсутствует русскоязычный пользовательский интерфейс.

Гидротестер компании Webtec предназначен для проверки работоспособности объемных гидроприводов и оснащен портативным считывающим устройством с возможностью подключения к персональному компьютеру. Для реализации связи портативного считывающего устройства и персонального компьютера компания разработала ПО НРМComm версии 7.1. Основные достоинства – регистрация давления в линиях объемного гидропривода, подачи/расхода и температуры рабочей жидкости в режиме реального времени с построением графических зависимостей; высокая точность измерения обозначенных параметров диагностирования (погрешность не более 1 %); возможность анализа полученных измерительных результатов [13; 22]. Однако отмечены следующие минусы: высокая стоимость гидротестера и портативного считывающего устройства; невозможно контролировать частоту вращения гидронасоса/гидромотора и определять фактический крутящий момент гидромотора испытываемого объемного гидропривода; базы данных испытанных гидроагрегатов отсутствуют; нельзя получить объемный КПД гидропривода в целом; нет русскоязычного пользовательского интерфейса [23].

Анализ научно-технической литературы и информационных материалов заводов-изготовителей позволил установить, что существующее в настоящее время программное обеспечение не позволяет оценить все характеристики объемного гидропривода, а ряд программ имеют достаточно большую погрешность измерения (от 2,5 до 3,0 %), что не соответствует требованиям

ГОСТа 17108² [1; 3; 4]. У зарубежного ПО высокая стоимость, ограниченные функциональные возможности и отсутствует русскоязычный пользовательский интерфейс.

Опираясь на опыт исследователей, описанный выше, сотрудники кафедры технического сервиса машин МГУ им. Н. П. Огарёва спроектировали новый гидравлический стенд, позволяющий контролировать техническое состояние гидроагрегатов в соответствии с методическими рекомендациями отечественных и зарубежных заводов-изготовителей [1]. Авторский коллектив ставит перед собой актуальную задачу разработать собственное программное обеспечение для нового гидравлического стенда, чтобы повысить точность и достоверность оценки параметров диагностирования.

Материалы и методы

Специализированное ПО применяется при диагностировании объемных гидроприводов на гидравлическом стенде и позволяет реализовать сбор, обработку и сохранение данных с датчиков в процессе испытания (датчики частоты вращения ISB A2A-31P-4-LZ, подачи/расхода СТ-300R-SR-B-B-6, давления/температуры SR-РТТ-600-05-0С). ПО рассчитывает и выводит значения КПД и крутящего момента испытуемого объемного гидропривода, проводит внелабораторный анализ процесса испытаний в графическом, текстовом и видеоформатах, а также тарифовку датчиков, хранит результаты испытаний в электронной библиотеке программы [24; 25].

ПО работает под управлением операционной системы Microsoft Windows 7 x86 (32-bit) и устанавливается на персональном компьютере, расположенном в блоке обработки данных

гидравлического стенда, который представлен на рисунке 1.

Блок обработки данных гидравлического стенда включает в себя многофункциональную плату сбора данных National Instruments USB-6251 4, обеспечивающую обработку, преобразование и передачу выходных измерительных сигналов с датчиков стенда в персональный компьютер 5 с последующим выводом измерительной информации в окно визуализации 2. Коннекторный блок National Instruments SCB-68 6 обеспечивает согласование, питание и передачу измерительных сигналов с датчиков стенда в плату сбора данных USB-6251. Связь датчиков стенда с блоком обработки данных осуществляется с помощью кабеля связи через специализированный разъем 7.

Специализированное ПО разработано в среде National Instruments LabVIEW 2012 на графическом языке программирования G. Оно имеет модульную структуру и состоит из основной программы, программ внелабораторного анализа полученных данных и настройки портов передачи измерительных данных.

ПО можно устанавливать на любой персональный компьютер, не входящий в состав гидравлического стенда. Однако в данном случае функции, связанные с измерениями параметров диагностирования испытуемых объемных гидроприводов, будут недоступны.

Результаты исследования

Авторский коллектив разработал новое специализированное программное обеспечение для гидравлического стенда [1]. Оно способно контролировать все параметры диагностирования отечественных и зарубежных объемных гидроприводов, регламентированные заводами-изготовителями [4–8].

² ГОСТ 17108-86. Гидропривод объемный и смазочные системы. Методы измерения параметров. М., 2000.



Р и с. 1. Блок обработки данных гидравлического стенда: 1 – терминал; 2 – окно визуализации; 3 – антивандальная клавиатура; 4 – многофункциональная плата сбора данных National Instruments USB-6251; 5 – персональный компьютер; 6 – коннекторный блок National Instruments SCB-68; 7 – разъем для подключения кабеля связи

F i g. 1. Data processing unit of hydraulic bench: 1 – terminal; 2 – visualization window; 3 – vandal-proof keyboard; 4 – National Instruments USB-6251 multifunctional data collection board; 5 – personal computer; 6 – National Instruments SCB-68 connector block; 7 – connector for communication cable

Разработанное ПО обеспечивает

- сбор, обработку и анализ значений параметров диагностирования испытуемых объемных гидроприводов в режиме реального времени;
- расчет и вывод измерительной информации;
- сохранение всех результатов испытаний в базу данных;
- сохранение экспериментальных данных в файл с дискретностью не реже 10 записей в 1 секунду в формате, совместимом с Microsoft Office Excel;
- проведение внелабораторного анализа зарегистрированных данных процесса испытаний;

- сохранение графиков функций, отображающих историю измерения переменных процесса испытаний в файле графического формата (.jpg, .bmp или др.);
- масштабирование полученных в результате испытаний графиков функций;
- выбор определенного набора параметров диагностирования для визуализации на экране;
- тарировку датчиков гидравлического стенда;
- сохранение отчета об испытаниях в формате, совместимом с Microsoft Office Word;

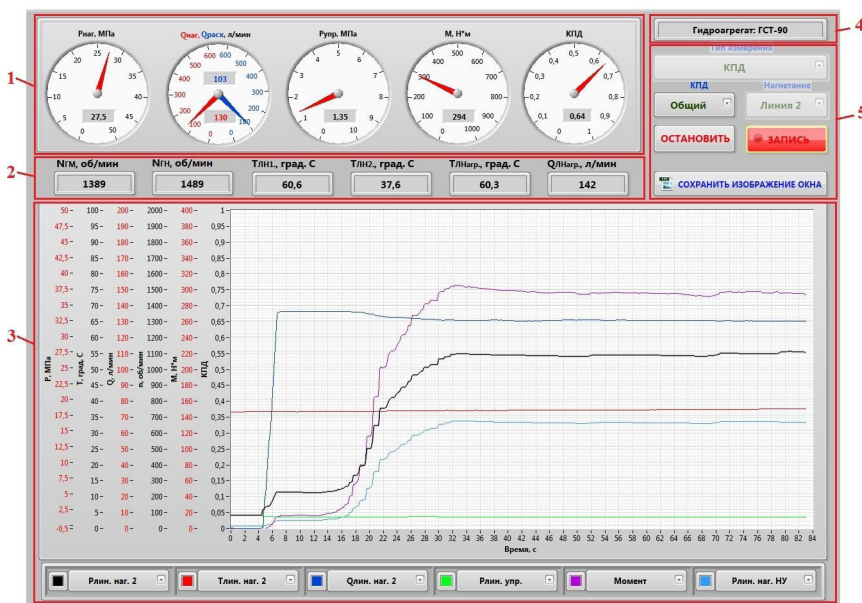
– хранение данных испытуемых гидроагрегатов с возможностью ввода паспортных значений.

Главное окно разработанного ПО представлено на рисунке 2. Окно позволяет управлять измерительным процессом, записывать результаты испытания объемных гидроприводов и обрабатывать их.

Блок 1 состоит из пяти стрелочных индикаторов и предназначен для отображения текущих значений параметров процесса испытания объемных гидроприводов. На индикаторах одновременно отображаются четыре измеряемые физические величины и две расчетные. Измеряемые величины: давление в линии нагнетания $P_{\text{НАГ}}$, МПа; объемная подача гидронасоса и расход гидромотора $Q_{\text{НАГ}}/Q_{\text{РАСХ}}$, л/мин; давление в линии управления $P_{\text{УПР}}$, МПа.

Расчетные величины: выходной крутящий момент M , Н·м; коэффициент полезного действия КПД, %. Также на стрелочном индикаторе возможно отображение одного из трех видов КПД, а именно: объемный КПД гидронасоса, объемный КПД гидромотора и общий КПД объемного гидропривода в целом.

Блок цифровых индикаторов 2 состоит из шести цифровых индикаторов и предназначен для отображения текущих значений параметров процесса испытания. На индикаторах одновременно отображаются следующие измеряемые величины: частота вращения гидромотора $N_{\text{ГМ}}$, об/мин; частота вращения гидронасоса $N_{\text{ГН}}$, об/мин; температура рабочей жидкости в линии нагнетания 1 объемного гидропривода $T_{\text{ЛН1}}$, °С; температура рабочей жидкости линии нагнетания 2 объемного гидропривода $T_{\text{ЛН2}}$, °С;



Р и с. 2. Главная лицевая панель специализированного программного обеспечения: 1 – блок стрелочных индикаторов; 2 – блок цифровых индикаторов; 3 – графический индикатор, отображающий временные диаграммы измерительных параметров диагностирования испытуемых гидроагрегатов; 4 – информационный блок; 5 – блок управляющих кнопок

Fig. 2. The main front panel of specialized software: 1 – block of pointer-type indicators; 2 – block of digital indicators; 3 – graphical indicator for displaying time charts of measuring parameters of diagnosing the tested hydraulic units; 4 – information block; 5 – control button block

температура рабочей жидкости в линиях нагружающего устройства $T_{\text{ЛНарг}}$, °С; расход в линии нагружающего устройства $Q_{\text{ЛНарг}}$, л/мин.

Графический индикатор 3 отображает временные диаграммы измерительных параметров, состоит из основного поля временных диаграмм, набора шкал для измеряемых физических величин и блока выбора отображаемых измеряемых величин и цветовой настройки отображаемых кривых. Набор шкал состоит из давления, температуры, подачи/расхода, частоты вращения, крутящего момента и КПД.

Информационный блок 4 предназначен для отображения информации о типе испытуемого гидроагрегата. Строка испытуемого гидроагрегата заполняется автоматически после выбора объекта испытания (диагностирования) в библиотеке программы.

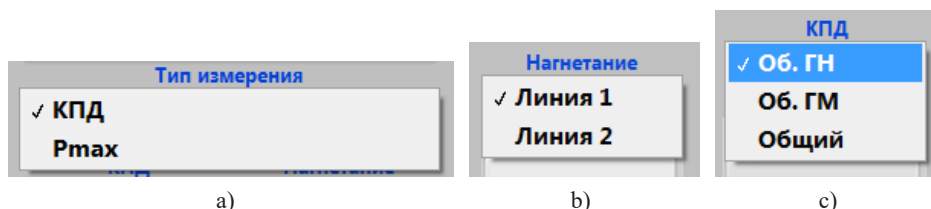
Блок управляющих кнопок 5 задает параметры испытания и отображения данных, управляет процессом испытания и сохраняет измерительную информацию. Кнопка сохранения изображения главного окна позволяет сохранить изображение главного окна в виде файла формата .png.

Основным блоком, позволяющим управлять ходом испытаний объемных гидроприводов, является блок управляющих кнопок, который содержит три раскрывающихся списка «Тип

измерения», «Нагнетание» и «КПД». Данные списки в раскрытом виде представлены на рисунке 3.

Список «Тип измерения» (рис. 3а) позволяет задавать необходимый режим испытания объемного гидропривода (режим определения КПД или максимального давления P_{max}). Список «Нагнетание» (рис. 3б) позволяет установить гидравлическую линию, которая будет являться нагнетающей. Выбор данного параметра не оказывает влияния на работу стенда, однако важен для обработки измерительной информации. Список «КПД» (рис. 3с) позволяет выбрать вид КПД отображаемого на стрелочном индикаторе «КПД» блока стрелочных индикаторов. Доступны три вида КПД: «Об. ГН» – объемный КПД гидронасоса; «Об. ГМ» – объемный КПД гидромотора; «Общий» – общий КПД гидропривода.

Для анализа измерительной информации и генерации отчета после проведения испытаний с объемными гидроприводами в разработанном специализированном программном обеспечении имеется модуль «Анализ». Данный модуль предназначен для обработки записанной во время испытания измерительной информации, а также для генерации отчета и экспорта изображений (зависимостей параметров диагностирования от времени).



Р и с. 3. Раскрывающиеся списки настроек для выбора режима диагностирования испытуемых объемных гидроприводов: а) тип измерения; б) линия нагнетания; в) КПД диагностируемого гидроагрегата

F i g. 3. Drop-down lists of settings for selecting the diagnostic mode of the tested volumetric hydraulic drives: а) measurement type; б) pressure line; в) efficiency of the diagnosed hydraulic unit

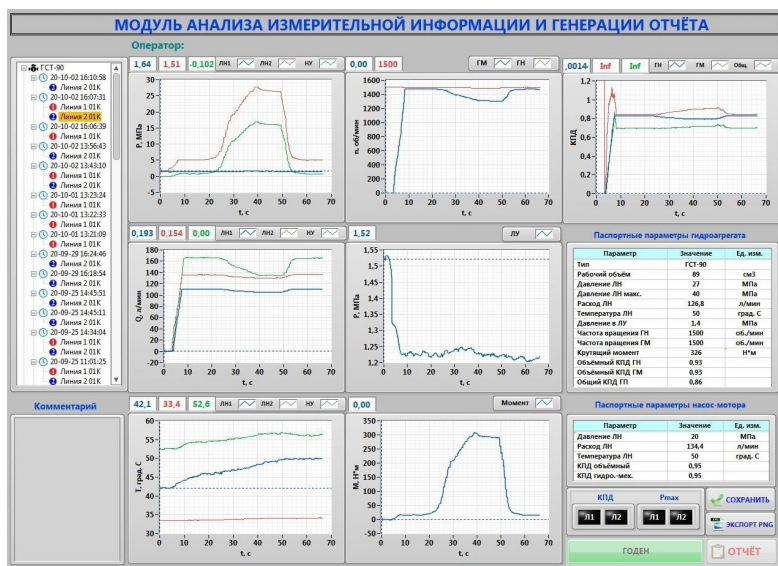
Лицевая панель модуля «Анализ» (рис. 4) состоит из следующих блоков:

- строка оператора, проводившего стендовые испытания объемного гидропривода;
- список измерений, отображающий все записанные измерения, находящиеся в хранилище измерительной информации;
- комментарий к испытанию (вводится оператором при необходимости);
- основная область осциллограмм предназначена для отображения записанной в процессе испытания измерительной информации с датчиков гидравлического стенда;
- блок параметров испытуемого объемного гидропривода, который отображает паспортные значения параметров диагностирования испытуемого объемного гидропривода в виде таблиц;
- блок управляющих кнопок и индикаторов содержит управляющие кнопки, предназначенные для сохранения измерительной информации и генерации

отчета испытания объемного гидропривода. Также в данный блок встроены вспомогательные индикаторы.

На разработанное специализированное программное обеспечение получен охранный документ Российской Федерации о защите результата интеллектуальной деятельности в виде свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614369.

Для подтверждения достоверности диагностирования объемных гидроприводов на гидравлическом стенде со специализированным программным обеспечением была реализована серия стендовых испытаний. В качестве объекта исследований использовали отечественный объемный гидропривод ГСТ-90 ООО «СалаватГидравлика», применяемый как привод ходовой части в конструкциях зерно- и кормоуборочных комбайнов в количестве девяти новых комплектов. Стендовые испытания проводились в соответствии с методическими рекомендациями завода-изготовителя



Р и с. 4. Лицевая панель модуля «Анализ» разработанного специализированного программного обеспечения

F i g. 4. The front panel of the module “Analysis” of the developed specialized software

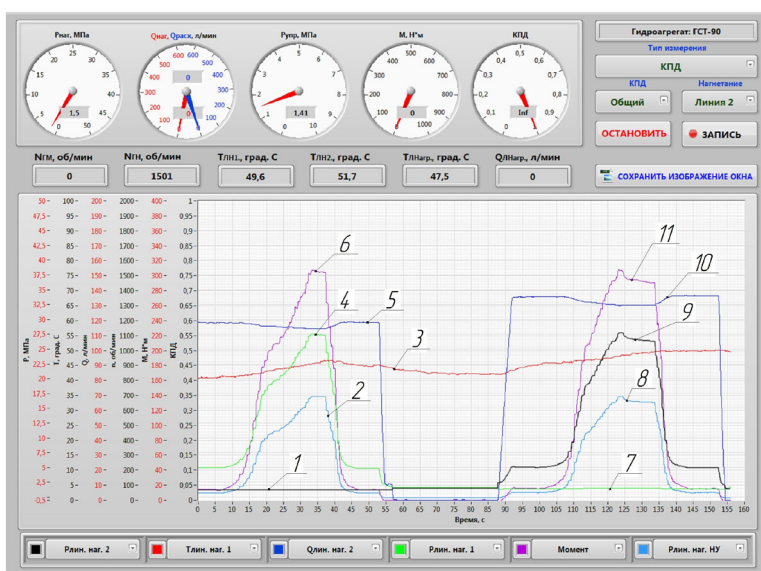
ООО «СалаватГидравлика» [4]. В качестве рабочей жидкости применялось гидравлическое масло МГЕ-46В (OILRIGHT), соответствующее требованиям ГОСТа 17479.3³.

На рисунке 5 представлено окно специализированного ПО, которое отображает процесс стендовых испытаний с новым объемным гидроприводом ГСТ-90 в режиме реального времени.

По результатам проведенных испытаний специализированным програм-

мным обеспечением формируется отчет о техническом состоянии испытуемого объемного гидропривода ГСТ-90. В таблице представлен файл отчета, содержащий фактические значения параметров диагностирования, полученные в режиме реального времени. Файл отчета базируется на усовершенствованной методике, основные положения которой были изложены ранее [1].

На основании полученных результатов делается заключение о пригодности



Р и с. 5. Окно специализированного программного обеспечения, показывающее процесс проведения стендовых испытаний с новым объемным гидроприводом ГСТ-90: 1 – давление в линии нагнетания 2; 2 – давление в линии гидравлического нагружающего устройства для линии нагнетания 1; 3 – температура рабочей жидкости в линиях испытуемого объемного гидропривода; 4 – рабочее давление в линии нагнетания 1; 5 – подача гидронасоса в линии нагнетания 1; 6 – развиваемый гидромотором крутящий момент для линии нагнетания 1; 7 – давление в линии нагнетания 2; 8 – давление в линии гидравлического нагружающего устройства для линии нагнетания 2; 9 – рабочее давление в линии нагнетания 2; 10 – подача гидронасоса в линии нагнетания 2; 11 – развиваемый гидромотором крутящий момент для линии нагнетания 2

Fig. 5. Window of specialized software showing the process of conducting bench tests with the new GST-90 volumetric hydraulic drive: 1 – pressure in the pressure line 2; 2 – pressure in the line of the hydraulic loading device for the pressure line 1; 3 – temperature of the working fluid in the lines of the tested volumetric hydraulic drive; 4 – working pressure in pressure line 1; 5 – hydraulic pump supply in pressure line 1; 6 – developed torque by the hydraulic motor for pressure line 1; 7 – pressure in the pressure line 2; 8 – pressure in the line of the hydraulic loading device for the pressure line 2; 9 – working pressure in pressure line 2; 10 – hydraulic pump supply in pressure line 2; 11 – developed torque by the hydraulic motor for pressure line 2

³ ГОСТ 17479.3-85. Масла гидравлические. Классификация и обозначение. М., 2006.

испытываемого объемного гидропривода к дальнейшей эксплуатации. Для этого используется специализированный индикатор, который находится внизу файла отчета (табл.). Если испытываемый объемный гидропривод работоспособен, то индикатор имеет зеленый цвет. Если испытываемый объемный гидропривод неработоспособен (падение величины объемного КПД более 20 %), то индикатор имеет красный цвет.

Из таблицы видно, что в ходе проведения испытаний на гидравлическом стенде с использованием разработанного ПО было сформировано заключение о работоспособности испытываемого ГСТ-90 и определены все параметры его диагностирования с погрешностью измерений, не превышающей 1 %. Полученные результаты (табл.) не противоречат требованиям завода-изготовителя и соответствуют ГОСТу⁴.

Т а б л и ц а

T a b l e

Отчет о результатах стендовых испытаний нового объемного гидропривода ГСТ-90
Report on the test results of the new GST-90 volumetric hydraulic drive

Параметр диагностирования / Parameter of the diagnostics	Паспортное значение / Passport value	Фактическое значение / Actual value	
		Линия нагнетания 1 / Pressure line 1	Линия нагнетания 2 / Pressure line 2
1	2	3	4
Измеряемый / Measured			
Частота вращения вала гидронасоса, об/мин / Rotational rate of the hydraulic pump shaft, rpm	1 500	1 502	1 501
Частота вращения вала гидромотора, об/мин / Rotational rate of the hydraulic motor shaft, rpm	1 450 ± 50	1 485	1 479
Давление в линии нагнетания, МПа / Pressure in pressure line, MPa	27,00	27,10	27,20
Подача гидронасоса, л/мин / Hydraulic pump supply, l/min	126,82	126,91	126,87
Расход через гидромотор, л/мин / Flow rate through the hydraulic motor, l/min	126,82	126,89	126,83
Давление в линии управления, МПа / Pressure in control line, MPa	1,40	1,41	1,41
Температура рабочей жидкости в линиях объемного гидропривода, °С / Temperature of the working fluid in the lines of volumetric hydraulic drive, °С	50 ± 5	49,6	51,7
Расчетный / Calculated			
Объемный КПД гидронасоса / Volumetric efficiency of the hydraulic pump	0,950	0,953	0,953

⁴ ГОСТ 17108-86.

<i>Окончание таблицы / End of table</i>			
1	2	3	4
Объемный КПД гидромотора / Volumetric efficiency of the hydraulic motor	0,950	0,951	0,950
Общий КПД объемного гидропривода / Common efficiency of the volumetric hydraulic drive	0,900	0,906	0,905
Развиваемый крутящий момент, Н·м / Developed torque, N·m	326,000	324,320	323,670

Заключение о работоспособности объемного гидропривода: ГОДЕН /
Statement on the operability of the volumetric hydraulic drive: USABLE

Обсуждение и заключение

Таким образом, разработанное специализированное программное обеспечение для гидравлического стенда позволяет в условиях ремонтных предприятий и сервисных центров с высокой точностью определять (контролировать) все параметры технического состояния отечественных и зарубежных объемных гидроприводов в соответствии с методическими рекоменда-

ми заводов-изготовителей и достоверно определять причину потери работоспособности.

Дальнейшее развитие гидравлического стенда со специализированным программным обеспечением видится в проведении экспериментальных исследований по прогнозированию остаточного ресурса испытуемых объемных гидроприводов по параметрам диагностирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пьянзов С. В. Совершенствование стенда и методики для контроля технического состояния объемных гидроприводов сельскохозяйственной техники : дис. ... канд. тех. наук. Саранск, 2021. 318 с.
2. Разработка стенда для оценки технического состояния объемных гидроприводов с гидравлическим нагружающим устройством / П. А. Ионов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 4. С. 529–545. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.529-545>
3. Rylyakin E. G., Semov I. N., Kukharev O. N. The Influence of the Oxidative Polymerization Processes on the Energy Consumption Due to Friction in the Resource Defining Hydraulic Couplings Hydraulic Drive Mate // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2019. Vol. 49, no 1. P. 1064–1069. URL: [https://www.rjpbcs.com/pdf/2019_10\(1\)%5B138%5D.pdf](https://www.rjpbcs.com/pdf/2019_10(1)%5B138%5D.pdf) (дата обращения: 10.07.2021).
4. Spectral Method for Monitoring the Technical Condition of Hydraulic Drives of Forest Harvester Machines [Электронный ресурс] / А. I. Pavlov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1515. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042086>
5. Experimental Hydraulic Device for the Testing of Hydraulic Pumps and Liquids / Z. Tkáč [et al.] // Tribology in Industry. 2018. Vol. 40, no. 1. P. 149–155. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.01.14>
6. Dynamic Modelling of the Swash Plate of a Hydraulic Axial Piston Pump for Condition Monitoring Applications / A. Bedotti [et al.] // Energy Procedia. 2018. Vol. 148. P. 266–273. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.077>
7. Numerical Simulation and Experimental Study on the Comparison of the Hydraulic Characteristics of an Axial-Flow Pump and a Full Tubular Pump / L. Shi [et al.] // Renewable Energy. 2020. Vol. 153. P. 1455–1464. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.082>

8. Battarra M., Mucchi E. On the Assessment of Lumped Parameter Models for Gearpump Performance Prediction // Simulation Modelling Practice and Theory. 2019. Vol. 99. P. 34–40. doi: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.102008>
9. Совершенствование мониторинга системы «человек–машина–среда» и правил эксплуатации для повышения эксплуатационной надежности тракторов / Н. А. Петрищев [и др.] // Технический сервис машин. 2020. № 3. С. 12–20. doi: <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2020-58-3-12-20>
10. Павлов А. И., Тарбеев А. А. Методика определения стратегии замены элементов гидропривода транспортно-технологических машин // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 4. С. 108–112. doi: <https://doi.org/10.17513/snt.36968>
11. Performance Investigation of Hydrostatic Transmission System as a Function of Pump Speed and Load Torque / S. K. Mandal [et al.] // Journal of the Institution of Engineers (India): Series C. 2012. no. 93. P. 187–193. doi: <https://doi.org/10.1007/s40032-012-0022-4>
12. Michelson S., Mueller M., Schurman B. Hydraulic Test Bench Circuit Construction, Testing and Analysis // The Journal of Undergraduate Research. 2012. Vol. 10. P. 116–127. URL: <http://openprairie.sdstate.edu/jur/vol10/iss1/9> (дата обращения: 10.07.2021).
13. Ding H., Zhao J. Performance Analysis of Variable Speed Hydraulic Systems with Large Power in Valve-Pump Parallel Variable Structure Control // Journal of Vibroengineering. 2014. Vol. 16, Issue 2. P. 1042–1062. URL: <https://jvejournal.com/article/14974> (дата обращения: 10.07.2021).
14. Rylyakin E. G. The Effect of Physico-Chemical Composition of Micro-Particles Contamination of Diesel Fuel on the Technical Condition of the Power Supply System of Diesel Engines // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2019. Vol. 10, no. 2. P. 334–337. URL: [https://www.rjpbcs.com/pdf/2019_10\(2\)/\[46\].pdf](https://www.rjpbcs.com/pdf/2019_10(2)/[46].pdf) (дата обращения: 10.07.2021).
15. Гидротестер : патент 123478 Российской Федерации, МПК F15B 19/00 / Суманов А. И. № 2012123886/28 ; заявл. 08.06.2012 ; опубл. 27.12.2012. 5 с. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=123478&TypeFile=html (дата обращения: 10.07.2021).
16. Опыт внедрения оборудования для диагностики, контроля качества изготовления и ремонта агрегатов гидропривода, трансмиссии энергонасыщенной техники / И. М. Макаркин [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2019. № 4–2. С. 135–144. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39217463> (дата обращения: 10.07.2021).
17. Elshorbagy K. A., Kandil H., Latif M. R. Development of a Multi-Functional Hydraulic Test Stand // Journal of Scientific and Engineering Research. 2018. Vol. 5, Issue 1. P. 123–132. URL: <http://jsaer.com/download/vol-5-iss-1-2018/JSAER2018-05-01-123-132.pdf> (дата обращения: 10.07.2021).
18. A Method for Functional Diagnosis of Hydraulic Drives of Forest Machinery / A. I. Pavlov [et al.] // International Journal of Environmental and Science Education. 2016. Vol. 11, no 18. P. 11331–11340. URL: <http://www.ijese.net/makale/1530.html> (дата обращения: 10.07.2021).
19. Rydberg K.-E. Hydraulic Fluid Properties and Their Impact on Energy Efficiency // The 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power (Sweden) (3–5 June 2013). Linköping : Linköping University Electronic Press, 2013. P. 447–453. doi: <https://doi.org/10.3384/ecp1392a44>
20. Оценка технического состояния круглых шестеренных гидронасосов навесных гидросистем тракторов / П. В. Чумаков [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30, № 3. С. 426–447. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.426-447>
21. Ding H., Liu Y., Zhao Ya. A New Hydraulic Synchronous Scheme in Open-Loop Control: Load-Sensing Synchronous Control // Measurement and Control. 2020. no. 53. P. 119–125. doi: <https://doi.org/10.1177/0020294019896000>
22. Skorek G. The Opportunities for Getting Energy Savings in the Hydrostatic Drive System // Journal of KONES. Powertrain and Transport. 2014. Vol. 21, no. 2. P. 273–280. URL: https://kones.eu/ep/2014/vol21/no2/Journal_of_KONES_2014_No_2_Vol_21_ISSN_1231-4005_SKOREK.pdf (дата обращения: 10.07.2021).
23. Method for Determining the Optimal Operating Time before Replacement of High-Pressure Hoses of Hydraulic Drives of Transport and Technological Machines [Электронный ресурс] / A. I. Pavlov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1515. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042065>

24. Устройство для оценки технического состояния объемных гидроприводов : патент 187833 Российская Федерация / Ионов П. А. [и др.]. № 2018137976 ; заявл. 29.10.2018 ; опубл. 19.03.2019. 9 с. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=187833&TypeFile=html (дата обращения: 10.07.2021).

25. Величко С. А., Мартынова Е. Г., Иванов В. И. Оценка предельного состояния тестоделительных машин вакуумно-поршневого типа по критерию расхода масла // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30, № 3. С. 448–463. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.448-463>

Поступила 21.07.2021; одобрена после рецензирования 26.08.2021; принята к публикации 30.09.2021

Об авторах:

Пьянзов Сергей Владимирович, лаборант кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5845-1635>, Researcher ID: B-1548-2019, serega.pyanzov@yandex.ru

Сенин Петр Васильевич, заведующий кафедрой технического сервиса машин Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, Researcher ID: H-1219-2016, senin53@mail.ru

Ионов Павел Александрович, доцент кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9794-0071>, Researcher ID: S-7146-2018, resurs-ime@yandex.ru

Столяров Алексей Владимирович, доцент кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5898-0150>, Researcher ID: G-8460-2016, cabto@mail.ru

Земсков Александр Михайлович, доцент кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1489-6077>, Researcher ID: S-7748-2018, zam503@mail.ru

Ильин Михаил Владимирович, доцент кафедры электроники и наноэлектроники Института электроники и светотехники Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9495-2672>, Researcher ID: P-2398-2016, imikev@mail.ru

Кравченко Игорь Николаевич, профессор кафедры технического сервиса машин и оборудования РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева (127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>, Researcher ID: B-9463-2018, kravchenko-in71@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

С. В. Пьянзов – подготовка текста с последующей доработкой, анализ литературных данных, программная реализация алгоритма программного обеспечения.

П. В. Сенин – научное руководство, разработка технического задания программы.

П. А. Ионов – анализ и доработка текста, разработка алгоритма программы.

А. В. Столяров – подготовка и анализ литературных данных, доработка текста, разработка спецификации программы.

А. М. Земсков – доработка текста, формализация задачи программы.

М. В. Ильин – написание исходного текста программы.

И. Н. Кравченко – проведение критического анализа исследований, анализ и доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Pyanzov S.V. [Improvement of the Bench and Methodology for Monitoring the Technical Condition of the Volume Hydraulic Drives of Agricultural Machinery]: Cand. Sci. dissertation. Saransk; 2021. 318 p. (In Russ.)
2. Ionov P.A., Senin P.V., Pyanzov S.V., et al. Developing a Stand for Evaluating Technical Condition of Volumetric Hydraulic Drives with a Hydraulic Loading Device. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems*. 2019; 29(4):529-545. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.529-545>
3. Ryl'yakin E.G., Semov I.N., Kukharev O.N. The Influence of the Oxidative Polymerization Processes on the Energy Consumption Due to Friction in the Resource Defining Hydraulic Couplings Hydraulic Drive Mate. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2019; 49(1):1064-1069. Available at: [https://www.rjpbcs.com/pdf/2019_10\(1\)/%5B138%5D.pdf](https://www.rjpbcs.com/pdf/2019_10(1)/%5B138%5D.pdf) (accessed 10.07.2021). (In Eng.)
4. Pavlov A.I., Tarbeev A.A., Egorov A.V., et al. Spectral Method for Monitoring the Technical Condition of Hydraulic Drives of Forest Harvester Machines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1515. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042086>
5. Tkáč Z., Kosiba J., Hujo L., et al. Experimental Hydraulic Device for the Testing of Hydraulic Pumps and Liquids. *Tribology in Industry*. 2018; 40(1):149-155. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.01.14>
6. Bedotti A., Pastori M., Scolari F., Casoli P. Dynamic Modelling of the Swash Plate of a Hydraulic Axial Piston Pump for Condition Monitoring Applications. *Energy Procedia*. 2018; 148:266-273. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.077>
7. Shi L., Zhang W., Jiao H., et al. Numerical Simulation and Experimental Study on the Comparison of the Hydraulic Characteristics of an Axial-Flow Pump and a Full Tubular Pump. *Renewable Energy*. 2020; 153:1455-1464. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.082>
8. Battarra M., Mucchi E. On the Assessment of Lumped Parameter Models for Gearpump Performance Prediction. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2019; 99:34-40. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.102008>
9. Petrishchev N.A., Kostomakhin M.N., Sayapin A.S., et al. Improving the Human-Machine-Environment Monitoring System and Operation Rules for Increasing Operational Tractor Reliability. *Tekhnicheskij servis mashin = Machinery Technical Service*. 2020; (3):12-20. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2020-58-3-12-20>
10. Pavlov A.I., Tarbeev A.A. The Method of Determining the Strategy of Replacing High Pressure Hoses, Hydraulic Transport and Technological Machines. *Sovremennyye naukoemkie tekhnologii = Modern High Technologies*. 2018; (4):108-112. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.17513/snt.36968>
11. Mandal S.K., Singh A.K., Verma Y., Dasgupta K. Performance Investigation of Hydrostatic Transmission System as a Function of Pump Speed and Load Torque. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*. 2012; (93):187-193. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/s40032-012-0022-4>
12. Michelson S., Mueller M., Schurman B. Hydraulic Test Bench Circuit Construction, Testing and Analysis. *The Journal of Undergraduate Research*. 2012; 10:116-127. Available at: <http://openprairie.sdstate.edu/jur/vol10/iss1/9> (accessed 10.07.2021). (In Eng.)
13. Ding H., Zhao J. Performance Analysis of Variable Speed Hydraulic Systems with Large Power in Valve-Pump Parallel Variable Structure Control. *Journal of Vibroengineering*. 2014; 16(2):1042-1062. Available at: <https://jvejournal.com/article/14974> (accessed 10.07.2021). (In Eng.)
14. Ryl'yakin E.G. The Effect of Physico-Chemical Composition of Micro-Particles Contamination of Diesel Fuel on the Technical Condition of the Power Supply System of Diesel Engines. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2019; 10(2):334-337. Available at: [https://www.rjpbcs.com/pdf/2019_10\(2\)/\[46\].pdf](https://www.rjpbcs.com/pdf/2019_10(2)/[46].pdf) (accessed 10.07.2021). (In Eng.)
15. Sumanov A.I. [Hydrotester]. Patent 123,478 Russian Federation. 2012 December 27. 5 p. Available at: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=123478&TypeFile=html (accessed 10.07.2021). (In Russ.)

16. Makarkin I.M., Dancov A.A., Filippova E.M., et al. The Experience of Introducing Equipment for Diagnosis, Quality Control of the Manufacture and Repair of Hydraulic Units, Power Transmission Equipment. *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* = Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology. 2019; (4-2):135-144. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39217463> (accessed 10.07.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
17. Elshorbagy K.A., Kandil H., Latif M.R. Development of a Multi-Functional Hydraulic Test Stand. *Journal of Scientific and Engineering Research*. 2018; 5(1):123-132. Available at: <http://jsaer.com/download/vol-5-iss-1-2018/JSAER2018-05-01-123-132.pdf> (accessed 10.07.2021). (In Eng.)
18. Pavlov A.I., Egorov A.V., Polyani I.A., Kozlov K.E. A Method for Functional Diagnosis of Hydraulic Drives of Forest Machinery. *International Journal of Environmental and Science Education*. 2016; 11(18):11331-11340. Available at: <http://www.ijese.net/makale/1530.html> (accessed 10.07.2021). (In Eng.)
19. Rydberg K.-E. Hydraulic Fluid Properties and Their Impact on Energy Efficiency. In: The 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power (Sweden) (3-5 June 2013). Linköping: Linköping University Electronic Press; 2013. p. 447-453. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3384/ecp1392a44>
20. Chumakov P.V., Martynov A.V., Kolomeychenko A.V., et al. Evaluation of Technical Condition of Round Gear Hydraulic Pumps of Tractor Mounted Hydraulic Systems. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(3):426-447. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.426-447>
21. Ding H., Liu Y., Zhao Ya. A New Hydraulic Synchronous Scheme in Open-Loop Control: Load-Sensing Synchronous Control. *Measurement and Control*. 2020; (53):119-125. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1177/0020294019896000>
22. Skorek G. The Opportunities for Getting Energy Savings in the Hydrostatic Drive System. *Journal of KONES. Powertrain and Transport*. 2014; 21(2):273-280. Available at: https://kones.eu/ep/2014/vol21/no2/Journal_of_KONES_2014_No_2_Vol_21_ISSN_1231-4005_SKOREK.pdf (accessed 10.07.2021). (In Eng.)
23. Pavlov A.I., Tarbeev A.A., Egorov A.V., et al. Method for Determining the Optimal Operating Time before Replacement of High-Pressure Hoses of Hydraulic Drives of Transport and Technological Machines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1515. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042065>
24. Ionov P.A., Senin P.V., Zemskov A.M., et al. [Development of Software for the Test Bench of the Technical Condition of Volumetric Hydraulic Drives]. Patent 187,833 Russian Federation. 2019 March 19. 9 p. Available at: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=187833&TypeFile=html (accessed 10.07.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
25. Velichko S.A., Martynova E.G., Ivanov V.I. The Assessment of the Limit State of the Vacuum Piston Type Dough Divider by Oil Consumption. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(3):448-463. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.448-463>

Submitted 21.07.2021; approved after reviewing 26.08.2021; accepted for publication 30.09.2021

About the authors:

Sergey V. Pyanzov, Lab Technician of the Technical Service Machines Chair of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5845-1635>, Researcher ID: B-1548-2019, serega.pyanzov@yandex.ru

Petr V. Senin, Head of the Technical Service Machines Chair of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, Researcher ID: H-1219-2016, senin53@mail.ru

Pavel A. Ionov, Associate Professor of the Technical Service Machines Chair of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St.,

Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9794-0071>, Researcher ID: S-7146-2018, resurs-ime@yandex.ru

Aleksey V. Stolyarov, Associate Professor of the Technical Service Machines Chair of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5898-0150>, Researcher ID: G-8460-2016, cabto@mail.ru

Alexander M. Zemskov, Associate Professor of the Technical Service Machines Chair of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1489-6077>, Researcher ID: S-7748-2018, zam503@mail.ru

Mikhail V. Ilyin, Associate Professor of the Chair of Electronics and Nanoelectronics of Institute of Electronics and Light Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9495-2672>, Researcher ID: P-2398-2016, imikev@mail.ru

Igor N. Kravchenko, Professor of the Chair of Technical Service Department of Machinery and Equipment, Russian Timiryazev State Agrarian University (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>, Researcher ID: B-9463-2018, kravchenko-in71@yandex.ru

Contribution of the authors:

S. V. Pyanzov – preparing the text with subsequent revision, analyzing literary data, software implementation of the software algorithm.

P. V. Senin – scientific guidance, developing the requirements list of the program.

P. A. Ionov – analyzing and revising the text, developing the program algorithm.

A. V. Stolyarov – preparing and analyzing literary data, finalizing the text, developing the program specification.

A. M. Zemskov – finalizing the text, formalizing the task of the program.

M. V. Ilyin – writing the source code of the program.

I. N. Kravchenko – conducting critical analysis of research, analysis and revision of text.

All authors have read and approved the final manuscript.



Особенности обработки валов роторов турбокомпрессоров дизелей инструментом с многослойным покрытием

В. А. Скрябин

*Пензенский государственный университет
(г. Пенза, Российская Федерация)*

vs_51@list.ru

Аннотация

Введение. В статье приведены результаты экспериментальных исследований силовых параметров при обработке твердых легированных сталей инструментами, на режущую часть которых нанесено многослойное твердое, теплостойкое и износостойкое покрытие. Полученные данные позволят решить вопросы оптимизации процесса работы с труднообрабатываемыми материалами.

Материалы и методы. В работе были поставлены задачи измерить силовые параметры процесса токарной обработки изделий и создать экспериментальные формулы силовых параметров для различных технологических режимов. Для этого был применен специальный измерительный многокомпонентный комплекс, позволяющий оценить влияние режимных параметров на изменение составляющих силы резания. *Результаты исследования.* Модернизацию станка с числовым программным управлением провели путем объединения его с трехкомпонентным динамометром и инструментом, на режущую часть которого было нанесено многослойное твердое, теплостойкое и износостойкое покрытие. Станок оснастили приборами, соединенными с персональным компьютером для измерений и обработки экспериментальных данных. По результатам исследований получены графические зависимости и эмпирические формулы, учитывающие влияние режимных параметров на составляющие силы резания при обработке деталей из легированных сталей с высокой твердостью, теплостойкостью и износостойкостью.

Обсуждение и заключение. Проведенные исследования позволили получить экспериментальные формулы составляющих силы резания для различных режимных параметров при обработке деталей инструментом, который оснащен режущими пластинами. На пластины нанесено многослойное твердое и износостойкое покрытие, состоящее из карбонитрида титана, оксида алюминия и нитрида никеля. Покрытие значительно повышает твердость, теплостойкость и износостойкость режущей части инструмента и обеспечивает качественную обработку.

Ключевые слова: точение, составляющие силы резания, режимные параметры, станок, модернизация

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Скрябин В. А. Особенности обработки валов роторов турбокомпрессоров дизелей инструментом с многослойным покрытием // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 4. С. 518–529. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.518-529>

© Скрябин В. А., 2021



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

Features of Machining Rotor Shafts of Diesel Engine Turbochargers with a Multilayer-Coated Tool

V. A. Skryabin

Penza State University (Penza, Russian Federation)

vs_51@list.ru

Abstract

Introduction. The paper presents the results of experimental studies of power parameters when hard alloy steels are machined with tools, the cutting units of which have multilayer hard, heat-resistant and wear-resistant coatings. The obtained data will make it possible to optimize machining hard-to-machine materials.

Materials and Methods. The aim of the study is to measure the power parameters of turning products and to create experimental formulas of power parameters for different technological modes. For this purpose, a special measuring multicomponent complex was used to estimate the influence of the mode parameters on the change in the cutting force components.

Results. The numerically controlled machine tool was retooled by combining it with a three-component dynamometer and tooling. The cutting unit of the tool was coated with a multi-layer hard, heat-resistant and wear-resistant coating. The tool was equipped with instruments connected to a personal computer for measuring and processing experimental data. According to the results of the study, there have been obtained graphical dependences and empirical formulas, which take into account the influence of the mode parameters on the cutting force components when machining the units of alloy steels of high hardness, heat resistance and wear resistance.

Discussion and Conclusion. The study allowed us to obtain experimental formulas of cutting force components for different mode parameters when machining parts by the tool equipped with cutting plates. The plates are coated with multilayer hard and wear-resistant coatings of titanium carbonitride, aluminum oxide and nickel nitride. The coating increases significantly the hardness, heat and wears resistance of the tool cutting unit and provides quality machining.

Keywords: turning, components of cutting forces, operating parameters, machine tool, modernization

The author declares no conflict of interest.

For citation: Skryabin V.A. Features of Machining Rotor Shafts of Diesel Engine Turbochargers with a Multilayer-Coated Tool. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(4):518-529. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.518-529>

Введение

Силовые характеристики валов ротора высокооборотных дизелей, выпускаемых по лицензии, приобретенной в Финляндии, во многом определяют оптимальные условия процесса точения. К силовым параметрам процесса точения относят тангенциальную, осевую и радиальную составляющие силы резания.

Термообработанная легированная сталь марки 42ХН2МФА является мате-

риалом для валов, работающих при температуре до 400–500 °С. Высокая твердость (270 НВ) и низкая пластичность ($\delta = 7-8 \%$) стали этой марки вызывает существенный износ режущих твердосплавных пластин при точении. Округление режущих кромок инструментальной пластины перед нанесением многослойного покрытия способствует более прочному сцеплению с основой и окончательно формирует режущую

кромку (микрogeометрию). В данной ситуации справочные формулы составляющих силы резания могут применяться с большим числом условностей. Для точного определения необходимы дополнительные эксперименты.

Целью исследования является определение силовых параметров при обработке твердых легированных сталей инструментами, на режущую часть которых нанесено многослойное твердое, износостойкое и теплостойкое покрытие.

Для реализации цели исследования необходимо решить следующие задачи:

- измерить тангенциальную, осевую и радиальную составляющие силы резания при изменяющихся режимах токарной обработки;
- установить влияние режимных параметров на силовые параметры;
- создать экспериментальные формулы силовых параметров.

Обзор литературы

Необходимо отметить, что отечественные и зарубежные исследователи внесли значительный вклад в исследование составляющих силы резания при обработке деталей из легированных сталей, модернизацию и проектирование установок и динамометров различных конструкций.

Б. Б. Пономарев и Ш. Х. Нгуен описали особенности работы и результаты сравнения различных конструкций динамометров для измерения составляющих силы резания только при чистовом фрезеровании поверхностей деталей, не захватывая токарную обработку, а также обосновали выбор модели прибора. В качестве материала деталей, подвергаемых обработке, использовались только низкоуглеродистые и низколегированные стали малой и средней

твердости, а также алюминиевые сплавы. В научных работах не приведены результаты сравнения силовых параметров с эмпирическими зависимостями, имеющимися в технологических справочниках. Вопрос измерения составляющих параметров силы резания твердых легированных сталей инструментами не рассмотрен. Решение вышеуказанных задач в пределах общей проблемы повысило бы научную ценность исследований [1; 2].

Другие ученые описали структуру и технические характеристики многокомпонентного датчика для измерения силовых параметров при точении и фрезеровании. Однако авторы не уделили внимания экспериментальным данным по определению параметров силы резания и их зависимости от технологических режимов, размерных характеристик и материала обрабатываемых деталей и режущей части инструментов. Данный факт делает работы в определенной степени незаконченными [3; 4].

В. Б. Самойлов приводит характеристики разработанного однокомпонентного динамометра для измерения только тангенциальной составляющей силы резания при точении и строит графическую зависимость силового параметра от режимных. Этого недостаточно для всестороннего анализа корреляции силовых параметров и режимов резания [5]. При этом сравнение силовых параметров, полученных в процессе измерения, проводилось с расчетными эмпирическими зависимостями, взятыми из известных таблиц справочников технолога-машиностроителя¹.

В ряде работ представлены только описания и принцип работы измерительных комплексов при фрезеровании [6–8].

¹ Справочник технолога-машиностроителя : в 2-х т. Т. 1 / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1986. 656 с. ; Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. Т. 1 / Под ред. А. С. Васильева, А. А. Кутина. 6-е изд., перераб. и доп. М. : Инновационное машиностроение, 2018. 755 с. ; Справочник технолога-машиностроителя : в 2-х т. Т. 1 / Под ред. А. М. Дальского [и др.]. 5-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 2003. 912 с.

Результаты экспериментов по определению силовых параметров отсутствуют, данные о материале обрабатываемых деталей и режущей части инструментов не приводятся [9–11].

В статьях зарубежных авторов опубликованы неполные экспериментальные результаты, которые не позволяют рассматривать эти работы как законченные научные исследования [12; 13].

В результате проведенного обзора наиболее актуальных работ по затронутой проблеме следует отметить, что в некоторых статьях составляющие силы резания определялись по известным эмпирическим зависимостям, имеющимся в технологических справочниках, без учета особенностей процесса резания деталей из легированных сталей с высокой твердостью, теплостойкостью и износостойкостью. В связи с этим ОАО «Пензадизельмаш» (г. Пенза) и кафедра технологий и оборудования машиностроения Пензенского государственного университета провели совместные экспериментальные исследования по обработке вышеуказанных материалов. В результате были получены эмпирические формулы составляющих силы резания при токарной обработке и исследовано влияние на них изменения параметров процесса резания.

Материалы и методы

Точение валов роторов дизелей с диаметром детали 140 мм и длиной 690 мм проводилось на токарном обрабатывающем центре высокой жесткости и точности модели Nakamura Super NTX с системой числового программного управления (ЧПУ) Fanuc 310i. Система оснащена многокомпонентным динамометром Kistler (Швейцария) со специальными датчиками для измерения силовых параметров процесса резания при различных технологических режимах.

В качестве режущего инструмента использовался токарный правый

упорно-подрезной резец с ромбической пластиной из твердого сплава марки ВК-6М, на режущую часть которой наносилось трехслойное твердое, износостойкое и теплостойкое покрытие, состоящее из карбонитрида титана, оксида алюминия и нитрида никеля.

При обработке валов роторов применялись смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС) марки «Укринаол-1М» (3 %). СОТС подавались путем распыления в виде тумана в зону обработки детали.

Экспериментальные исследования по обработке деталей осуществлялись при помощи трехкомпонентного измерительного комплекса, закрепленного на суппорте станка с ЧПУ, усилителя сигналов и ноутбука со специальным программным обеспечением, позволяющим оцифровывать результаты для численного определения составляющих силы резания и создавать математическую модель для многофакторного планирования экспериментов.

Создание графических зависимостей составляющих силы резания для режимных параметров и эмпирических зависимостей силовых параметров реализовывалось на ноутбуке с применением программного пакета Mathcad 15 для автоматизации процесса многофакторного планирования экспериментов [7–10].

Результаты исследования

Эксперименты проводились при обработке заготовок валов ротора из легированной стали марки 42ХН2МФА с временным сопротивлением на растяжение $\sigma_{\text{в}} = 2\ 080$ МПа.

Детали подвергались термообработке-закалке в масле длительностью 180 мин после предварительного нагрева до температуры 850 °С и высокому отпуску при температуре 600 °С в течение 240 мин до твердости 38 HRC. Точение производилось при максимальном диаметре детали 140 мм и длине 90 мм токарным упорно-подрезным

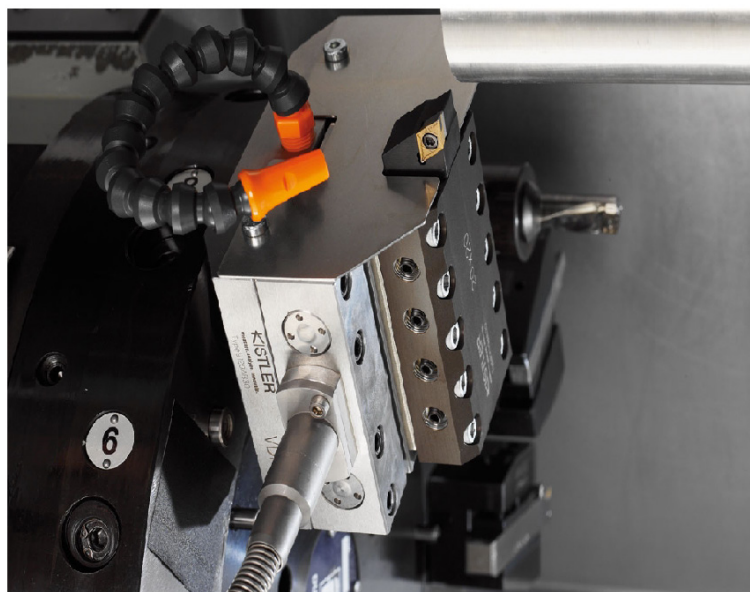
резцом, оснащенным ромбической пластиной Korloy с углом при вершине 80° и толщиной 4,76 мм. Маркировка пластины BK-6M, а по стандарту ISO CNMG160416E-4ERM-CT15M (TiCN-Al₂O₃-NiN). Трехслойное покрытие TiCN-Al₂O₃-NiN наносилось на режущую пластину инструмента с использованием методов физического осаждения покрытий (PVD), основанных на физическом испарении, или распылением вещества в вакуумное пространство газовой камеры. Такое покрытие по данным производственных исследований значительно повышает твердость, теплостойкость и износостойкость режущей части инструмента. Державка, которая вставлялась в гнездо многокомпонентного динамометра, обозначалась как PCCNR3232M16. Конструкция державки обеспечивает наклон пластины с образованием следующих углов: $\gamma = 5^\circ$, $\alpha = 6^\circ$, $\varphi = 95^\circ$.

Составляющие силы резания определялись динамометром Kistler с пьезоэлектрическими датчиками, кото-

рый монтировался на суппорте станка (рис. 1).

Усилитель сигналов, поступающих от динамометра и ноутбука с программным обеспечением для оцифровки усиленных и преобразованных сигналов, приведен на рисунке 2.

Пьезопластины деформируются и создают напряжение при действии нагрузки на контактный элемент. Напряжение поступает на усилитель сигналов, находящийся в верхнем отсеке. Усиленный преобразованный сигнал передается на ноутбук и там оцифровывается (рис. 2) [1; 2; 14; 15]. Специальная программа DynoWare, анализируя поступающий сигнал, обеспечивает постоянную визуализацию регистрируемых данных, а также содержит все необходимые математические и графические функции для обработки измерений. При этом процесс измерения документируется, а данные о конфигурации и измерениях сохраняются [1; 2].



Р и с. 1. Схема установки многокомпонентного динамометра на суппорте станка
F i g. 1. Installation scheme of the multicomponent dynamometer on the turning slide



Р и с. 2. Фотография аппаратуры для усиления и оцифровки сигналов: ноутбук; усилитель сигналов

F i g. 2. Photo of equipment for amplifying and digitizing signals: laptop computer; signal amplifier

В процессе проведения исследовательских работ, чтобы учитывать черновую и чистовую обработку детали, режимные параметры изменялись следующим образом: скорость резания v варьировалась в интервале 100–200 м/мин при шаге 50 (подача $s = 0,3$ мм/об, глубина резания $t = 3$ мм); подача s изменялась от 0,1 до 0,3 мм/об с интервалом 0,2 мм/об при скорости резания $v = 150$ м/мин и глубине $t = 1$ мм; глубина резания варьировалась в диапазоне $t = 1–3$ мм с шагом 2 мм при скорости $v = 150$ м/мин и подаче $s = 0,1$ мм/об. При этом обеспечивались шероховатость обработанной поверхности при черновом точении $Ra = 12,5$ мкм и экономически целесообразный квалитет точности $IT = 12–14$, а при чистовом точении $Ra = 3,2$ мкм и $IT = 7–9$.

Составляющие силы резания соответствовали усредненному значению. При статистическом анализе экспериментальных данных определялись доверительные интервалы (табл.).

В каждой точке проводилось по пять измерений ($n = 5$). Среднее значение силовых составляющих из пяти измерений определялось по следующей зависимости:

$$P_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n},$$

где P_i – i -е значение силовой составляющей процесса резания.

Доверительный интервал Δ с вероятностью 95 % определяется следующим образом:

$$\Delta = \pm 1,96 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}},$$

где $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - P_{cp})^2}{n - 1}}$ – среднеквадратическое отклонение.

Значения экспериментальных данных заносятся в соответствующую

таблицу для построения графиков составляющих силы резания в зависимости от режимных параметров (табл.).

Графики взаимосвязи режимных параметров и вышеуказанных составляющих после обработки экспериментальных данных были построены в программном пакете Mathcad 15 на основании полученных при измерении средних значений составляющих силы резания по осям x , y и z (рис. 3) [16–19]. Как показали экспериментальные исследования, применение программы Mathcad 15 обусловлено тем, что в процессе обработки крупногабаритных деталей из твердых легированных сталей возникают достаточно большие вибрации технологической системы, которые дают определенные погрешности при построении графических зависимостей с помощью программного продукта DynoWare² [20; 21].

Анализ графических зависимостей на рисунке 3 показал, что составляющие результирующей силы при резании уменьшаются с возрастанием скорости v (рис. 3а) и повышаются с возрастанием глубины резания t (рис. 3б) и подачи инструмента s (рис. 3с).

Глубина резания в этом случае оказывает доминирующее воздействие, в сопоставлении с подачей, на возрастание составляющих силы резания, что не противоречит известным положениям теории резания.

Составляющая силы резания может быть описана следующей эмпирической зависимостью:

$$P(v, s, t) = C_p \cdot v^{z_p} \cdot s^{y_p} \cdot t^{x_p},$$

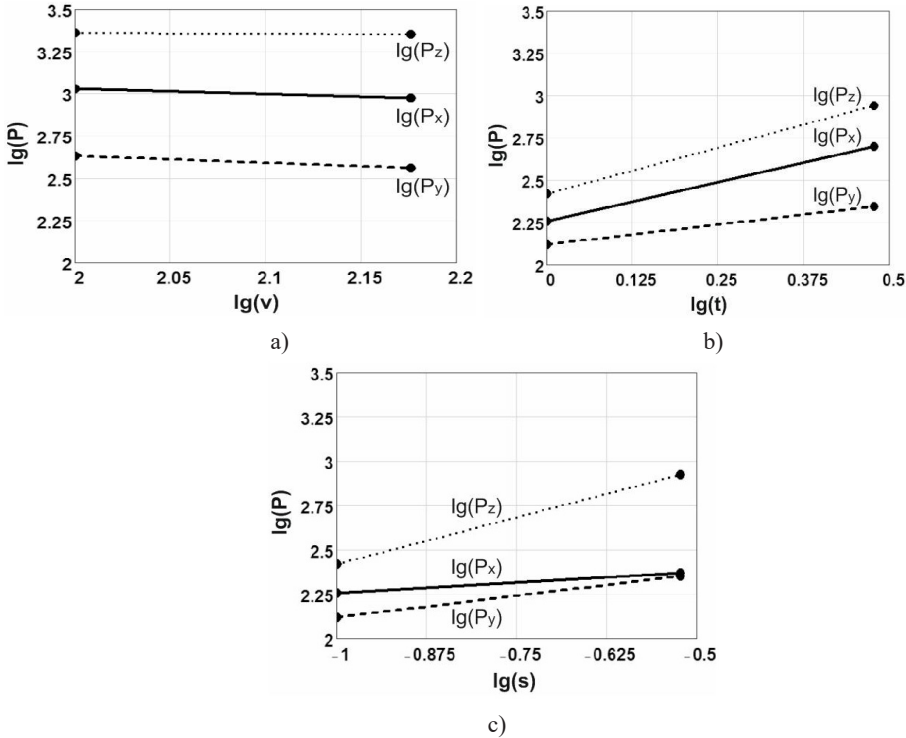
где C_p – коэффициент; z_p – тангенс угла наклона кривой логарифмической функции $P(v)$; y_p – тангенс угла наклона

Т а б л и ц а
T a b l e

Силовые параметры и технологические режимы
Power parameters and technological modes

Параметры режима резания / The parameters of cutting mode			Средние значения силовых параметров, Н / The average values of the power parameters, N		
Скорость резания v , м/мин / Cutting speed v , m/min	Подача s , мм/об / Feed s , mm/r	Глубина резания t , мм / Cutting depth t , mm	$P_{x_{cp}} \pm \Delta$	$P_{y_{cp}} \pm \Delta$	$P_{z_{cp}} \pm \Delta$
100	0,3	3	1 043 ± 2	431 ± 21	2 100 ± 23
150			915 ± 1	347 ± 3	21 465 ± 22
150	0,1	1	179 ± 5	128 ± 2	2 573 ± 6
	0,3		216 ± 2	228 ± 2	824 ± 20
150	0,1	1	190 ± 4	132 ± 3	263 ± 8
		3	500 ± 6	234 ± 8	869 ± 52

² Ultraprecision Cutting of Molybdenum by Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting / T. Moriwaki [et al.] // Proceedings of 19th Annual Meeting, American Society for Precision Engineering (ASPE, 2004). Orlando, 2004. P. 621–624. URL: <https://www.tib.eu/en/search/id/BLCP%3ACN055387370/Ultraprecision-Cutting-of-Molybdenum-by-Ultrasonic> (дата обращения: 15.03.2021).



Р и с. 3. Воздействие режимов v, t, s на силовые параметры при токарной обработке
 Fig. 3. The effect of the v, t, s modes on the power parameters during turning

кривой логарифмической функции $P(s)$; x_p – тангенс угла наклона кривой логарифмической функции $P(t)$.

Проведенные исследования позволили получить следующие математические зависимости для силовых параметров точения:

– горизонтальная составляющая

$$P(v, s, t) = 1\,848 \cdot v^{-0,30} \cdot s^{0,21} \cdot t^{0,82};$$

– радиальная составляющая

$$P(v, s, t) = 2\,845 \cdot v^{-0,39} \cdot s^{0,51} \cdot t^{0,45};$$

– тангенциальная составляющая

$$P(v, s, t) = 3\,109 \cdot v^{-0,04} \cdot s^{1,03} \cdot t^{1,08}.$$

Обсуждение и заключение

С целью измерения вышеуказанных силовых параметров в процессе чернового и полустогового точения термообработанных легированных сталей с высокой теплостойкостью, твердостью и низкой пластичностью были проведены исследования с применением трехкоординатной измерительной системы.

В результате удалось получить экспериментальные формулы сил резания для режимных параметров процесса обработки деталей инструментом, оснащенным режущими пластинами с нанесенным на них многослойным твердым и износостойким покрытием. Покрытие состоит из карбонитрида титана, оксида алюминия и нитрида никеля CNMG160416E-4ERM-CT15M (TiCN-Al₂O₃-NiN).

Примененное покрытие значительно повышает твердость, теплостойкость и износостойкость режущей части инструмента и позволяет повысить качество обработки. В частности, шероховатость обработанной поверхности при черновом точении соответствовала $Ra = 12,5$ мкм, а экономически целесообразный квалитет точности $IT = 12-14$. При чистовом точении $Ra = 3,2$ мкм и $IT = 7-9$. Поверхностная твердость повышается до ~ 3000 HV (микротвердость от 30–33 ГПа) согласно результатам

измерений твердости твердосплавной пластины режущей части инструмента без покрытия и с нанесенным трехслойным покрытием. Износостойкость ориентировочно повышается в 2–3 раза при сравнении времени работы пластины без покрытия и с нанесенным покрытием.

Представленные результаты могут служить основой для определения силовых и технологических параметров при оптимизации процесса обработки деталей из различных труднообрабатываемых материалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пономарев Б. Б., Нгуен Ш. Х. Моделирование и анализ влияния условий обработки на силы резания при концевом фрезеровании // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. Т. 59, № 3. С. 8–16. URL: <https://clck.ru/YBQzR> (дата обращения: 15.03.2021).

2. Пономарев Б. Б., Нгуен Ш. Х. Выбор динамометра для измерения силы резания при концевом фрезеровании // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 5. С. 15–24. doi: https://doi.org/10.30987/article_5cda64cc611ed4.66880449

3. Утенков В. М., Быков П. А. Возможности использования динамометра Kistler для испытания металлорежущих станков [Электронный ресурс] // Инженерный вестник. 2012. № 10. URL: <http://ainjournal.ru/doc/492011.html> (дата обращения: 15.03.2021).

4. Исследование динамических процессов с использованием анализа форм частотных декомпозиций сигнала на основе метода Прони / С. С. Гаврюшин [и др.] // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2017. № 6. С. 126–136. doi: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2017-6-126-136>

5. Разработка динамометрической системы для измерения силы резания при точении / В. Ф. Безязычный [и др.] // Известия МГТУ «МАМИ». 2014. Т. 2, № 1. С. 171–176. URL: <https://journals.eco-vector.com/2074-0530/article/view/67842> (дата обращения: 15.03.2021).

6. Самойлов В. Б. Модернизация системы для измерения сил резания на базе динамометров серии УДМ // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2019. № 5. С. 91–103. doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2019-5-91-103>

7. Виноградов Д. В., Древаль А. Е., Васильев С. Г. Комплекс для оценки износостойкости материалов и сил резания при точении // Инженерный вестник. 2014. № 9. С. 33–42.

8. Малькова Л. Д. Оценка энергопотребления при механической обработке плоскостей различными способами фрезерования [Электронный ресурс] // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. № 12. doi: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2016-12-1559>

9. Шуляк Я. И., Васильев С. Г. Модернизация установки измерения сил резания на базе динамометра УДМ-600 [Электронный ресурс] // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2016. № 1. URL: <https://elpub.ru/elpub-article/maplants/33> (дата обращения: 15.03.2021).

10. Павлов И. О., Ушаков М. В., Воробьев И. А. Система для измерения сил резания. Компоновка, тарирование и оценка погрешности // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. № 10. С. 159–168. URL: <https://clck.ru/YBT95> (дата обращения: 15.03.2021).

11. Скрыбин В. А. Особенности расчета кинематических параметров и величины шероховатости при абразивной доводке запорных поверхностей корпусов задвижек, соединяющих трубы // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 4. С. 546–559. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.546-559>

12. Adamson G., Wang L., Moore P. Feature-Based Function Block Control Framework for Manufacturing Equipment in Cloud Environments // International Journal of Production Research. 2019. Vol. 57, Issue 12. P. 3954–3974. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1542178>
13. Ultraprecision Micromachining of Hardened Steel by Applying Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting / N. Suzuki [et al.] // MHS2003. Proceedings of 2003 International Symposium on Micromechanics and Human Science (19–22 Oct. 2003). Nagoya : IEEE, 2003. P. 125–135. doi: <https://doi.org/10.1109/MHS.2003.1249936>
14. Altintas Y., Lee P. Mechanics and Dynamics of Ball End Milling // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 1998. Vol. 120, Issue 4. P. 684–692. doi: <https://doi.org/10.1115/1.2830207>
15. Ozturk E., Budak E. Modeling of 5-axis Milling Processes // Machining Science and Technology. 2007. Vol. 11, Issue 3. P. 287–311. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10910340701554808> (дата обращения: 15.03.2021).
16. Petrushin S. I., Proskokov A. V. Theory of Constrained Cutting: Chip Formation with a Developed Plastic-Deformation Zone // Russian Engineering Research. 2010. Vol. 30. P. 45–50. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X10010119>
17. Грубый С. В. Расчетные параметры стружкообразования при несвободном косоугольном резании пластичных материалов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 1. С. 4–15. doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2017-1-4-15>
18. Pereverzev P. P., Akintseva A. V., Alsigar M. K. Use of Dynamic Programming Method to Design for Optimal Performance of Grinding Cycles // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering ; A. Radionov, O. Kravchenko, V. Guzeev, Y. Rozhdestvenskiy (eds). Cham : Springer, 2018. P. 1709–1714. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_183
19. Shamoto E., Suzuki N., Hino R. Analysis of 3D Elliptical Vibration Cutting with Thin Shear Plane Model // CIRP Annals. 2008. Vol. 57, Issue 1. P. 57–60. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.073>
20. Ultraprecision Micromachining of Hardened Steel by Applying Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting / N. Suzuki [et al.] // MHS2003. Proceedings of 2003 International Symposium on Micromechanics and Human Science (19–22 Oct. 2003). Nagoya : IEEE, 2003. P. 125–135. doi: <https://doi.org/10.1109/MHS.2003.1249936>
21. Machinability Study of First Generation Duplex (2205), Second Generation Duplex (2507) and Austenite Stainless Steel during Drilling Process / J. Nomani [et al.] // Wear. 2013. Vol. 304, Issue 1–2. P. 20–28. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.04.008>

Поступила 17.03.2021; одобрена после рецензирования 20.05.2021; принята к публикации 03.06.2021

Об авторе:

Скрябин Владимир Александрович, профессор кафедры технологий и оборудования машиностроения Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-9198>, Researcher ID: R-2385-2018, vs_51@list.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Ponomaryov B.B., Nguyen S.H. Modeling and Analysis of Influence of Process Conditions on Cutting Forces during End Milling. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* = Modern Technologies. System Analysis. Modeling. 2018; 59(3):8-16. Available at: <https://clck.ru/YBQzR> (accessed 15.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

2. Ponomarev B.B., Nguen S.H. Dynamometer Choice for Cutting Force Measurement at End Milling. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of Bryansk State Technical University. 2019. (5):15-24. (In Russ., abstract in Eng.) doi: https://doi.org/10.30987/article_5cda64cc611ed4.66880449
3. Utenkov V.M., Bykov P.A. [Kistler Dynamometer Capabilities for Testing Machine Tools]. *Inzhenernyy vestnik* = Engineering Bulletin. 2012; (10). Available at: <http://ainjournal.ru/doc/492011.html> (accessed 15.03.2021). (In Russ.)
4. Gavryushin S.S., Dosko S.I., Utenkov V.M., Chervova A.A. Investigation of Dynamic Processes Using Analysis Forms of Frequency Decomposition of the Signal Based on the Prony's Method. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana* = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. 2017; (6):126-136. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2017-6-126-136>
5. Bezyazychnyy V.F., Kordyukov A.V., Timofeev M.V., Fomenko R.N. Development of Dynamometer System for Measuring Cutting Forces When Turning. *Izvestiya MGTU "MAMI"* = News of Moscow State Technical University MAMI. 2014; 2(1):171-176. Available at: <https://journals.eco-vector.com/2074-0530/article/view/67842> (accessed 15.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
6. Samoylov V.B. Modernization of the System for Measuring Cutting Forces on the Basis of UDM Dynamometer Series. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana* = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. 2019; (5):91-103. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2019-5-91-103>
7. Vinogradov D.V., Dreval A. Ye., Vasilev S.G. [Complex for Assessing the Wear Resistance of Materials and Cutting Forces during Turning]. *Inzhenernyy vestnik* = Engineering Bulletin. 2014; (9):33-42. (In Russ.)
8. Malkova L.D. Estimating Power Consumption for Flat Surface Machining Employing Various Milling Techniques. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* = Engineering Journal: Science and Innovation. 2016; (12). (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2016-12-1559>
9. Shuliak Ya.I., Vasilev V.G. A Modernized UDM-600 Dynamometer-Based Setup for the Cutting Force Measurement. *Mashiny i ustanovki: proektirovanie, razrabotka i ekspluatatsiya* = Machines and Plants: Design and Exploiting. 2016; (1). Available at: <https://elpub.ru/elpub-article/maplants/33> (accessed 15.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
10. Pavlov I.O., Ushakov M.V., Vorobyov I.A. System for Measurement of Cutting Forces Line-Up, Taring and Evaluation of the Accuracy. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* = Proceedings of Tula State University. Technical Sciences. 2013; (10):159-168. Available at: <https://clck.ru/YBT95> (accessed 15.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
11. Skryabin V.A. Features of Calculating Kinematic and Roughness Parameters at Abrasive Finishing of Shut-Off Surfaces of Gate Valve Bodies Connecting Pipes. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(4):546-559. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.546-559>
12. Adamson G., Wang L., Moore P. Feature-Based Function Block Control Framework for Manufacturing Equipment in Cloud Environments. *International Journal of Production Research*. 2019; 57(12):3954-3974. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1542178>
13. Suzuki N., Nakamura A., Shamoto E., et al. Ultraprecision Micromachining of Hardened Steel by Applying Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting. In: MHS2003. Proceedings of 2003 International Symposium on Micromechatronics and Human Science (19-22 Oct. 2003). Nagoya: IEEE; 2003. p. 125-135. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/MHS.2003.1249936>
14. Altintas Y., Lee P. Mechanics and Dynamics of Ball End Milling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 1998; 120(4):684-692. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1115/1.2830207>
15. Ozturk E., Budak E. Modeling of 5-axis Milling Processes. *Machining Science and Technology*. 2007; 11(3):287-311. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10910340701554808> (accessed 15.03.2021). (In Eng.)
16. Petrushin S.I., Proskokov A.V. Theory of Constrained Cutting: Chip Formation with a Developed Plastic-Deformation Zone. *Russian Engineering Research*. 2010; 30:45-50. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X10010119>

17. Grubiyi S.V. Calculated Parameters of Chip Formation for Restricted Oblique Cutting of Plastic Materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* = BMSTU Journal of Mechanical Engineering. 2017; (1):4-15. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2017-1-4-15>
18. Pereverzev P.P., Akintseva A.V., Alsigar M.K. Use of Dynamic Programming Method to Design for Optimal Performance of Grinding Cycles. In: A. Radionov, O. Kravchenko, V. Guzeev, Y. Rozhdestvenskiy (eds). Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer; 2018. p. 1709-1714. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_183
19. Shamoto E., Suzuki N., Hino R. Analysis of 3D Elliptical Vibration Cutting with Thin Shear Plane Model. *CIRP Annals*. 2008; 57(1):57-60. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.073>
20. Suzuki N., Nakamura A., Shamoto E., et al. Ultraprecision Micromachining of Hardened Steel by Applying Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting. In: MHS2003. Proceedings of 2003 International Symposium on Micromechatronics and Human Science (19-22 Oct. 2003). Nagoya: IEEE; 2003. p. 125-135. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/MHS.2003.1249936>
21. Nomani J., Pramanik A., Hilditch T., Littlefair G. Machinability Study of First Generation Duplex (2205), Second Generation Duplex (2507) and Austenite Stainless Steel during Drilling Process. *Wear*. 2013; 304(1-2):20-28. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.04.008>

Submitted 17.03.2021; approved after reviewing 20.05.2021; accepted for publication 03.06.2021

About the author:

Vladimir A. Skryabin, Professor of the Chair of Technology and Equipment in Mechanical Engineering, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-9198>, Researcher ID: R-2385-2018, vs_51@list.ru

The author has read and approved the final manuscript.

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ / TECHNOLOGIES AND MEANS OF MAINTENANCE IN AGRICULTURE

УДК 631.3:004

doi: 10.15507/2658-4123.031.202104.530-543

Научная статья



Цифровой двойник процессов восстановления сельскохозяйственной техники

Ю. Г. Следков, Л. Л. Хорошко, П. М. Кузнецов*,
А. О. Бутко

Московский авиационный институт (г. Москва,
Российская Федерация)

* profpol@rambler.ru

Аннотация

Введение. Эффективность сельскохозяйственной деятельности обусловлена прежде всего степенью механизации труда, которая обеспечивается наличием необходимого объема сельскохозяйственной техники. Абразив в виде песка, грязь, работа под открытым небом резко ускоряют износ механизмов. Нерационально составленный план работ, отсутствие полной информации о состоянии конкретных единиц техники увеличивают сроки выполнения ремонтно-восстановительных работ. Цель исследования – разработка модели цифрового двойника ремонтно-восстановительной системы предприятий. Модель позволит сократить материальные затраты и найти наилучшие решения для организации требуемых работ.

Материалы и методы. Разработанная модель построена на основе имитационного моделирования. Авторы использовали методику, основанную на дискретно-событийном моделировании с использованием логико-математического аппарата описания событий, происходящих в реальном объекте.

Результаты исследования. Информационное обеспечение формируется на основе параметров производственных систем отдельных ремонтных предприятий и консолидированной с ним математической модели, являющейся цифровым двойником обобщенной производственной системы. Подобный подход позволил автоматизировать поиск оптимальных планов организации ремонтных работ отдельными ремонтными предприятиями с учетом их взаимосвязей.

Обсуждение и заключение. Цифровой двойник обобщенной производственной системы ремонтных организаций позволяет генерировать в короткие сроки возможные варианты распределения ресурсов и оперативно производить их верификацию, выбирая лучшие варианты, аккумулируя информацию об удачных решениях с целью сокращения времени проведения подобных поисков в будущем. Это позволит сократить время проведения ремонтно-восстановительных работ, повысить их качество и снизить трудоемкость.

© Следков Ю. Г., Хорошко Л. Л., Кузнецов П. М., Бутко А. О., 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: ремонтные работы, технологический процесс, автоматизация, математическая модель, база данных, программная среда, производительность

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Цифровой двойник процессов восстановления сельскохозяйственной техники / Ю. Г. Следков [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 4. С. 530–543. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.530-543>

Original article

The Digital Twin for Agricultural Machinery Restoration Processes

**Yu. G. Sledkov, L. L. Khoroshko, P. M. Kuznetsov*,
A. O. Butko**

*Moscow Aviation Institute (National Research University)
(Moscow, Russian Federation)*

**profpol@rambler.ru*

Abstract

Introduction. Agricultural machinery provides the required level of mechanization. Sand abrasive, dirt, and open-air operations considerably accelerate the wear of mechanisms. An improper work plan and lack of complete information about the state of specific equipment units increase the time for repair and maintenance operations. The purpose of the study is to develop a digital twin model for the repair and restoration system of enterprises. The model will reduce material costs and allow for the best solutions to organize the work.

Materials and Methods. The model is developed on the basis of simulation modeling. The authors used the approach based on discrete-event modeling with the logical-mathematical apparatus for describing events occurring in a real object.

Results. Information support is formed taking into account the parameters of the production systems of repair enterprises and a mathematical model, which is a digital twin of the production system. This approach made it possible to automate the development of optimal plans for organizing repair work by repair enterprises, taking into account their interrelationships.

Discussion and Conclusion. The digital twin for the generalized production system of repair organizations allows developing options for the resource allocation and verifying them promptly to choose the best options through accumulating information about the most successful solutions. This will reduce the time for repair and restoration works, improve their quality and save labor.

Keywords: repair work, technological process, automation, mathematical model, database, software environment, productivity

The authors declare no conflict of interest.

For citation: Sledkov Yu.G., Khoroshko L.L., Kuznetsov P.M., Butko A.O. The Digital Twin for Agricultural Machinery Restoration Processes. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(4):530-543. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.530-543>

Введение

Ремонтно-восстановительные работы сельскохозяйственной техники относятся к работам, которые во многих случаях приходится проводить в полевых

условиях. Сформированные бригады технического персонала выезжают на место дислокации техники, где и производят необходимый ремонт. Здесь следует выделить несколько факторов,

существенно влияющих на длительность и качество ремонта. Во-первых, важно сразу определить возможность выполнения работ на месте. Это позволит существенно сократить время начала контакта бригады и техники. Во-вторых, необходимо определить состав бригады и технического вооружения. В-третьих, важно оперативно разработать и оформить объем сопроводительной документации, включая технологическую, на проведение работ.

Для достижения этого необходима организация проектных работ, от качества и скорости выполнения которых существенно зависит время простоя ремонтируемой техники. Качество выполнения указанных работ определяется средствами автоматизации и прежде всего объемом использования средств вычислительной техники. Наличие программной среды с использованием статистических данных и информационного обеспечения в области технологии ремонтных работ является залогом успешного функционирования сельскохозяйственных машин и механизмов.

Цель исследования – разработка модели цифрового двойника ремонтно-восстановительной системы предприятий. Модель позволит оперативно без материальных затрат находить наилучшие решения организации проведения требуемых работ.

Обзор литературы

Сельскохозяйственная техника является основой механизации труда. Низкая защищенность от нежелательных воздействий внешней среды и частый выход из строя являются особенностью функционирования сельскохозяйственной техники. Вопросам развития предприятий и организаций, занимающихся ремонтом и восстановлением техники, посвящен ряд работ [1–3]. Указывается, что важной составляющей успешной организации предприятий является правильное планирование

и проектирование технологических процессов.

В основе любого технологического процесса лежит маршрутная технология, от правильного выбора которой зависит эффективность проводимых работ [4]. Поэтому вопросам проектирования маршрутной технологии посвящены исследования, в которых рассматриваются подходы к осуществлению проектирования и автоматизации [5]. Автоматизация проектирования предусматривает всестороннее использование средств вычислительной техники не только в качестве инструмента проектировщика, но и обеспечения процессов управления технологическим оборудованием, что особенно важно на этапе жизненного цикла, связанного с техническим сопровождением и сервисным обслуживанием [6–8].

Качество проектирования ремонтно-восстановительных работ определяет их производительность и себестоимость. В одной из работ особое внимание уделено вопросам определения структуры технологических процессов, выполняемых на предприятиях. Отмечается, что их структура зависит от организации производства и может отличаться от оптимальной [9]. При разработке технологических процессов реализуются две процедуры: структурный и параметрический синтез. Процедура структурного синтеза технологических процессов является трудно формализуемой, что вызывает большие сложности при ее автоматизации [10–12].

Математическое моделирование процессов распределения технологических операций, в частности ремонтно-восстановительных задач по рабочим местам ремонтных организаций, приобретает особое значение в этих условиях [13; 14]. Разработка математических моделей позволяет использовать основные положения проектно-операционного управления [15–17].

Проектно-операционное управление позволяет объединять в организационное целое технологическую подготовку производства и поддерживать производственные процессы на протяжении их жизненного цикла на основе формирования информационного обеспечения [18; 19]. В последнее время получило развитие проектно-операционное управление, позволяющее моделировать производственные процессы с позиции прогнозного моделирования [20; 21].

Большое значение имеет создание новых подходов для автоматизации расчетов параметров технологических процессов [22; 23]. Создание моделей для параметрического синтеза режимов технологических процессов [24], теория и практика обработки металлов резанием [25], оперативная диагностика технологического оборудования [26] позволяют оперативно получать данные о режимах обработки, обеспечиваемой точности, требуемой технологической оснастке и т. д. Все это является необходимым при моделировании различных структурных вариантов построения технологических процессов ремонтно-восстановительных работ.

Анализ литературных источников показывает, что существует репрезентативная база научных исследований, позволяющая разработать программную среду для поиска рациональной организации ремонтно-восстановительных работ сельскохозяйственной техники, минимизировать трудоемкость выполняемых работ и сократить время простоя оборудования.

Материалы и методы

Основным критерием эффективности функционирования производственной системы является степень загрузки ее технологических составляющих при одновременном отсутствии очереди на проведение ремонтных работ. С одной стороны, должна быть минимальная

избыточность производственных мощностей, а с другой – отсутствие очередей. Заявки поступают в производственную систему в различной последовательности, что вызывает противоречие описанных требований. Они начинают влиять на планирование. Для выполнения требований необходимо рационально распределить задачи по рабочим местам и времени. Это можно сделать с помощью цифрового двойника ремонтной производственной системы. В основе цифрового двойника лежит математическая модель, позволяющая описать состояние производственной системы в текущий момент времени и получить информацию о ее состоянии в будущем с учетом происходящих событий.

Матричное описание параметров производственной системы предлагается как основа математической модели. Матрица представляет собой двумерную матрицу Mt вида

$$Mt = \begin{vmatrix} t_{11} & \dots & t_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{m1} & \dots & t_{mn} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где t_{ij} – период времени переналадки технологического оборудования (рабочего места) при переходе от выполнения одной работы к другой. Как правило, при равенстве индексов i и j (диагональ) соответствующие компоненты обращаются в ноль.

Таким образом, предлагаемая матрица (1) характеризует каждую единицу технологического оборудования или одно рабочее место. Время выполнения технологических операций описывается массивом значений

$$T_{\text{оп}} = | t_{\text{оп}1}, \dots, t_{\text{оп}i}, \dots, t_{\text{оп}n} |, \quad (2)$$

где $t_{\text{оп}i}$ – время выполнения i -й операции.

Весь объем технологических операций, который может быть выполнен

в производственной системе, можно представить как бинарную матрицу вида

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & \dots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & \dots & b_{nn} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Здесь каждый компонент матрицы представляет собой значение либо логического нуля (операция не выполняется), либо логической единицы (операция выполняется).

Таким образом, произведение матриц

$$Q = Mt \cdot B + T_{\text{оп}} \quad (4)$$

определяет трудоемкость в единицах времени выполнения всего технологического процесса ремонтно-восстановительных работ. Совокупное значение величины $T_{\text{оп}}$ (2) определяется путем сложения соответствующих компонент $t_{\text{оп}i}$, исходя из их значений бинарной матрицы B (3). Для поиска рациональных решений рассматриваются различные варианты маршрутов (3), а по критерию трудоемкости (4) из них выявляются рациональные.

Результаты исследования

Реализация цифрового двойника процессов восстановления сельскохозяйственной техники на основе описанной модели выполнена в виде разработанной программной среды, позволяющей автоматизировать поиск рациональных решений. С целью отслеживания ремонтных и восстановительных работ и задач, а также контроля процесса их выполнения допускается возможность применения имеющихся на рынке систем управления проектами типа Microsoft Project. Данные в них будут поступать непосредственно из системы автоматизированного проектирования (САПР) в автоматизированном режиме. Это даст заметное сокращение трудоемкости задачи по формированию проекта.

Процессы предлагаемого комплексного решения покрывают несколько важнейших этапов жизненного цикла, способствующих эффективной работе технологических систем ремонтных и восстановительных предприятий.

Рассматриваемая интегрированная среда моделирования включает продукт программ и приложений, содержащий такие продукты, как Siemens PLM, Oracle и Microsoft (тут могут предлагаться варианты конфигурации решения для поддержки базы данных средствами Microsoft SQL либо средствами Oracle в зависимости от требований конечного заказчика).

Базовый алгоритм системы включает последовательное выполнение следующих этапов:

1. Проектирование и инженерные расчеты параметров и структуры ремонтной установки.
2. Создание технологических процессов и программ для управления ремонтными и восстановительными работами.
3. Составление конструкторской документации (КД) и технологической документации (ТД).
4. Формирование производственного плана.
5. Анализ и расчет экономических характеристик.
6. Консолидация результатов, документации и построение базы новых решений [27].

Ключевым моментом при реализации вышеперечисленных этапов является обмен данными между независимыми средствами проектирования, управления, моделирования и организация их совместной работы. Эта проблема наиболее заметна при переходе от проектирования к планированию производства, что может потребовать дополнительных решений путем реализации специального программного обеспечения, которое и было

предложено авторами в виде нескольких модулей, созданных инструментальными средствами современного программирования С#. Это привело к образованию инвариантной среды моделирования, включающей алгоритмы создания информационных моделей, консолидирующих данные, в том числе и требуемые для планирования производственных работ.

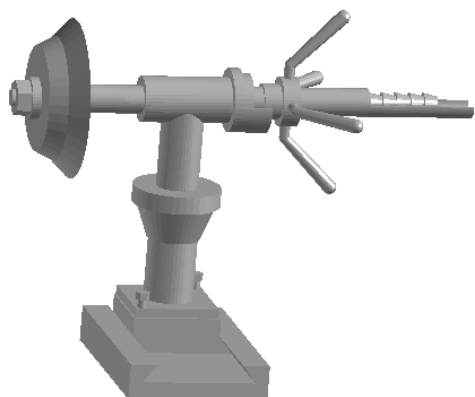
Представленное решение легло в основу системы структурно-параметрического моделирования (СПМ), функционирующей на базе лингвистической интерпретации проектируемых изделий с дальнейшей визуализацией программными средствами. Параллельно в модели реализуются необходимые инженерные расчеты и проектные характеристики объектов и задач. Помимо этого, комплекс дает возможность автоматизировать поиск оптимальной конфигурации оборудования для ремонтно-восстановительных работ, который зачастую требует значительных машинных ресурсов и высокопроизводительных вычислительных систем, а иногда и очень высоких временных затрат, особенно при моделировании многочисленных вариантов технологических процессов. Решением в данном случае стала дифференциация видов рабочих моделей в зависимости от простоты и объема данных. В случае незначительного размера модели и имеющегося свободного ресурса времени поиск может проводиться обычным способом путем перебора необходимого числа итераций. В противном случае, если время ограничено, а модель велика или содержит большой объем данных, лучшим вариантом становится предварительный подбор адекватного метода оптимизации из набора уже имеющихся (например, методы линейного или целочисленного программирования).

Для решения задачи моделирования различных вариантов организа-

ции ремонтно-восстановительных работ по конкретным объектам предложен программно-методический комплекс (ПМК) СПМ, представляющий инвариантную среду моделирования.

На первом этапе работы системы формируется задание на проектирование и планирование задач на основе списков требуемых ремонтных или восстановительных работ оборудования. Проводится анализ существующих результатов по аналогичным работам, ранее выполненным предприятием. Здесь же учитываются пожелания, корректировки и замечания, сделанные на различных этапах в прошлом с учетом возникших более благоприятных условий: обновление за этот период времени технологического оборудования, улучшение используемой оснастки и т. п. Если нет возможности скорректировать условия планируемых работ, в качестве основы принимается лучший вариант из присутствующих в базе. Параллельно ведется попытка построения обновленного варианта на базе реальных возможностей партнеров. Все процессы, проводимые в рамках предложенной среды, могут идти как локально в одной организации, так и распределенно с участием внешних проектировщиков удаленных предприятий. Итоговым результатом этапа служат комплект чертежей, технических описаний, дополнительной документации и наборы моделей по всему объекту. Параметризация является необходимой для модели. Она может включать заданные инженерные расчеты, в том числе и прочностные по методу конечных элементов. Инженеры готовят единую параметризованную модель со сквозной системой параметризации (рис. 1, табл. 1) таким образом, чтобы обмен данными по модернизации или модификации транслировался на все системы проектирования, включенные в комплекс. Это реализуется с помощью дополнительного программного модуля, через стандартный формат,

например таблицы Excel, путем обмена параметрами между САПР. По завершении формирования компоновочной модели проектировщики проверяют соответствие заданию и функциональные возможности.



Р и с. 1. Упрощенная модель ремонтного приспособления в СПМ

Fig. 1. Simplified model of a repair group in structural-parametric modeling

Второй этап включает сравнение и проверку всех альтернативных вариантов по нескольким показателям, включая функциональную избыточность. Оптимальным вариантом будет перекрытие областей необходимых и реальных технологических возможностей по решению поставленных задач. В практическом опыте реальные возможности оказываются выше и при приближении разности к минимальной применяемые технологические ресурсы снижаются, оставляя в реальной системе больше возможностей, что снижает объем необходимого запаса технологического оборудования. По мере надобности инженер получает задание по дальнейшей доработке самого удачного варианта, если он реализуется в аналогичных ремонтных работах на том же оборудовании. Цель – сократить время и снизить трудоемкость. Функционирование принятого варианта проверяют средствами программного технологического моделиера PRTECH.

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

**Представление параметров модели в ПМК СПМ
Representation of model parameters in the software-methodological complex
of structural-parametric modeling**

Свойства / Properties	Изображение / Image	Параметры / Parameters	Значения / Values
Код / Code	ц_основ	кол / quantity КОЛ / QUANTITY	1 100
Метка / Label	1	Угол (поворот) / Angle (rotation) ШИФР / CIPHER	10 1.1.1.1
Имя / Name	Основание / Base	Вес / Weight Sok	0,9 0,3
<i>V</i>	Входит в решение / Included in solution	<i>dx</i> <i>t</i> (трудоемкость обработки) / <i>t</i> (labor intensity)	350 1,245
Тело / Body	+	<i>B</i> <i>H</i>	165 245
Тип / Type	Д	<i>L</i>	700

Итогом этого этапа служит полностью готовая документация на проектируемое изделие.

Третий этап включает планирование сроков проведения ремонтно-восстановительных работ при использовании готового варианта объекта, на котором они будут выполняться. Модель вводится в специальный модуль обмена, что решает задачу автоматизированной передачи информации для получения данных о сроках проведения ремонтно-восстановительных работ, и составляется план загрузки оборудования ремонтных организаций. В рамках данного этапа по итогам построения модели в базу вносятся информация о наиболее удачных решениях в заданных условиях. В дальнейшем эти данные подвергаются анализу, составляется заключение.

Для автоматизации процесса формирования проекта с целью управления и планирования работ может быть предложен специальный модуль, который работает в комплексе с ПМК СПМ

и создает промежуточные базы данных, готовые для загрузки в систему Microsoft Project.

Созданный коллективом авторов модуль рассчитан на автоматизацию работ по формированию проекта, представляющего процесс создания, модификации, ремонта или восстановления объекта в системе Microsoft Project. Данный модуль позволяет обеспечить визуальное представление (рис. 2, табл. 2) и управление проектами в ходе подготовки объекта для проведения ремонтно-восстановительных работ в условиях сельскохозяйственного комбината.

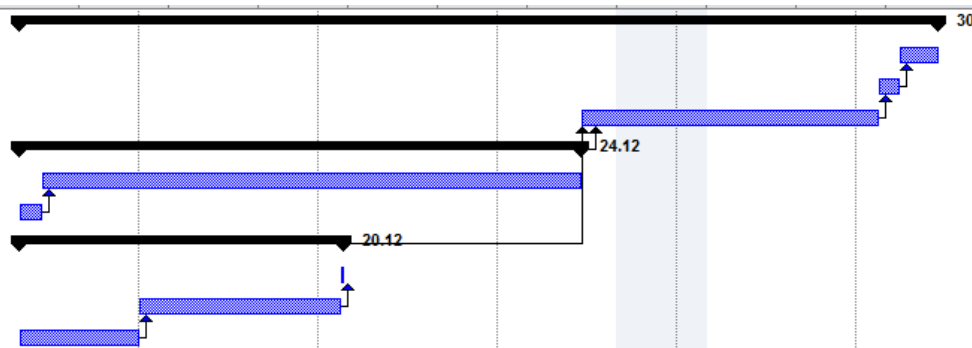
На завершающем этапе составляется необходимая документация, включающая следующие отчеты в типовой форме: отчеты о датах начала проведения ремонтно-восстановительных работ в рамках имеющихся заказов и планов; отчеты о поставке и сборке объекта на месте проведения ремонтно-восстановительных работ; диаграммы Ганта, иллюстрирующие ход одновременно

Т а б л и ц а 2

Table 2

**Представление списка задач в проекте
Representing the tasks of the project**

Название задачи / Task name	Длительность / Duration
Производственная специфика узла «Опора» [Узел-ПС], д / Production specifics of the "Support" [Uzel-PS], days	11,07
Контроль выборочный (20) [T_kontr], ч / Selective control (20) [T_kontr], h	0,67
Окраска узла [T_malyr], ч / Painting works [T_malyr], h	7,53
Сборка узла [T_sbsv_uzel], ч / Assembly works [T_sbsv_uzel], h	23,33
«Штырь» [Деталь1-ПС], д / "Pin" [Detal1-PS], days	7,12
Механическая обработка детали «Штырь» [T_mech_Detal1], ч / Machining of the "Pin" [T_mech_Detal1], h	56,97
Ресурсы для «Штыря» [Detal1-PS], ч / Resources for "Pin" [Detal1-PS], h	0,02
Основание [Деталь2-ПС], д / Base [Detal2-PS], days	3,16
Острые кромки притупить [T_sles], ч / Sharp edges blunt [T_sles], h	1,26
Механическая обработка детали «Основание» [T_mech_Detal2], ч / Machining of the "Base" [T_mech_Detal2], h	8,03
Заготовка-швеллер (отрезка) [T_shv], ч / Blank-channel (cut) [T_shv], h	16,00



Р и с. 2. Фрагмент диаграммы проекта на сборку изделия в MS Project
 F i g. 2. Project diagram fragment for assembling a product in MS Project

проводимых ремонтно-восстановительных работ; графики загрузки ремонтных агрегатов и установок во времени.

Здесь важно заметить возможность перспективы в виде усовершенствования средств планирования так, чтобы оператор мог работать с информацией на более ранних этапах построения модели изделия. Это дало бы возможность устранить или обойти ошибочные варианты моделирования на более ранней стадии проектирования. Такое смещение процессов оптимизации способствует своевременному получению информации о стоимости, продолжительности и предполагаемых перегрузках ремонтного оснащения.

На завершающей итерации производится интеграция имеющихся результатов моделирования в унитарной среде СПМ в форме комплексной информационной модели, представленной лингвистическими средствами (это могут быть графические файлы с таблицами и графиками, диаграммы Microsoft Project, отчеты в Word или Excel, результаты инженерных анализов в формате HTML-отчетов с изображениями и эпюрами, визуальные представления сборки, сборочные чертежи в различных форматах, в том числе из AutoCAD, спецификации и технические характеристики, результаты

испытаний и технологическая документация в стандартных форматах).

Разработанный подход сделал возможным консолидировать все данные об изделиях сельскохозяйственной техники в единую базу, что заметно облегчает работу с ней при организации ремонтно-восстановительных работ. Работа проводится в области единой интегрированной системы, при этом планирование, отслеживание и организация восстановительных и ремонтных работ выполняется с применением высокоэффективных инструментов автоматизированного проектирования. Использование имитационной модели, в основе которой заложен дискретно-событийный аппарат в виде логико-математического описания элементов модели, позволило исключить аналитическое описание реального объекта, что существенно упростило работу пользователя с моделью.

Обсуждение и заключение

Предложенное решение задачи поиска рациональной организации ремонтно-восстановительных работ сельскохозяйственной техники направлено на более глубокую степень автоматизации процессов планирования работ. Предлагаемые решения позволяют поддерживать разработанную модель в состоянии открытости для дальнейшего ее обогащения и использования систем

автоматизации проектирования. Это позволяет реализовать интеграцию отдельных ремонтных организаций и их подразделений в единую информационную систему, что значительно повышает эффективность их работы. Обмен данными о полученных удачных решениях, аккумулированных в единую базу, позволяет ускорить принятие рациональных решений. Накопленный статистический материал открывает возможность для оптимизации состава ремонтного технологического оборудования, избегая его дублирования и ошибочного

приобретения оборудования с характеристиками, не соответствующими специфике проводимых ремонтных работ.

В качестве дальнейшего развития данного направления исследований можно предположить расширение возможностей модели путем использования агентного подхода к построению имитационной модели. Такой подход основан на децентрализованном описании реальной системы, а следовательно, требует разработки правил поведения элементов системы индивидуально под каждый из них.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Просвирина М. Е., Червенкова С. Г., Андреев В. Н. Подход к разработке методического обеспечения системы управления знаниями предприятия // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2019. № 3. С. 108–111. URL: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/2183> (дата обращения: 07.12.2020).
2. Corporate Knowledge Management in Ramp-Up Conditions: The Stakeholder Interests Account, the Responsibility Centers Allocation / J. Y. Yeleneva [et al.] // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2018. Vol. 23. P. 207–216. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.12.002>
3. Еленева Ю. Я., Андреев В. Н., Чжиюй Л. Разработка подхода к управлению инвестиционными проектами на промышленных предприятиях на основе оценки рисков // Вопросы инновационной экономики. 2019. Т. 9, № 2. С. 489–500. doi: <https://doi.org/10.18334/vinec.9.2.40781>
4. Ягопольский А. Г., Домнышев А. А., Воронцов Е. А. Проблемы инновационного развития машиностроения России // Инновации и инвестиции. 2019. № 2. С. 7–9. URL: http://innovazia.ru/upload/iblock/c9d/№2_2019_ИиИ.pdf (дата обращения: 07.12.2020).
5. Informational Relational Models for Calculating the Cutting Conditions in Automatic Control Systems / S. Y. Kalyakulin [et al.] // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38, Issue 12. P. 1049–1052. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X18120250>
6. Improving the Performance of Multipurpose Machine Tools / M. Z. Khostikoev [et al.] // Russian Engineering Research. 2019. Vol. 39, Issue 1. P. 66–68. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19010052>
7. Self-Programming of the Tool Trajectory in CNC Lathes / V. A. Timiryazev [et al.] // Russian Engineering Research. 2019. Vol. 39, Issue 2. P. 154–157. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19020114>
8. Хорошко Л. Л., Кузнецов П. М. Цифровизация процессов восстановления сельскохозяйственной техники // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30, № 4. С. 711–722. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.711-722>
9. Кондаков А. И. Количественное оценивание подобия технологических операций и его приложения к задачам технологического проектирования // Справочник. Инженерный журнал. 2019. № 7. С. 22–27. doi: <https://doi.org/10.14489/ИВ.2019.07.РР.022-027>
10. Кондаков А. И., Гемба И. Н. Многосвязность предметно-специализированных производственных систем // Справочник. Инженерный журнал. 2019. № 10. С. 34–38. doi: <https://doi.org/10.14489/ИВ.2019.10.РР.034-038>
11. Постановка задач автоматизированного проектирования в САПР ТП / С. Ю. Калякулин [и др.] // СТИН. 2020. № 1. С. 2–5. URL: <http://stinjournal.ru/soderzhanie-stin-2020/> (дата обращения: 07.12.2020).
12. Hole Restoration in situ Using a Mobile Machine Tool, without Disassembly / P. F. Boiko [et al.] // Russian Engineering Research. 2019. Vol. 39, Issue 4. P. 345–348. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19040038>

13. Kuznetsov P. M., Khoroshko L. L. Digitalization of Multi-Object Technological Projecting in Terms of Small Batch Production // *Inventions*. 2020. Vol. 5, Issue 3. P. 38–48. doi: <https://doi.org/10.3390/inventions5030038>
14. Improving Precision in Selective Assembly / V. A. Timiryazev [et al.] // *Russian Engineering Research*. 2019. Vol. 39. P. 499–502. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19060182>
15. Проектно-операционное управление в машиностроительном производстве / А. В. Цырков [и др.] // *Вестник Мордовского университета*. 2018. Т. 28, № 4. С. 511–522. doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.511-522>
16. Бутко А. О., Кузнецов П. М., Хорощко Л. Л. Организация цифрового двойника процессов восстановления дробильно-измельчительного оборудования // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020. № 8. С. 130–144. doi: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-8-0-130-144>
17. Automated Design of Information Processing in Preproduction / S. Y. Kalyakulin [et al.] // *Russian Engineering Research*. 2020. Vol. 40, Issue 5. P. 413–415. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X2005010X>
18. Khostikoev M. Z., Timiryazev V. A., Orlov E. M. Control of the Machining Precision in Thread Cutting // *Russian Engineering Research*. 2018. Vol. 38, Issue 12. P. 1022–1025. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X18120109>
19. Хаба Э., Тимирязев В. А. Использование аддитивных технологий для изготовления деталей машин // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2018. № 11. С. 136–144. URL: https://www.giab-online.ru/files/Data/2018/11/136_144_11_2018.pdf (дата обращения: 07.12.2020).
20. Управление жизненным циклом продукции с позиций нового уклада организации производственных систем / А. В. Цырков [и др.] // *Качество и жизнь*. 2019. № 2. С. 28–34. URL: https://www.qj-journal.ru/arc/2019_2_22.pdf (дата обращения: 07.12.2020).
21. Хаба Э., Тимирязев В. А. Технологические возможности эффективного применения аддитивных технологий для изготовления деталей машин // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2018. № 8. С. 156–162. doi: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-8-0-156-162>
22. Martinov G. M., Kozak N. V. Numerical Control of Large Precision Machining Centers by the AxiOMA Control System // *Russian Engineering Research*. 2015. Vol. 35, Issue. 7. P. 534–538. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X15070114>
23. Maksimovskii D. E. Automation of Process Design by Design-Technological Parameterization // *Russian Engineering Research*. 2011. Vol. 31, Issue 9. P. 870–872. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X14110082>
24. САПР при моделировании режимов технологических процессов производства элементов конструкций летательных аппаратов [Электронный ресурс] / В. Ю. Астапов [и др.] // *Труды МАИ*. 2016. Вып. 87. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26293291> (дата обращения: 07.12.2020).
25. Кузьмин В. В., Калякулин С. Ю. Этапы преобразования информации при автоматизированном расчете параметров технологических процессов // *Автоматизация. Современные технологии*. 2015. № 9. С. 13–16. URL: https://www.mashin.ru/files/2015/ao_915_web.pdf (дата обращения: 07.12.2020).
26. Дмитриев Б. М. Диагностика технического состояния гибкой производственной системы // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2018. № 1. С. 10–14. URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2724 (дата обращения: 07.12.2020).
27. Бутко А. О., Кузнецов П. М. Построение информационных моделей в интегрированных системах // *Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России*. 2019. № 3. С. 20–25. URL: http://izdat.ntckompas.ru/editions/for_readers/archive/article_detail.php?SECTION_ID=160&ELEMENT_ID=24794 (дата обращения: 07.12.2020).

Поступила 20.12.2020; одобрена после рецензирования 10.02.2021; принята к публикации 01.03.2021

Об авторах:

Следков Юрий Германович, директор Института № 3 «Системы управления, информатика и электроэнергетика» Московского авиационного института (125993, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское ш., д. 4), кандидат технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6626-7283>, ygs@mai.ru

Хорошко Леонид Леонидович, заведующий кафедрой системного моделирования и автоматизированного проектирования Московского авиационного института (125993, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское ш., д. 4), кандидат технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7487-8997>, Researcher ID: P-2951-2014, khoroshko@mati.ru

Кузнецов Павел Михайлович, профессор кафедры системного моделирования и автоматизированного проектирования Московского авиационного института (125993, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское ш., д. 4), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9237-3848>, Researcher ID: K-8831-2018, profpol@ Rambler.ru

Бутко Антон Олегович, доцент кафедры системного моделирования и автоматизированного проектирования Московского авиационного института (125993, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское ш., д. 4), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7933-3582>, Researcher ID: J-8953-2018, mati-tias@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Ю. Г. Следков – научное руководство.

Л. Л. Хорошко – постановка задачи исследования, анализ литературных данных.

П. М. Кузнецов – разработка математического аппарата моделей проектирования.

А. О. Бутко – разработка и описание программных модулей и обеспечения.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Prosvirina M.E., Chervenкова S.G., Andreev V.N. Approach to the Development of Methodological Support of the Enterprise Knowledge Management System. *Vestnik MGTU "STANKIN" = Vestnik MSTU "STANKIN"*. 2019; (3):108-111. Available at: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/2183> (accessed 07.12.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
2. Yeleneva J.Y., Kharin A.A., Yelenev K.S., et al. Corporate Knowledge Management in Ramp-Up Conditions: The Stakeholder Interests Account, the Responsibility Centers Allocation. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2018; 23:207-216. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.12.002>
3. Eleneva Yu.Ya., Andreev V.N., Zhiyu L. Development of an Approach to the Management of Investment Projects in Industrial Enterprises on the Basis of Risk Assessment. *Voprosy innovatsionnoy ekonomiki = Russian Journal of Innovation Economics*. 2019; 9(2):489-500. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.18334/vinec.9.2.40781>
4. Yagopolskiy A.G., Domnyshev A.A., Vorontsov Ye.A. [Problems of Innovative Development of Mechanic Engineering Industry in Russia]. *Innovatsii i investitsii = Innovation and Investment*. 2019; (2):7-9. Available at: http://innovazia.ru/upload/iblock/c9d/№2_2019_ИИИ.pdf (accessed 07.12.2020). (In Russ.)
5. Kalyakulin S.Y., Kuzmin V.V., Mitin E.V., Suldin S.P. Informational Relational Models for Calculating the Cutting Conditions in Automatic Control Systems. *Russian Engineering Research*. 2018; 38(12):1049-1052. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X18120250>
6. Khostikoev M.Z., Danilov I.K., Nabatnikov Yu.F., Timiryazev V.A. Improving the Performance of Multipurpose Machine Tools. *Russian Engineering Research*. 2019; 39(1):66-68. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19010052>

7. Timiryazev V.A., Khostikoev M.Z., Konoplev V.N., Vetyugov A.V. Self-Programming of the Tool Trajectory in CNC Lathes. *Russian Engineering Research*. 2019; 39(2):154-157. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19020114>
8. Khoroshko L.L., Kuznetsov P.M. Digitalization of Agricultural Machinery Rehabilitation. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(4):711-722. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.711-722>
9. Kondakov A.I. Quantitative Evaluation of the Similarity of Technological Operations and Its Application to the Tasks of Technological Design. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal* = Handbook. An Engineering Journal with Appendix. 2019; (7):22-27. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.14489/HB.2019.07.PP.022-027>
10. Kondakov A.I., Gemba I.N. Multiconnectivity of Specialized Production Systems. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal* = Handbook. An Engineering Journal with Appendix. 2019; (10):34-38. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.14489/hb.2019.10.pp.034-038>
11. Kalyakulin S.Yu., Kuzmin V.V., Mitin E.V., Sul'din S.P. [Formulationn of Automated Process-Design Problems in CNC Systems]. *STIN* = Russian Engineering Research. 2020; (1):2-5. Available at: <http://stinyournal.ru/soderzhanie-stin-2020/> (accessed 07.12.2020). (In Russ.)
12. Boiko P.F., Timiryazev V.A., Khostikoev M.Z., Danilov I.K. Hole Restoration in situ Using a Mobile Machine Tool, without Disassembly. *Russian Engineering Research*. 2019; 39(4):345-348. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19040038>
13. Kuznetsov P.M., Khoroshko L.L. Digitalization of Multi-Object Technological Projecting in Terms of Small Batch Production. *Inventions*. 2020; 5(3):38-48. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3390/inventions5030038>
14. Timiryazev V.A., Khostikoev M.Z., Konoplev V.N., et al. Improving Precision in Selective Assembly. *Russian Engineering Research*. 2019; 39:499-502. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19060182>
15. Tsyrvkov A.V., Kuznetsov P.M., Tsyrvkov G.A., et al. Project and Operations Management of Machine-Building Production. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(4):511-522. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.511-522>
16. Butko A.O., Kuznetsov P.M., Khoroshko L.L. Creating a Digital Twin of Crushing and Milling Equipment Reconditioning Process. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* = Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). 2020; (8):130-144. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-8-0-130-144>
17. Kalyakulin S.Yu., Kuz'min V.V., Mitin E.V., Sul'din S.P. Automated Design of Information Processing in Preproduction. *Russian Engineering Research*. 2020; 40(5):413-415. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X2005010X>
18. Khostikoev M.Z., Timiryazev V.A., Orlov E.M. Control of the Machining Precision in Thread Cutting. *Russian Engineering Research*. 2018; 38(12):1022-1025. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X18120109>
19. Haba E., Timiryazev V.A. Application of Additive Technologies in Manufacture of Machine Parts. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* = Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). 2018; (11):136-144. Available at: https://www.giab-online.ru/files/Data/2018/11/136_144_11_2018.pdf (accessed 07.12.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
20. Tsyrvkov A.V., Yurtsev E.S., Ragutkin A.V., et al. Product Life Cycle Management from the Position of the New Owning of the Organization of Production Systems. *Kachestvo i zhizn* = Quality and Life. 2019; (2):28-34. Available at: https://www.ql-journal.ru/arc/2019_2_22.pdf (accessed 07.12.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
21. Haba E., Timiryazev V.A. Technological Capabilities of Efficient Use of Additive Technologies in Manufacture of Machine Parts. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* = Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). 2018; (8):156-162. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-8-0-156-162>

22. Martinov G.M., Kozak N.V. Numerical Control of Large Precision Machining Centers by the AxiOMA Control System. *Russian Engineering Research*. 2015; 35(7):534-538. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X15070114>
23. Maksimovskii D.E. Automation of Process Design by Design-Technological Parameterization. *Russian Engineering Research*. 2011; 31(9):870-872. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X14110082>
24. Astapov V.Yu., Khoroshko L.L., Afshari P., Khoroshko A. Computer Aided Design in the Modeling Mode of Technological Processes Producing the Elements of the Flying Apparatus Constructions. *Trudy MAI = Works of MAI*. 2016; 87. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26293291> (accessed 07.12.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
25. Kuzmin V.V., Kalyakulin S.Yu. [Stages of Data Conversation for Automated Determination of Technological Process Parameters]. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii = Automation of Modern Technologies*. 2015; (9):13-16. Available at: https://www.mashin.ru/files/2015/ao_915_web.pdf (accessed 07.12.2020). (In Russ.)
26. Dmitriyev B.M. Diagnosis of Technical State of Flex Production System. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya = Repair, Reconditioning, Modernization*. 2018; (1):10-14. Available at: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2724 (accessed 07.12.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
27. Butko A.O., Kuznetsov P.M. Creating of Information Models in Integrated Systems. *Oboronnyy kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii = Defense Industry Achievements – Russian Scientific and Technical Progress*. 2019; (3):20-25. Available at: http://izdat.ntckompas.ru/editions/for_readers/archive/article_detail.php?SECTION_ID=160&ELEMENT_ID=24794 (accessed 07.12.2020). (In Russ., abstract in Eng.)

Submitted 20.12.2020; approved after reviewing 10.02.2021; accepted for publication 01.03.2021

About the authors:

Yuriy G. Sledkov, Director of Institute No. 3 “Control Systems, Informatics, and Electric Power Engineering”, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6626-7283>, ygs@mai.ru

Leonid L. Khoroshko, Head of the Chair of System Modeling and Computer-Aided Design, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7487-8997>, Researcher ID: P-2951-2014, khoroshko@mati.ru

Pavel M. Kuznetsov, Professor of the Chair of System Modeling and Computer-Aided Design, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9237-3848>, Researcher ID: K-8831-2018, profpol@rambler.ru

Anton O. Butko, Associate Professor of the Chair of System Modeling and Computer-Aided Design, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7933-3582>, Researcher ID: J-8953-2018, mati-tias@yandex.ru

Contribution of the authors:

Yu. G. Sledkov – academic advising.

L. L. Khoroshko – setting study problem, analyzing the literature data.

P. M. Kuznetsov – developing mathematical apparatus for a design model.

A. O. Butko – developing and describing program units and software.

All authors have read and approved the final manuscript.



Применение наплавочных материалов для повышения долговечности рабочих органов дисковых борон

С. С. Грядунов^{1*}, В. В. Сиваков²

¹Брянский государственный технический университет
(г. Брянск, Российская Федерация)

²Брянский государственный инженерно-технологический университет (г. Брянск, Российская Федерация)

* gryadunowcc@mail.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время для поверхностной обработки почвы широко используют дисковые бороны, рабочими органами которых являются диски, изнашивающиеся в процессе работы. Интенсивность изнашивания дисков зависит от износостойкости их рабочих поверхностей, режимов работы и свойств обрабатываемой почвы. Установлено, что эффективным способом повышения долговечности дисков является наплавка износостойкими материалами. Целью работы являются исследование изнашивания наплавочных материалов, которые могут быть использованы для упрочнения дисков, и составление рекомендаций по применению в ремонтных подразделениях сельхозпредприятий.

Материалы и методы. Наплавки электродами Т-590, порошковыми проволоками ПП-Нп200Х15С1ГРТ, ВЕЛТЕК-Н560.02 и ПП-Нп280Х9Ф7СГ4 были приняты в качестве исследуемых материалов. Для испытаний материалов на изнашивание в абразивной массе использовали установку, позволяющую моделировать влажность и состав (супесь или суглинок) почвы. При испытаниях по схеме диск-колodочка изучали влияние на изнашивание материалов таких факторов, как размер абразивных частиц, нагрузка и скорость трения скольжения. При полевых испытаниях контролировали изнашивание дисков из стали 65Г и наплавленных дисков «ромашка» с вырезами и со сплошным лезвием.

Результаты исследования. В результате лабораторных исследований материалов выявлены зависимости влияния влажности и состава почвы, нагрузки, зернистости абразива и скорости трения скольжения на износ. Основным фактором, определяющим износостойкость материалов, является их структурное состояние. Ряд износостойкости наплавов, установленный при лабораторных испытаниях, подтвержден в результате полевых испытаний.

Обсуждение и заключение. Наплавка порошковой проволокой ПП-Нп280Х9Ф7СГ4 обладает наиболее высокой износостойкостью из исследуемых материалов. Технология упрочнения дисков наплавкой современными материалами, в частности порошковой проволокой ПП-Нп280Х9Ф7СГ4, может быть реализована в условиях ремонтных подразделений сельхозпредприятий при наличии оборудования для наплавки и заточки рабочих поверхностей.

Ключевые слова: наплавка, наплавочные материалы, упрочнение, износ, дисковые бороны

© Грядунов С. С., Сиваков В. В., 2021



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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Грядунев С. С., Сиваков В. В. Применение наплавочных материалов для повышения долговечности рабочих органов дисковых борон // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 4. С. 544–558. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.544-558>

Original article

The Use of Surfacing Materials to Increase the Durability of Disc Harrow Working Elements

S. S. Gryadunov^{a*}, V. V. Sivakov^b

^a *Bryansk State Technical University (Bryansk, Russian Federation)*

^b *Bryansk State Technological University of Engineering (Bryansk, Russian Federation)*

* gryadunowcc@mail.ru

Abstract

Introduction. For surface tillage operation there widely used disc harrows, working bodies of which are discs wearing out during operation. The wear intensity of discs depends on the wear resistance of their working surfaces, working modes and properties of the cultivated soil. It has been found that an effective way to increase the life of discs is surfacing them with wear-resistant materials. The aim of the work is to study the wear out of surfacing materials, which can be used to harden discs and to make recommendation for the use of these materials in the repair departments of agricultural enterprises.

Materials and Methods. Surfacing with electrodes T-590 and powder wires PP-Np200Kh15S1GRT, VELTEK-N560.02 and PP-Np280Kh9F7SG4 were taken as test materials. For wear tests of materials in abrasive mass, there was used an apparatus to simulate the moisture content and composition (sandy loam or loam) of the soil. In the disk-pad tests, the effect of abrasive particle size, load and sliding friction velocity on the wear of the materials was studied. In field tests, wear of the disks made of 65G steel, surfaced toothed and solid disks were monitored.

Results. Laboratory studies of the materials revealed the effect of soil moisture and composition, load, abrasive grit and sliding friction velocity on wear. The main factor determining the wear resistance of materials is their structural state. The indexes of wear resistance of surfacing were determined during the laboratory tests and confirmed by field tests.

Discussion and Conclusion. Surfacing with flux-cored wire PP-Np280Kh9F7SG4 has the highest wear resistance of the studied materials. The technology of hard-facing disks with modern materials, in particular with flux-cored wire PP-Np280Kh9F7SG4, can be implemented in repair departments of agricultural enterprises when they have the equipment for hard-facing and sharpening of working surfaces.

Keywords: surfacing, surfacing materials, hardening, wear, disc harrows

The authors declare no conflict of interest.

For citation: Gryadunov S.S., Sivakov V.V. The Use of Surfacing Materials to Increase the Durability of Disc Harrow Working Elements. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(4):544-558. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.544-558>

Введение

В настоящее время обработка почвы остается основной земледелия в сельском хозяйстве. Поверхностная обработка почвы глубиной до 15 см

осуществляется дисковыми боронами, выполняющими такие технологические операции, как рыхление, оборачивание, перемешивание, подрезание сорняков и т. д. В качестве рабочих

органов дисковых борон применяют сферические диски. Их изготавливают посредством вырубки и гибки из листовой стали 65Г. После термической обработки и заточки твердость рабочей зоны составляет 35–45 HRC, угол заточки 37° при толщине лезвия $0,3\text{--}0,5\text{ мм}^1$ [1].

Изменение размеров и формы рабочих поверхностей дисков является основной причиной потери их работоспособности. Наиболее важными процессами, влияющими на долговечность дисков, являются изнашивание, усталостные процессы и колебания рабочих нагрузок. Интенсивность изнашивания зависит от таких режимов работы, как скорость движения агрегата, глубина обработки, угол атаки. Интенсивность также зависит от фрикционных и физико-механических свойств почвы (прочность, твердость, влажность и др.) и свойств изнашиваемой поверхности дисков.

Благодаря полевым испытаниям серийно выпускаемых дисков установлено, что средняя наработка на отказ составляет 12–25 га, что свидетельствует о значительном влиянии на срок службы технологических и эксплуатационных факторов [2]. В связи с этим задача повышения долговечности рабочих органов дисковых борон является актуальной.

На основании многочисленных работ выявлено, что наплавка износостойкими материалами является эффективным способом повышения долговечности дисков. Наплавка может быть выполнена в ремонтных подразделениях сельхозпредприятий.

Цель работы – исследовать изнашивание наплавочных материалов, которые могут быть использованы для наплавки рабочих органов дисковых борон, и составить рекомендаций по применению в ремонтных подразделениях сельхозпредприятий.

Обзор литературы

Отечественные ученые М. М. Тененбаум, Д. Б. Бернштейн, В. Н. Ткачев, М. Н. Ерохин, В. Н. Виноградов, В. С. Новиков, С. А. Сидоров и др. исследовали изнашивание рабочих органов почвообрабатывающих машин. Установлено, что при перемещении дисков в почве на рабочих поверхностях могут создаваться различные вариации контактного взаимодействия материала с абразивными частицами, что приводит к протеканию смешанных процессов изнашивания. Микрорезание возможно при соотношении твердости металла к твердости абразива менее 0,6. М. М. Тененбаум установил данный факт в одной из своих работ². Усталостное изнашивание происходит в результате разрушения при многократном повторном деформировании микроразмеров материала поверхности абразивными частицами³. При химическом разупрочнении изнашивание заключается в удалении с поверхности детали охрупченного под действием кислорода или водорода слоя, образованного в результате активного воздействия среды.

В работах Д. Б. Бернштейна [3], С. А. Сидорова [4–6], Т. Н. Ткачева, А. Ш. Рабиновича, Ч. В. Пульки и др. установлена эффективность использования наплавки для рабочих органов

¹ Сохт К. А., Трубилин Е. И., Коновалов В. И. Дисковые бороны и лушители. Проектирование технологических параметров : учеб. пособие. Краснодар : КубГАУ, 2014. 164 с. URL: <http://www.kubsau.ru/upload/iblock/3ed/3ed5134865100667522daf24a5faacaf.pdf> (дата обращения: 13.07.2021).

² Тененбаум М. М. Спротивление абразивному изнашиванию. М. : Машиностроение, 1976. 271 с. URL: <https://ru.b-ok.xyz/book/3121787/3ebfb0> (дата обращения: 12.07.2021).

³ Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М. : Машиностроение, 1977. 526 с. URL: https://www.studmed.ru/kragelskiy-iv-dobychin-mn-kombalov-vs-osnovy-raschetov-na-trenie-i-iznos_d836865d1fc.html (дата обращения: 12.07.2021).

сельскохозяйственных машин [7–10]. Наплавка может быть выполнена для упрочнения новых или восстановления изношенных дисков [11]. Для наплавки использовали сормайт, сталинит, твердые сплавы ВК2 и ВК3, электроды Т-590, Т-620, ОЗН-6, порошковые проволоки ПП-Нп80Х10РМТ, ПП-Нп30Х5Г2СМ, ПП-АН170, порошковые ленты ПЛ-АН101, ПЛ-АН111⁴ [12; 13]. Наплавка может выполняться как сплошную, так и отдельными участками. При этом лезвие обладает эффектом самозатачивания вследствие разницы в твердости наплавленного и основного металла [9; 14; 15]. Среди других методов упрочнения стоит выделить следующие: нанесение полимерных и композиционных материалов, плакирование износостойкой лентой, детонационно-газовое напыление, упрочнение электроискровым или лазерным методом [16], намораживание, накатка, вибрационная обработка, науглероживание и борирование рабочей поверхности и др. [17–20]. Эти методы могут быть рекомендованы к применению в специализированных ремонтных предприятиях, требуют сложного технологического оборудования и высокой квалификации исполнителей.

Наряду с отечественными производителями дисковых рабочих органов, такими как ООО «Канмаш Агро», ООО «БДТ-АГРО», АО «КМЗ», ООО «Сибтехника», ведущие западные фирмы John Deere (США), Forges de Niaux (Франция), La Pina, Bellota Herramientas S.A. (Испания), Land (США, Великобритания) совершенствуют конструкции, технологии производства и упрочнения [1]. Так, компания Bellota производит диски для борон из боросодержащей стали с твердостью 48–52 HRC, выдерживающие ударные

нагрузки без повреждения с обеспечением эффекта самозатачивания.

В данной работе рассматривалась возможность применения наплавки для повышения долговечности дисков за счет использования новых наплавочных материалов и технологии наплавки, которую можно реализовать в условиях ремонтных подразделений сельхозпредприятий.

Материалы и методы

Помимо стали 65Г в качестве исследуемых материалов были приняты наплавки электродами Т-590, порошковыми проволоками ПП-Нп200Х15С1ГРТ, ВЕЛТЕК-Н560.02 и ПП-Нп280Х9Ф7СГ4. Выбор указанных материалов для исследования обусловлен тем, что они предназначены для наплавки деталей, контактирующих с абразивом в процессе эксплуатации, технологически их наплавка может быть реализована в условиях ремонтных мастерских сельхозпредприятий, а электроды Т-590 уже применялись для упрочнения дисков. В таблице 1 приведены химический состав и твердость наплавленных материалов, в таблице 2 – режимы их наплавки.

Для испытаний материалов на изнашивание в абразивной массе использовали установку, особенностью которой является то, что два образца из исследуемых материалов совершают поступательные и одновременно вращательные движения в абразивной массе. Вращение образцов вокруг собственной оси происходит в противоположных направлениях. Такое движение приводит к равномерному перемещению абразивной массы, которая дополнительно прикапывается роликами [21]. Скорость движения образцов в абразивной массе принимали за 1 м/с, что соответствует реальным условиям эксплуатации деталей почвообрабатывающих машин [22].

⁴ Новиков В. С. Упрочнение рабочих органов почвообрабатывающих машин. М. : ФГБОУ «МГАУ им. В. П. Горячкина», 2013. 112 с.

Таблица 1

Table 1

Химический состав и твердость материалов
Chemical composition and hardness of materials

Материал / Material	C	Cr	V	Mn	Si	B	Ti	Твердость, HRC / Hardness, HRC
Сталь 65Г / Steel 65G	0,62–0,70			0,9–1,2	0,17–0,37			40–44
T-590	2,9–3,5	22–27		1,0–1,5	2,0–2,5	1,0–1,5		58–62
ПП-Нп200Х15С1ГРТ / PP-Np200Kh15S1GRT	1,9	17		1,2	1,5	0,8	0,5	50–54
H560.02 / N560.02	0,5	9		0,8	2,5			52–26
ПП-Нп280Х9Ф7СГ4 / PP-Np280Kh9F7SG4	2,8	9	7	4,0	1,0			58–62

Таблица 2

Table 2

Режимы наплавки материалов
Modes of surfacing materials

Материал / Material	Диаметр, мм / Diameter, mm	Ток, А / Current, A	Напряжение, В / Voltage, V
T-590	4,0	200–220	
ПП-Нп200Х15С1ГРТ / PP-Np200Kh15S1GRT	2,0	180–240	25–28
H560.02 / N560.02	2,0	180–240	23–26
ПП-Нп280Х9Ф7СГ4 / PP-Np280Kh9F7SG4	2,4	240–300	24–28

Образцы из стали 65Г изготавливали в виде полых цилиндров наружным диаметром 20 мм и длиной рабочей части 25 мм. Для получения образцов с наплавкой на прутки из стали 20 диаметром 18 мм наносили указанные материалы, затем рабочие поверхности шлифовали. Для уменьшения массы образцов высверливали глухие отверстия диаметром 15 мм.

Авторы смоделировали процесс изнашивания дисков в условиях почвы Брянского района Брянской области. Абразивную массу из кварцевого песка (с размером частиц 0,5–0,7 мм) и каолиновой глины марки С2 использовали в соотношениях 15 % глины от всей

абразивной массы (супесчаные почвы) и 25 % глины (легкий суглинок)⁵. Смесь получали в смесителе каткового типа, применяемом в литейном производстве при изготовлении песчано-глинистых смесей. Влажность абразивной смеси, оцениваемую термостатно-весовым способом, при проведении испытаний задавали равной 6, 12 и 18 %.

Для изучения влияния на процесс изнашивания дисков таких факторов, как размеры абразивных частиц, нагрузка на рабочие поверхности и скорость трения скольжения образца, использовали установку, реализующую схему диск-колодочка.

⁵ ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия. М., 2014. 10 с.; ГОСТ 3226-93. Глины формовочные огнеупорные. Общие технические условия. М., 1993. 5 с.

Образцы изнашивали трением о кварцевые частицы. Частицы подавались в зону трения с помощью дозатора и прижимались к образцу вращающимся резиновым диском диаметром 50 мм, который приводили во вращение механические передачи от электродвигателя постоянного тока. Испытуемый образец, закрепленный в державке с возможностью перемещения по цилиндрической направляющей, прижимался к резиновому диску пневмоцилиндром, работающим от компрессора марки СО-7А. Прилагаемая на образец нагрузка обеспечивалась регулированием давления в пневмосистеме и контролировалась манометром. Для регистрации усилия, прикладываемого к образцу, использовался тензодатчик, размещенный на пластине в месте контакта штока пневмоцилиндра и державки образца.

Для изготовления образцов использовали втулки из стали 20 с внутренним диаметром 52 мм. Образцы разрезали вдоль и наплавляли их внутренние поверхности. Затем их подвергали механической обработке с приработкой абразивным инструментом по диаметру 50 мм. В соответствии с рекомендациями ГОСТа 23.208-79 диск изготавливали из резины АМС-Т с твердостью 78–85 по ГОСТу 20403-75⁶. Для опыта брали кварцевый песок фракций 0,3–0,5 мм и 0,7–1,0 мм по ГОСТу 6139-2003⁷.

Испытания проводили при следующих режимах: давление на образец 0,7, 1,0 и 1,3 МПа, что соответствовало нагрузке 70, 100 и 130 Н; частота вращения ролика 100, 150 и 200 мин⁻¹;

продолжительность испытаний 1 ч или до получения достоверных значений износа, определяемого весовым способом [23].

Производственные испытания наплавленных дисков совместно с дисками из стали 65Г проводили при обработке супесчаных и легких суглинистых почв Брянского района Брянской области. Испытывали диски «ромашка», диски с вырезами полукруглой формы и диски со сплошным лезвием (рис. 1).



Р и с. 1. Наплавленные диски
F i g. 1. Surfaced discs

Поскольку при полевых испытаниях БДТ-7 были оснащены дисками «ромашка», такой тип дисков наплавляли порошковой проволокой ПП-Нп280Х9Ф7СГ4 (5 шт.), электродами Т-590 и порошковыми проволоками ПП-Нп200Х15С1ГРТ и Н560.02 (по 3 шт.). Диски со сплошным лезвием и вырезами наплавляли только проволокой ПП-Нп280Х9Ф7СГ4 (по 5 шт.). Такое количество дисков не позволяет провести статистический анализ результатов испытаний, но его достаточно

⁶ ГОСТ 23.208-79. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о жестко закрепленные абразивные частицы. М., 2005. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200010684> (дата обращения: 16.06.2021) ; ГОСТ 20403-75. Резина. Метод определения твердости в международных единицах (от 30 до 100 IRHD). М., 1992. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200018775> (дата обращения: 16.06.2021).

⁷ ГОСТ 6139-2003. Песок для испытаний цемента. Технические условия. М., 2004. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200035471> (дата обращения: 16.06.2021).

для выявления наплавки, обеспечивающей наибольшую долговечность рабочих органов. Износ наплавленных дисков сопоставляли с износом новых дисков из стали 65Г (5 шт.).

Наплавку дисков с выпуклой стороны на приведенных ранее режимах выполняли с использованием специального поворотного приспособления с предварительным подогревом газовой горелкой наплавливаемых поверхностей до температуры 350–450 °С. Температура контролировалась контактным пирометром. Сразу после наплавки поверхности укрывали теплоизоляционным сварочным полотном по ТУ 3441-001-62162486.

Заточку режущего лезвия наплавленного диска на угол 35–37° проводили на специальном стенде. Для этого диск закреплялся в устройстве стенда, которое обеспечивало возможность поворота диска вручную вокруг своей оси и выставку на заданный угол заточки. Вращающийся шлифовальный круг, установленный на оправке с возможностью настройки по высоте, подводился к диску и, при медленном поворачивании последнего, обеспечивалась его заточка. Простая конструкция стенда позволяет изготовить и использовать его в условиях ремонтных подразделений сельхозпредприятий.

Подготовленные к испытаниям диски устанавливали на батарее тяжелой дисковой бороны БДТ-7, которая агрегатировалась с трактором К-701. Условия испытаний – обработка пара на стерне зерновых без предшествующей обработки. Почва имела твердость от 2 до 3 МПа и влажность от 8 до 9%. Глубина обработки составила 9–11 см, рабочая скорость трактора была от 11 до 12 км/ч.

В процессе испытаний проводили визуальный контроль износа дисков и возможных дефектов, к которым относили трещины в области зубьев

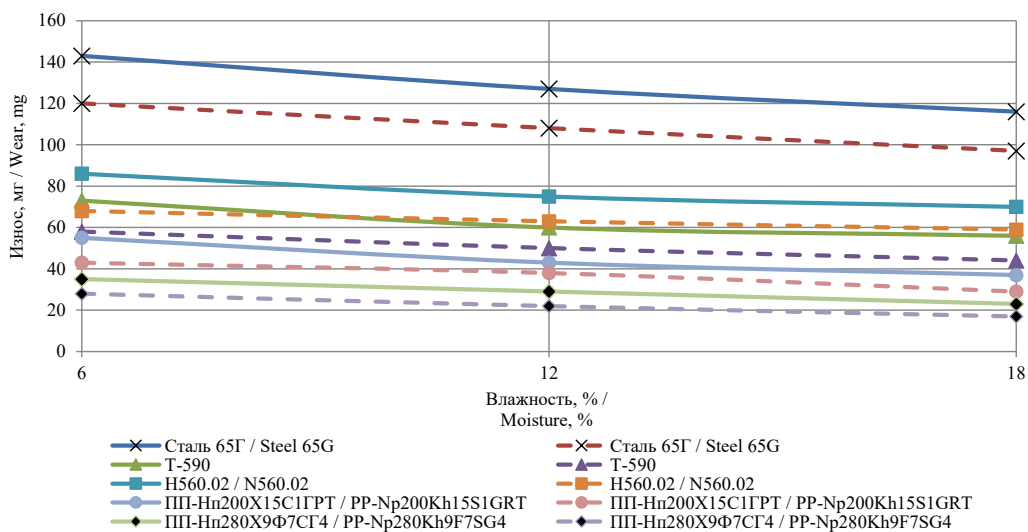
и крепления, нарушение геометрической формы. В качестве контрольного параметра, характеризующего работоспособность дисков, принимали износ по наружному диаметральному сечению в двух противоположных (диски со сплошным лезвием) или относительно противоположных точках (диски «ромашка» и диски с вырезами). Среднюю наработку на отказ оценивали при достижении дисками предельного износа.

Результаты исследования

Результаты исследований материалов при изнашивании в абразивной массе приведены на рисунке 2. С увеличением влажности износ снижается для всех рассматриваемых материалов. При анализе процесса изнашивания рабочих органов почвообрабатывающих машин в зависимости от влажности почвы в качестве основных следует учитывать следующие факторы: степень закрепленности абразивных частиц, адсорбцию активной среды на поверхности трения, твердость и структурное состояние этой поверхности. Степень закрепленности абразивных частиц снижается с ростом влажности, поэтому снижается и износ.

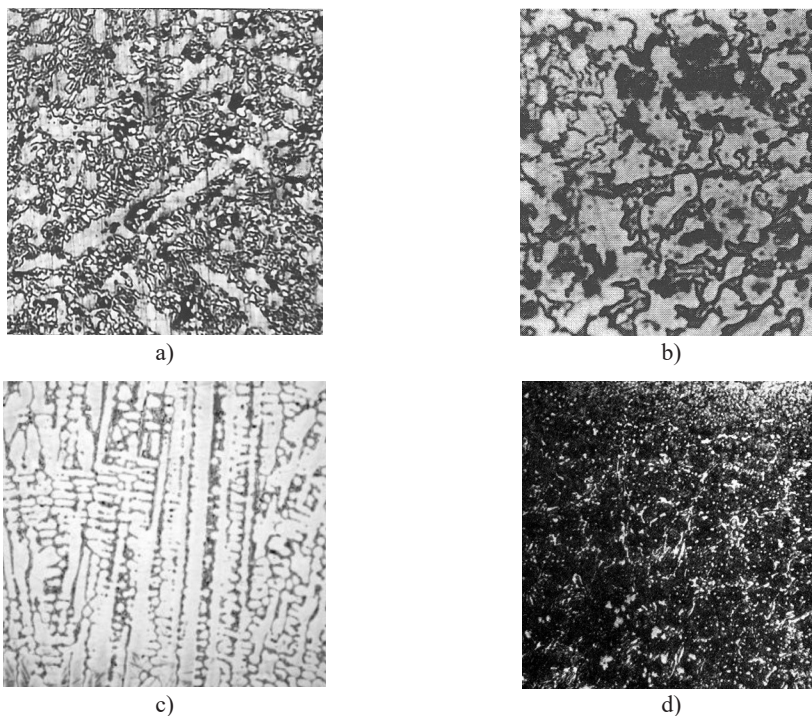
В реальной почве практически всегда имеется незначительное содержание кислот и солей, которые при растворении в воде способствуют повышению активности адсорбционной среды на поверхности трения и ускоряют процесс разрушения микрообъемов материала при многократном воздействии твердых частиц. Однако при данных испытаниях фактор повышения активности среды не реализуется. Твердость и структурное состояние исследуемых материалов являются основными факторами, определяющими их износостойкость.

Наплавка электродами Т-590 и порошковой проволокой ПП-Нп200Х15С1ГРТ обеспечивает наплавленный металл, содержащий в качестве упрочняющей фазы карбиды и карбобориды (рис. 3а, 3с).



Р и с. 2. Влияние влажности и состава почвы на износ материалов: сплошная линия – супесь; пунктирная – суглинок

F i g. 2. Influence of moisture and soil composition on the material wear: solid line – sandy loam; dotted line – loam



Р и с. 3. Микроструктура исследуемых материалов (x400):
а) ПП-Нп200Х15С1ГРТ; б) Н560.02; в) Т-590; д) ПП-Нп280Х9Ф7СГ4

F i g. 3. Microstructure of the investigated materials (x400):
а) PP-Np200Kh15S1GRT; б) N560.02; в) T-590; д) PP-Np280Kh9F7SG4

При этом в отличие от наплавки ПП-Нп200Х15С1ГРТ в структуре материала, наплавленного электродами Т-590, имеется большое количество изолированных крупных карбидов бора (рис. 3с), которые могут выкрашиваться вследствие изнашивания или разрушения основы сплава, снижая его износостойкость. Износостойкость наплавки Н560.02 ниже других наплавов из-за более низкого содержания карбидной фазы в сплаве (рис. 3б).

Наплавка ПП-Нп280Х9Ф7СГ4 представляет собой естественный композиционный материал, структура которого содержит двойные и тройные эвтектические колонии, армированные формирующимися в процессе кристаллизации карбидами ванадия (рис. 3д). Карбиды имеют структуру волокон, перпендикулярных к поверхности трения. Они неспособны к выкрашиванию без предварительного разрушения. Это обеспечивает высокую износостойкость в условиях абразивного изнашивания, что отмечается в ряде работ⁸ [12; 24; 25].

Изнашивающая способность почвы возрастает с ростом количества абразивных частиц. Это подтверждается результатами испытаний и данными других исследований [26].

Результаты испытаний исследуемых материалов на изнашивание незакрепленным абразивом по схеме диск-колодочка представлены на рисунках 4 и 5.

Анализ влияния нагрузки в контакте образцов с роликом при частоте вращения последнего 100 мин^{-1} позволил выявить нелинейную зависимость увеличения износа с ростом нагрузки. При этом, чем выше износостойкость

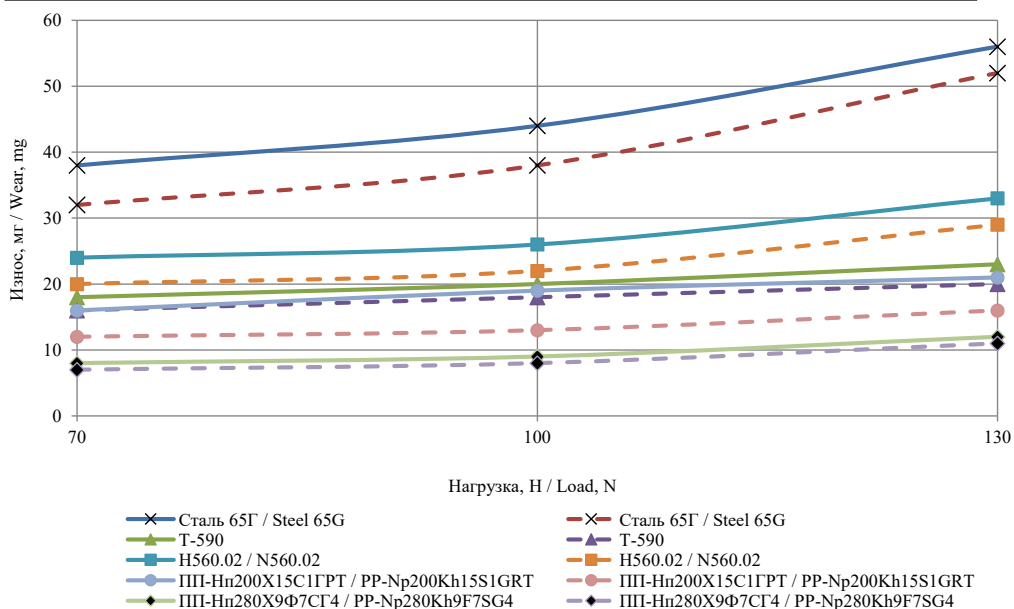
материала, тем указанная зависимость более линейна. Выявленный ранее ряд износостойкости материалов при переходе к другому виду испытаний не изменился. Наиболее износостойкой оказалась наплавка порошковой проволокой ПП-Нп280Х9Ф7СГ4.

С увеличением размера кварцевых частиц величина износа снижается. При меньшем количестве крупных частиц зерен в контакте образцов с роликом абразивное действие их на изнашиваемую поверхность оказывается менее интенсивным, чем действие большего количества мелких частиц, способных создавать более высокие контактные напряжения в микрообъемах поверхности трения. Увеличение размера зерен может привести к повышению износа только в случае их дробления при изнашивании, поскольку в процессе разрушения абразивных частиц происходит интенсивное повреждение контактных поверхностей образующимися мелкими частицами.

В результате испытаний дисковых борон установлено, что повышение скорости относительного перемещения кварцевых частиц и рабочей поверхности диска приводит к росту износа диска [27]. Это коррелирует с результатами испытаний исследуемых материалов при увеличении частоты вращения ролика (рис. 5).

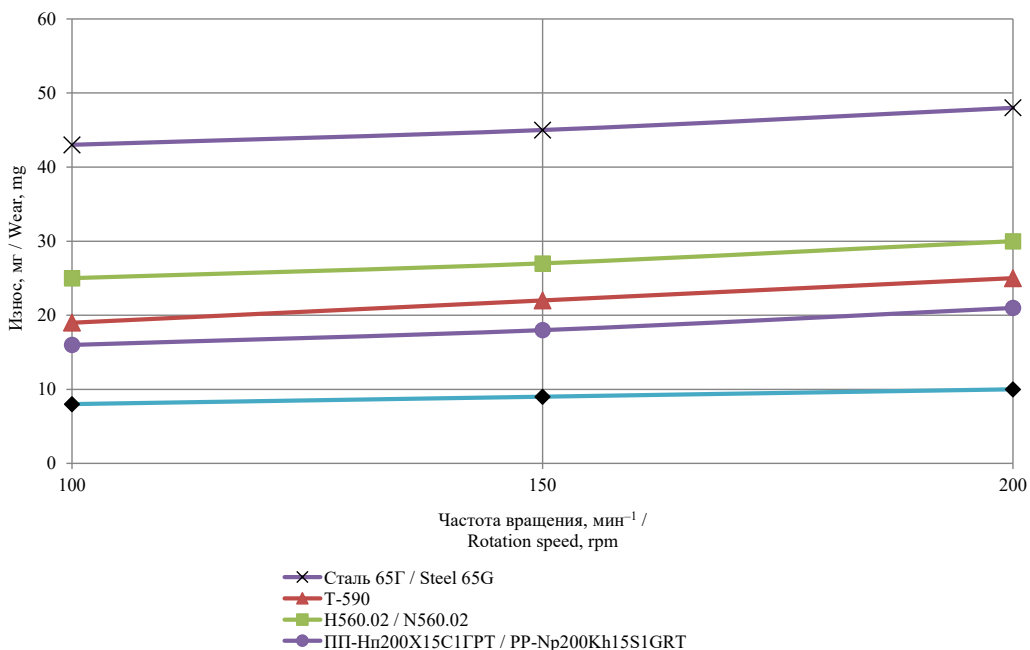
В результате производственных испытаний установлено, что два диска «ромашка» имели нарушение геометрической формы (загиб лепестка), на одном из них имелись трещины в месте крепления. Такие дефекты характерны в случае столкновения дисков с препятствиями в виде камней (валунов).

⁸ Грядунов С. С., Сиваков В. В. Изнашивание хромованадиевых сплавов при трении с ударом по абразивной поверхности // Научные труды VI Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (26–27 ноября 2019 г.). М.: Изд-во ФГБУН «Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН», 2019. С. 136–138. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41536385> (дата обращения: 12.07.2021).



Р и с. 4. Зависимость износа материалов от нагрузки и зернистости абразива: сплошная линия – фракция 0,3–0,5 мм; пунктирная – фракция 0,7–1,0 мм

F i g. 4. Dependence of the material wear on load and abrasive grit size: solid line – fraction 0.3–0.5 mm; dotted line – fraction 0.7–1.0 mm



Р и с. 5. Зависимость износа материалов от частоты вращения ролика (зернистость 0,3–0,5 мм, нагрузка 100 Н)

F i g. 5. Dependence of the material wear on the roller speed (grit 0.3–0.5 mm, load 100 N)

Средняя наработка на отказ дисков «ромашка» из стали 65Г 16–18 га, наплавленных порошковой проволокой Н560.02 31–33 га, электродами Т-590 32–35 га, порошковой проволокой ПП-Нп200Х15С1ГРТ 35–37 га, порошковой проволокой ПП-Нп280Х9Ф7СГ4 41–44 га. Диски с вырезами имели сопоставимые значения средней наработки с дисками «ромашка», а у дисков со сплошным лезвием наблюдался значительный разброс данных (40–48 га), видимо, вследствие забивания почвой и проявления эффекта протаскивания и потери оборотов.

Обсуждение и заключение

В результате проведенных лабораторных испытаний получен ряд износостойкости наплавов, который коррелирует с результатами полевых испытаний наплавленных дисков. Материалы исследовались на изнашивание в абразивной массе и по схеме диск-колодочка. Наиболее высокой износостойкостью обладает наплавка порошковой проволокой ПП-Нп280Х9Ф7СГ4, в материале которой реализуется эффект композиционного упрочнения. Такое упрочнение характерно для хромованадиевых сплавов при определенном

соотношении легирующих компонентов, что в результате обеспечивает высокую износостойкость материала. Применение указанных сплавов в качестве наплавочных материалов для повышения долговечности рабочих органов дисковых борон является перспективным.

В результате полевых испытаний дисков разных типов, наплавленных порошковой проволокой ПП-Нп280Х9Ф7СГ4, не удалось выявить зависимость их износостойкости от конструктивного исполнения вследствие значительного разброса значений наработок. Технология упрочнения дисков наплавкой порошковыми проволоками, в частности ПП-Нп280Х9Ф7СГ4, может быть успешно реализована в условиях ремонтных подразделений сельхозпредприятий. Для этого необходимо оснащение предприятий сварочным оборудованием для наплавки и заточки дисков. Сварочное оборудование может быть скомплектовано из отечественных источников питания и полуавтоматов. Оборудование для заточки наплавленных дисков может быть изготовлено в ремонтных мастерских сельхозпредприятий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шовкоплас А. В. Дисковые рабочие органы борон: технология изготовления и восстановления // Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6, № 1. С. 203–211. doi: <https://doi.org/10.12737/18743>
2. Ерохин М. Н., Новиков В. С., Петровский Д. И. Прогнозирование ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин // Сельский механизатор. 2015. № 11. С. 6–9. URL: <http://selmech.msk.ru/1115.html> (дата обращения: 12.07.2021).
3. Бернштейн Д. Б. Абразивное изнашивание лемешного лезвия и работоспособность плуга // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2002. № 6. С. 39–42. URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2002/200206.htm> (дата обращения: 12.07.2021).
4. Improving Wear Resistance of Agricultural Machine Components by Applying Hard-Alloy Thick-Layer Coatings Using Plasma Surfacing / S. A. Sidorov [et al.] // Metallurgist. 2017. Vol. 60. P. 1290–1294. doi: <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0443-7>
5. Wear and Breakage Resistance of Hard Alloy Coatings Strengthened with Tungsten Carbide / S. A. Sidorov [et al.] // Metallurgist. 2018. Vol. 61. P. 1023–1028. doi: <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0602-5>

6. Surfacing Methods for Increasing the Service Life of Rapidly Wearing Working Tools of Agricultural Machines / S. A. Sidorov [et al.] // Welding International. 2016. Vol. 30, Issue 10. P. 808–812. doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1148408>

7. Novel High-Alloy Boron-Containing Steels for Driven Elements of Tilling Machines / A. Yu. Izmaylov [et al.] // Metal Science and Heat Treatment. 2017. Vol. 59. P. 208–210. doi: <https://doi.org/10.1007/s11041-017-0130-0>

8. Study of the Structure of New Wear-Resistant Steels for Agricultural Machinery Components after Operational Tests / V. V. Ryabov [et al.] // Metallurgist. 2016. Vol. 60. P. 839–844. doi: <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0374-8>

9. Научные принципы повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающей техники / А. Ю. Измайлов [и др.] // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2012. № 3. С. 5–7. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17856370> (дата обращения: 12.07.2021).

10. Formation Features of Structure-Phase States of Cr–Nb–C–V Containing Coatings on Martensitic Steel / S. V. Konovalov [et al.] // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2016. Vol. 10, Issue 5. P. 1119–1124. doi: <https://doi.org/10.1134/S1027451016050098>

11. Application of Electric Arc Surfacing in the Manufacturing of Three-Dimensional Steel Products / S. S. Zhatkin [et al.] // Steel in Translation. 2020. Vol. 50, Issue 6. P. 381–386. doi: <https://doi.org/10.3103/S0967091220060121>

12. Упрочнение рабочих органов машин, работающих в абразиве / Н. Н. Литовченко [и др.] // Труды ГОСНИТИ. 2013. Т. 111, № 2. С. 86–88. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18956303> (дата обращения: 13.07.2021).

13. Сенчишин В. С., Пулька Ч. В. Современные методы наплавки рабочих органов почвообрабатывающих и уборочных сельскохозяйственных машин (обзор) // Автоматическая сварка. 2012. № 9. С. 48–54. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22774169> (дата обращения: 12.07.2021).

14. Сидоров С. А. Совершенствование конструкции и упрочнение дисковых рабочих органов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2003. № 8. С. 30–32. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23951983> (дата обращения: 12.07.2021).

15. Сидоров С. А. Методика расчета на износостойкость моно- и биметаллических почворезущих рабочих органов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2003. № 12. С. 35–39. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23951503> (дата обращения: 16.06.2021).

16. Санкина О. В. Повышение износостойкости орудий почвообрабатывающих машин // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33, № 8. С. 77–80. doi: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10817>

17. Characterization of Different Surface Layers Produced by Solid Boron-Nitro-Carburizing Thermochemical Treatment on AISI 1020 [Электронный ресурс] / A. Galiotto [et al.] // Materials Research. 2019. Vol. 22, Issue 5. doi: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0316>

18. Ерохин М. Н., Новиков В. С., Петровский Д. И. К вопросу об импортозамещении рабочих органов зарубежных почвообрабатывающих машин // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 121. С. 206–212. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25411026> (дата обращения: 12.07.2021).

19. Evaluation Method of Impact and Abrasive Steel Resistance / E. V. Bratkovsky [et al.] // Journal of Friction and Wear. 2019. Vol. 40, no. 2. P. 133–138. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068366619020041>

20. Modeling the Technological Process of Tillage / S. G. Mudarisov [et al.] // Soil and Tillage Research. 2019. Vol. 190. P. 70–77. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.004>

21. Установка для испытаний на абразивное изнашивание : патент 190350 Российская Федерация / Грядунюв С. С., Сиваков В. В., Нишаков С. И. № 2019108332 ; заявл. 21.03.2019 ; опубл. 28.06.2019, Бюл. № 19. 5 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40995563> (дата обращения: 12.07.2021).

22. Шитов А. Н. Влияние различных факторов на изнашивание рабочих органов почвообрабатывающих машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2002. № 7. С. 21–23.

23. ASTM G65-16e1, Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus [Электронный ресурс] // ASTM International. West Conshohocken, PA, 2016. doi: <https://doi.org/10.1520/G0065-16E01>

24. Method for Preparing an Efficient Master Alloy for Steel Boriding / Ya. P. Lobachevskii [et al.] // *Metallurgist*. 2019. Vol. 62. P. 986–993. doi: <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00731-z>
25. The Effect of Retained Austenite Stability on Impact-Abrasion Wear Resistance in Carbide-Free Bainitic Steels / L. Binggang [et al.] // *Wear*. 2019. Vol. 428–429. P. 127–136. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.02.032>
26. Шовкопляс А. В. Анализ причин изнашивания дисковых рабочих органов и моделей изменения свойств почвы под их воздействием // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2015. Т. 1, № 3. С. 87–94. URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2015/12/2015-№3-Шовкопляс.pdf> (дата обращения: 13.07.2021).
27. Статистический анализ износов дисковых орудий / А. М. Михальченко [и др.] // *Техника и оборудование для села*. 2016. № 7. С. 42–45. URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/download/57-arkhiv-zhurnala-za-2016/432-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-7-229-iyul-2016-g> (дата обращения: 06.11.2020).

Поступила 29.07.2021; одобрена после рецензирования 25.08.2021; принята к публикации 03.09.2021

Об авторах:

Грядунев Сергей Семенович, доцент кафедры триботехнического материаловедения и технологий материалов Брянского государственного технического университета (241035, Российская Федерация, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, д. 7), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1141-9969>, Researcher ID: [AAI-2666-2020](https://orcid.org/AAI-2666-2020), grydunowcc@mail.ru

Сиваков Владимир Викторович, доцент кафедры транспортно-технологических машин и сервиса Брянского государственного инженерно-технологического университета (241037, Российская Федерация, г. Брянск, пр-т Станке Димитрова, д. 3), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0175-9030>, Researcher ID: [R-7264-2019](https://orcid.org/R-7264-2019), sv@bgitu.ru

Заявленный вклад авторов:

С. С. Грядунев – подготовка и анализ литературных данных, разработка метода испытаний, проведение испытаний, обработка материалов.

В. В. Сиваков – подготовка и анализ литературных данных, доработка текста, проведение испытаний, обработка материалов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Shovkoplyas A.V. Working Bodies of Disk Harrows: Technology of Production and Restoration. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal. 2016; 6(1):203-211. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.12737/18743>
2. Yerokhin M.N., Novikov V.S., Petrovskiy D.I. Predicting Resource of Tillers Working Organs. *Selskiy Mekhanizator* = Rural Mechanic. 2015; (11):6-9. Available at: <http://selmech.msk.ru/1115.html> (accessed 12.07.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
3. Bernshteyn D.B. [Plough Blade Abrasion and Performance]. *Traktory i selskohozyaystvennyie mashiny* = Tractors and Agricultural Machines. 2002; (6):39-42. Available at: <http://www.avtomash.ru/gur/2002/200206.htm> (accessed 12.07.2021). (In Russ.)
4. Sidorov S.A., Khoroshenkov V.K., Lobachevskii Ya.P., Akhmedova T.Sh. Improving Wear Resistance of Agricultural Machine Components by Applying Hard-Alloy Thick-Layer Coatings Using Plasma Surfacing. *Metallurgist*. 2017; 60:1290-1294. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0443-7>
5. Sidorov S.A., Lobachevskii Ya.P., Khoroshenkov V.K., et al. Wear and Breakage Resistance of Hard Alloy Coatings Strengthened with Tungsten Carbide. *Metallurgist*. 2018; 61:1023-1028. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0602-5>

6. Sidorov S.A., Mironov D.A., Khoroshenkov V.K., Khlusova E.I. Surfacing Methods for Increasing the Service Life of Rapidly Wearing Working Tools of Agricultural Machines. *Welding International*. 2016; 30(10):808-812. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1148408>
7. Izmaylov A.Yu., Sidorov S.A., Khoroshenkov V.K., et al. Novel High-Alloy Boron-Containing Steels for Driven Elements of Tilling Machines. *Metal Science and Heat Treatment*. 2017; 59:208-210. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/s11041-017-0130-0>
8. Ryabov V.V., Motovilina G.D., Khlusova E.I., et al. Study of the Structure of New Wear-Resistant Steels for Agricultural Machinery Components after Operational Tests. *Metallurgist*. 2016; 60:839-844. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0374-8>
9. Izmailov A.Yu., Sidorov S.A., Lobachevsky Ya.P., et al. Scientific Principles of Raising Wear Resistance in Working Organs of Soil Tillage Machinery. *Vestnik Rossiyskoy akademii selskokhozyaystvennykh nauk* = Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 2012; (3):5-7. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17856370> (accessed 12.07.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
10. Konovalov S.V., Kormyshev V.E., Gromov V.E., et al. Formation Features of Structure-Phase States of Cr–Nb–C–V Containing Coatings on Martensitic Steel. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2016; 10(5):1119-1124. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1134/S1027451016050098>
11. Zhatkin S.S., Nikitin K.V., Deev V.B., et al. Application of Electric Arc Surfacing in the Manufacturing of Three-Dimensional Steel Products. *Steel in Translation*. 2020; 50(6):381-386. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3103/S0967091220060121>
12. Litovchenko N.N., Titov N.V., Kolomejchenko A.V., et al. Strengthening of Working Machines Working in Abrasive. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2013; 111(2):86-88. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18956303> (accessed 13.07.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
13. Senchishin V.S., Pulka Ch.V. [Modern Methods of Surfacing the Working Elements of Tillage and Harvesting Agricultural Machines (Review)]. *Avtomaticeskaya svarka* = Automatic Welding. 2012; (9):48-54. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22774169> (accessed 12.07.2021). (In Russ.)
14. Sidorov S.A. [Improving the Design and Hardening of Disc Working Tools]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva* = Mechanization and Electrification of Agriculture. 2003; (8):30-32. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23951983> (accessed 12.07.2021). (In Russ.)
15. Sidorov S.A. [Calculation Methodology for Wear Resistance of Mono- And Bimetallic Tillage Tools]. *Traktory i selskokozyaystvennyye mashiny* = Tractors and Agricultural Machines. 2003; (12):35-39. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23951503> (accessed 16.06.2021). (In Russ.)
16. Sankina O.V. Improving the Wear Resistance of Tillage Machines Details. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AIC. 2019; 33(8):77-80. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10817>
17. Galiotto A., Rosso A.R., dos Santos de Almeida E.A., et al. Characterization of Different Surface Layers Produced by Solid Boron-Nitro-Carburizing Thermochemical Treatment on AISI 1020. *Materials Research*. 2019; 22(5). (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0316>
18. Yerokhin M.N., Novikov V.S., Petrovskiy D.I. To the Question about the Substitution of the Working Bodies of Tillage Machines Overseas. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2015; 121:206-212. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25411026> (accessed 12.07.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
19. Bratkovskiy E.V., Shapovalov A.N., Dema R.R., et al. Evaluation Method of Impact and Abrasive Steel Resistance. *Journal of Friction and Wear*. 2019; 40(2):133-138. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3103/S1068366619020041>
20. Mudarisov S.G., Gabitov I.I., Lobachevsky Y.P., et al. Modeling the Technological Process of Tillage. *Soil and Tillage Research*. 2019; 190:70-77. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.004>
21. Gryadunov S.S., Sivakov V.V., Nishchakov S.I. [Abrasive Wear Testing Machine]. Patent 190,350 Russian Federation. 2019 June 28. 5 p. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40995563> (accessed 12.07.2021). (In Russ.)
22. Shitov A.N. [Influence of Various Factors on the Wear of Working Tools of Tillage Machines]. *Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya* = Repair, Reconditioning, Modernization. 2002; (7):21-23. (In Russ.)

23. ASTM G65-16e1, Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus [Electronic resource]. In: ASTM International. West Conshohocken, PA; 2016. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1520/G0065-16E01>

24. Lobachevskii Ya.P., Aulov V.F., Ishkov A.V., et al. Method for Preparing an Efficient Master Alloy for Steel Boriding. *Metallurgist*. 2019; 62:986-993. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00731-z>

25. Binggang L., Wei L., Xianwen L., et al. The Effect of Retained Austenite Stability on Impact-Abrasion Wear Resistance in Carbide-Free Bainitic Steels. *Wear*. 2019; 428-429:127-136. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.02.032>

26. Shovkoplyas A.V. Analysis of Reasons of Wear of Disk Working Bodies and Models of Change of Properties of Soil under Their Action. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii = Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2015; 1(3):87-94. Available at: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2015/12/2015-№3-Шовкопляс.pdf> (accessed 13.07.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

27. Mikhail'chenkov A.M., Tyureva A.A., Filin Yu.I., Sinyaya N.V. Statistical Analysis of Disc Wears on Disk Tools. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area*. 2016; (7):42-45. Available at: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/download/57-arkhiv-zhurnala-za-2016/432-tehnika-i-oborudovanie-dlya-sela-7-229-iyul-2016-g> (accessed 06.11.2020). (In Russ., abstract in Eng.)

Submitted 29.07.2021; approved after reviewing 25.08.2021; accepted for publication 03.09.2021

About the authors:

Sergey S. Gryadunov, Associate Professor of the Chair of Tribotechnical Materials Science and Technology of Materials, Bryansk State Technical University (7 Bulvar 50-letiya Oktyabrya, 241035 Bryansk, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1141-9969>, Researcher ID: [AAI-2666-2020](https://orcid.org/AAI-2666-2020), grydunowcc@mail.ru

Vladimir V. Sivakov, Associate Professor of the Chair of Transport Technological Machines and Service, Bryansk State Technological University of Engineering (3 Stanke Dimitrov Prospect, Bryansk 241037, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0175-9030>, Researcher ID: [R-7264-2019](https://orcid.org/R-7264-2019), sv@bgitu.ru

Contribution of the authors:

S. S. Gryadunov – preparing and analyzing literature data, developing the test method, conducting tests, processing of materials.

V. V. Sivakov – preparing and analyzing literary data, finalizing the text, conducting tests, processing of materials.

All authors have read and approved the final manuscript.



Повышение пропускной способности шланга с электронагревательной спиралью для подачи загущенного консерванта на распыление

А. И. Петрашев*, Л. Г. Князева

Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве (г. Тамбов, Российская Федерация)

* vitin-10.pet@mail.ru

Аннотация

Введение. Защита от коррозии рабочих органов сельскохозяйственной техники выполняется путем пневматического нанесения загущенных консервантов с нагревом. Для этого внутрь шланга подачи консерванта на распыление вводят проволочную спираль и подключают ее к источнику тока. Известно, что толщина проволоки и шаг навивки спирали влияют на гидравлическое сопротивление течению жидкости. Однако не установлено, как диаметр спиральной вставки и ее нагрев влияют на пропускную способность канала гибкого шланга. Цель исследования – повышение пропускной способности гибкого шланга с электронагревательной спиралью. Для этого нужно определить ее геометрические параметры, минимизирующие гидравлическое сопротивление течению загущенного консерванта и уменьшающие затраты энергии на нагрев материала в шланге.

Материалы и методы. Предложено исследовать две электронагревательные спирали одной длины и различного диаметра, выполненные из одинаковых отрезков стальной сварочной проволоки. Разработан стенд для исследования влияния параметров спирали на гидравлическое сопротивление шланга. На нем определялись потери давления в шлангах со спиралью и в гладком шланге при течении по ним масла моторного отработанного и загущенного консерванта. Оценивалась пропускная способность шланга с холодной и нагретой спиралью.

Результаты исследования. Обоснован способ нагрева консерванта в пристенном слое шланга. При этом его пропускная способность повышается в полтора раза с меньшими затратами энергии (в 2,4 раза), чем при нагреве консерванта в центральной части шланга. При ламинарном режиме течения потери давления в шланге в 2 раза ниже от спирали, равной 0,85 диаметра канала шланга, чем от спирали, равной 0,67 диаметра канала.

Обсуждение и заключение. В результате выполненных исследований определен рациональный способ размещения электрической спирали возле стенки канала обогреваемого шланга. При пониженной температуре воздуха снижение вязкости загущенного консерванта за счет нагрева в шланге способствует уменьшению потерь давления до 50 % и увеличению его пропускной способности в 1,4–2,0 раза. Использование нагревательной спирали в шланге с загущенным консервантом позволит минимизировать потребление энергии при консервации техники на открытых площадках хранения.

Ключевые слова: обогреваемый шланг, пропускная способность, расход, гидравлическое сопротивление, спиральная вставка, загущенный консервант, вязкость

© Петрашев А. И., Князева Л. Г., 2021



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

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и высказанные предложения по их совершенствованию способствовали значительному повышению качества настоящей статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Петрашев А. И., Князева Л. Г. Повышение пропускной способности шланга с электронагревательной спиралью для подачи загущенного консерванта на распыление // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 4. С. 559–576. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.559-576>

Original article

Increasing the Flow Capacity of Hoses with Electrical-Heater Coils to Supply Thickened Preservatives for Spraying

A. I. Petrashev*, L. G. Knyazeva

All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture (Tambov, Russian Federation)

* vitin-10.pet@mail.ru

Abstract

Introduction. Anticorrosion protection of agricultural machinery working elements is provided through using pneumatic application of thickened preservatives with heating. For this purpose, a wire coil is inserted inside the preservative-supply hose and connected to a current source. It is known that the wire thickness and the coil pitch affect the hydraulic resistance to fluid flow. However, it has not been established how the diameter of the coil insert and its heating affect the flow capacity of the flexible hose channel. The purpose of the research is to increase the capacity of a flexible hose with an electrical-heater coil. For this purpose, it is necessary to determine its geometric parameters minimizing the hydraulic resistance to the thickened preservative flow and reducing the energy consumption for heating the material in the hose.

Materials and Methods. It is proposed to investigate two electrical-heater coils of the same length, but of different diameter, made of steel welding wire pieces of equal length. There was developed a stand to study the influence of the inserted coil parameters on the hose hydraulic resistance. The stand was used to determine pressure losses in hoses with coils and in smooth hoses when used engine oil and thickened preservative flow through them. The flow capacity of the hose with cold and heated coils was estimated.

Results. The method of heating the preservative in the hose wall layer is justified. At the same time, its flow capacity increases one and a half times with less energy consumption (2.4 times) than when heating the preservative in the central part of the hose. Under laminar flow mode, the pressure loss in the hose is 2 times lower when the coil is equal to 0.85 of the hose channel diameter than when the coil is equal to 0.67 of the channel diameter.

Discussion and Conclusion. The research found the rational way of placing the electrical coil near the heated hose channel wall. At low air temperature, the reduction of the thickened preservative viscosity by heating in the hose helps to decrease the pressure loss up to 50% and increase its flow capacity by 1.4–2.0 times. The use of a electrical-heater coil in the hose with thickened preservative will minimize energy consumption when preserving equipment on open storage sites.

Keywords: heated hose, throughput, flow rate, hydraulic resistance, coil insert, thickened preservative, viscosity

Acknowledgments: The authors express their deep gratitude to the reviewers, whose critical assessment of the presented materials and suggestions for improving contributed to a significant improvement in the quality of this article.

The authors declare no conflict of interest.

For citation: Petrashev A.I., Knyazeva L.G. Increasing the Flow Capacity of Hoses with Electrical-Heater Coils to Supply Thickened Preservatives for Spraying. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(4):559-576. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.559-576>

Введение

Рабочие органы плугов, культиваторов, дисковых борон, сеялок и другой сельскохозяйственной техники при постановке в межсезонный период на длительное хранение необходимо покрывать консервационным материалом для защиты от коррозии. Под открытым небом защитная способность покрытий из отработанных моторных масел составляет 25–42 % [1; 2]. Введение в отработанные масла 12–15 % загущающих присадок повышает их атмосферостойкость и защитную способность до 97 % [3; 4]. При этом потери металла с поверхности рабочих органов снижаются в 20–25 раз [5].

Вязкость консерванта, содержащего отработанное масло и загущающую присадку, с понижением температуры значительно возрастает [6; 7]. В распылительном оборудовании из-за увеличения гидравлического сопротивления шланга уменьшаются его пропускная способность, расход и, как следствие, производительность нанесения вязкого консерванта. Разбавление консерванта бензином или дизельным топливом для понижения вязкости отрицательно влияет на защитные свойства наносимых покрытий, снижая срок защиты [8].

Чтобы обеспечить достаточную производительность нанесения вязкого консерванта в прохладную погоду

осеннего сезона, шланг подачи целесообразно выполнить обогреваемым для его разжижения в процессе нагнетания из бака в пистолет-распылитель. Для этого внутрь шланга вводят нагревательную спиральную вставку и подключают ее к источнику тока [9; 10].

Цель исследования – повышение пропускной способности гибкого шланга с электронагревательной спиралью за счет определения ее геометрических параметров, минимизирующих гидравлическое сопротивление течению загущенного консерванта и сокращающих затраты энергии на нагрев материала в шланге.

Обзор литературы

Максимальный уровень расхода консервантов, наносимых пневматическими пистолетами-распылителями, зависит от конструкционного исполнения распылительной головки и составляет порядка 6–10 г/с [11; 12]. Дисперсность распыления консерванта влияет на сплошность, равномерность и защитные свойства нанесенного покрытия. Она зависит как от давления распыливаемого воздуха, так и от вязкости наносимого консерванта. В работе А. М. Губашевой указан допустимый предел условной вязкости консерванта, равный 73 секундам по вискозиметру ВЗ-4¹. При этой вязкости допускается распыление консерванта с получением

¹ Губашева А. М. Разработка технологии консервации тукокоробасывающих машин с обсованием параметров агрегата для нанесения защитных составов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Мичуринск, 2018. 23 с. URL: <http://www.mgau.ru/upload/iblock/56c/56cb4f83eef7a6261f38f49643fa6def.pdf> (дата обращения: 06.11.2021).

покрытия удовлетворительного качества. В ГОСТе приведена номограмма зависимости времени истечения (ζ) краски от ее кинематической вязкости ($\text{мм}^2/\text{с}$)². В соответствии с этой номограммой времени истечения 73 с по ВЗ-4 нужна кинематическая вязкость краски, равная 300 $\text{мм}^2/\text{с}$.

Если при нанесении в условиях пониженной температуры вязкость краски или консерванта превысит величину верхнего предела вязкости, то в работу необходимо включить нагревательную спираль в шланге. Нагрев консерванта в шланге обеспечит его разжижение и повысит расход, что позволит достаточно производительно и качественно наносить защитные покрытия при осенней консервации сельскохозяйственной техники.

Однако нагревательная спиральная вставка, находящаяся внутри шланга, уменьшает его проходное сечение, искажает структуру потока консерванта, влияет на гидравлическое сопротивление и пропускную способность шланга. Это подтверждают сравнительные гидравлические исследования гладких и гофрированных металлорукавов диаметром 8–25 мм, показавшие почти двухкратный рост потерь давления в гофрированных металлорукавах³. В опытах с трубой диаметром 12 мм, оснащенной спиральной вставкой шагом 50 мм и толщиной 0,85 мм, выявлено уменьшение расхода жидкости на треть по сравнению с гладкой трубой [13]. В другой работе приведены результаты экспериментального исследования коэффициента гидравлического сопротивления при течении теплоносителя в трубах со спиралью из проволоки разного шага [14]. При размещении спиральных вставок

в гладких трубах отмечается увеличение коэффициента гидравлического сопротивления от 5 до 40 % в ламинарной области течения теплоносителя. После введения в поток теплоносителя микропузырьков газа установлено вращение потока в пристенном слое при числе $Re < 500$ [15]. Эти вращения и уменьшение гидравлического радиуса явились причинами роста коэффициента гидравлического сопротивления труб со спиральными вставками.

Ю. Г. Назмеев и И. А. Конохина исследовали пропускную способность труб с однозаходной винтовой накаткой в ламинарной области течения теплоносителя и установили факт прироста коэффициента гидравлического сопротивления от 30 до 200 % по отношению к коэффициенту гидравлического сопротивления гладкой трубы [16]. При этом максимальное увеличение гидравлического сопротивления характерно для трубы с минимальным шагом винтовой накатки и максимальной высотой выступа.

В другой работе представлена зависимость для определения коэффициента гидравлического сопротивления при течении воды в трубах с проволочными вставками:

$$f = 62,094 \cdot Re^{-0,449} \cdot \left(\frac{d_T}{s}\right)^{0,818} \cdot \left(\frac{e_{\Pi}}{d_T}\right)^{0,406}, \quad (1)$$

где d_T – диаметр трубы, мм; s – шаг спирали, мм; e_{Π} – толщина проволоки, мм [17].

Зависимость (1) указывает на рост гидравлического сопротивления трубы при увеличении толщины проволоки e_{Π} и уменьшении шага спирали s проволочной вставки. Эта зависимость соответствует результатам исследований

² ГОСТ 8420-74. Материалы лакокрасочные. Методы определения условной вязкости. М., 2004. 7 с. URL: <http://gostbank.metaltorg.ru/data/11470.pdf> (дата обращения: 06.11.2021).

³ RGTA-GROUP. Гидравлическое сопротивление металлорукавов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rgta.ru/production> (дата обращения: 06.11.2021).

труб с винтовой нарезкой различной геометрической формы [18; 19].

Следует отметить, что в рассмотренных работах изучалось сопротивление течению маловязких теплоносителей при размещении проволочных спиралей вплотную к стенке жесткой трубы. Анализ показал, что практически не исследована связь пропускной способности гибкого шланга с диаметром спиральной вставки и ее смещением относительно оси шланга, с вязкостью протекающего консерванта и его нагревом.

Материалы и методы

Экспериментальные гидравлические исследования проводили на трех шлангах типоразмера МБС12х20-1,6 МПа. Длина каждого шланга $L_{ш} = 10$ м, внутренний диаметр $d_{ш} = 12$ мм. Две электронагревательные спирали выполнены из стальной сварочной проволоки СВ-08Г2С диаметром $d_{п} = 1,2$ мм и удельным электрическим сопротивлением 0,306 Ом/м (20 °С). Отрезки проволоки, используемые для изготовления спиралей, имели одинаковую длину $L_{п} = 17,0$ м и электрическое сопротивление 5,2 Ом, что соответствовало нагрузке $N_c = 250$ Вт при питании от понижающего трансформатора с напряжением 36 В.

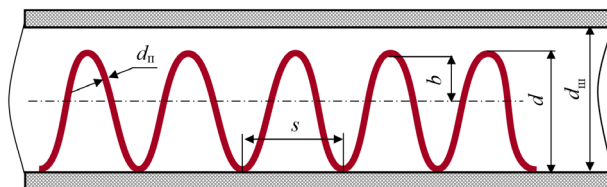
Обе нагревательные спирали, обозначенные как А и Б, изготовлены длиной по 10 м, соответствующей размеру шланга. Они различались диаметром d и шагом s спирали (рис. 1). При размещении в гибком шланге стальные спирали соприкасались с его поверхностью. Минимальное расстояние от витков спирали до оси шланга $b = d - d_{п} - 0,5d_{ш}$.

Геометрические параметры спирали А: диаметр $d_a = 8,0$ мм; шаг $s_a = 15,6$ мм; расстояние $b_a = 0,8$ мм; отношение к диаметру канала шланга $d_a / d_{ш} = 0,67$. Геометрические параметры спирали Б: диаметр $d_b = 10,2$ мм; шаг $s_b = 19,8$ мм; расстояние $b_b = 3,0$ мм; отношение к диаметру канала шланга $d_b / d_{ш} = 0,85$.

Один шланг оснастили спиралью А (шланг А), второй – спиралью Б (шланг Б), третий не имел спирали (гладкий шланг). Влияние параметров спирали на гидравлическое сопротивление шланга было исследовано на пневмо-гидравлическом стенде (рис. 2).

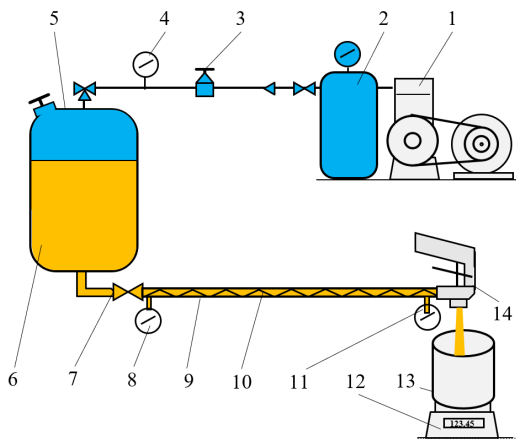
В горизонтальной плоскости размещали шланг 9 и подсоединенные к нему лабораторные манометры 8 и 11. Консервант 6 заливали в бак 5, сжатый воздух подавали от ресивера 2 работающего компрессора 1. Давление воздуха в баке 5 устанавливали посредством регулятора давления 3 и манометра 4. Под напором воздуха консервант 6 из бака 5 протекал по шлангу 9 и через сопло пистолета-распылителя 14 сливался в приемную емкость 13. Повышая давление воздуха, увеличивали давление выдачи p и расход консерванта.

Давление p_1 консерванта на входе в шланг и давление p_2 на выходе из него измеряли соответственно манометрами 8 и 11 с точностью 0,5 кПа, время t истечения – секундомером. Слитый в приемную емкость консервант взвешивали на электронных весах 12 для определения его массы m в граммах. Массовый расход консерванта $q = m / t$. Потери давления в шланге $\Delta p = p_1 - p_2$.



Р и с. 1. Электронагревательная спираль в шланге

F i g. 1. Electrical-heater coil in the hose



Р и с. 2. Схема стенда для исследования гидравлического сопротивления шланга:
 1 – компрессор; 2 – ресивер; 3 – регулятор давления; 4 – манометр пневматический;
 5 – бак; 6 – консервант; 7 – кран; 8, 11 – манометр жидкостный; 9 – шланг;
 10 – исследуемая спираль; 12 – весы; 13 – емкость; 14 – пистолет-распылитель

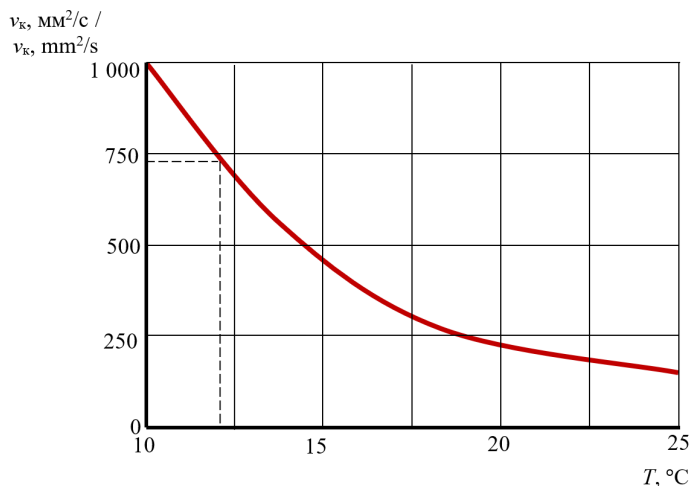
F i g. 2. Scheme of the stand for the study of the hydraulic resistance of the hose:
 1 – compressor; 2 – receiver; 3 – pressure regulator; 4 – pneumatic pressure gauge;
 5 – tank; 6 – preservative; 7 – crane; 8, 11 – liquid manometer; 9 – hose; 10 – investigated coil;
 12 – scales; 13 – capacity; 14 – spray gun

Исследовали потери давления в шлангах при течении ньютоновской (отработанного моторного масла) и неньютоновской жидкости (загущенного консерванта). Загущенный консервант получали нагревом и смешиванием масла моторного отработанного с 10 % кубовых аминов, содержащих алифатические амины (ингибитор коррозии) и парафины (загуститель масла). Гидравлические исследования шлангов проводили в два этапа.

На первом этапе опыты выполняли при температуре 20 °С, исследовали потери давления в шлангах с холодными спиральями и в гладком шланге. Выявляли спираль, оказывающую меньшее гидравлическое сопротивление течению отработанного масла и загущенного консерванта. Кинематическую вязкость исследуемых жидкостей измеряли посредством вискозиметра Smart L. При 20 °С кинематическая вязкость отработанного масла $\nu_m = 122 \text{ мм}^2/\text{с}$. Для загущенного консерванта определяли эффективную

кинематическую вязкость, зависимость которой от температуры показана на рисунке 3. При 20 °С эффективная кинематическая вязкость загущенного консерванта $\nu_k = 236 \text{ мм}^2/\text{с}$.

На втором этапе опыты проводили при температуре 12 °С с загущенным консервантом, эффективная кинематическая вязкость которого 725 мм²/с значительно превышала допустимый предел вязкости по распылению 300 мм²/с. Исследовали потери давления в шланге со спиралью, имеющей меньшее гидравлическое сопротивление. Шланг заполняли загущенным консервантом, выдерживали 1,5 ч для выравнивания температур консерванта и воздуха. Включали нагрев спирали в шланге и спустя 0,2 ч подавали сжатый воздух в бак. Выпуская консервант из бака сквозь обогреваемый шланг, определяли потери давления. При этой же температуре исследовали потери давления холодного консерванта в гладком шланге.



Р и с. 3. Зависимость эффективной кинематической вязкости загущенного консерванта v_k от температуры T (вискозиметр Smart L, шаг 4 с)

F i g. 3. Dependence of the effective kinematic viscosity of the thickened preservative v_k from temperature T (Smart L viscometer, step 4 s)

Во время опытов для различных значений массового расхода исследуемых жидкостей q определяли значения потерь давления в гладком шланге Δp_o , в шланге А Δp_a , в шланге Б Δp_b . Рассчитывали изменение потерь давления δp (%) в шланге со спиралью по отношению к потерям давления в гладком шланге:

$$\delta p = \frac{\Delta p - \Delta p_o}{\Delta p_o} \cdot 100 \% \quad (2)$$

Результаты исследования

Электронагревательная спиральная вставка может быть выполнена малым диаметром для нагрева консерванта в центральной части потока или большим диаметром для нагрева консерванта в пристенной области. Разрабатывая обогреваемый шланг для консервационного оборудования, важно из двух вариантов попутного нагрева консерванта выбрать тот, который при минимуме энергозатрат обеспечит

необходимую пропускную способность шланга. При подаче напряжения на спираль в первую очередь будет нагреваться и разжижаться слой консерванта, соприкасающийся с ним. Слой консерванта, удаленный от спирали, останется холодным и вязким. Поэтому движущийся по обогреваемому шлангу поток консерванта может иметь разную температуру в слоях поперечного сечения и его допустимо считать двухслойным.

Рассмотрим схему движения двухслойного потока консерванта сквозь шланг, в которой не учитывается деформация шланга, гидравлическое сопротивление нагревательной спирали и потери тепла в атмосферу. Примем, что загущенный консервант относится к ньютоновской жидкости, его движение сквозь шланг является ламинарным и равномерным, при котором действует параболический закон распределения скоростей. На рисунке 4 приведен профиль скоростей потока и обозначены следующие показатели: u_{\max} – осевая скорость потока; h_c – динамическая

вязкость консерванта в пристенной области; $\eta_{ц}$ – динамическая вязкость консерванта в центральной части; r – радиус центральной части потока; R – радиус проходного канала в шланге.

Пропускная способность шланга характеризуется расходом консерванта и зависит от давления выдачи. ГОСТ 24856-2014 определяет пропускную способность трубопроводной арматуры как величину⁴, численно равную расходу рабочей среды, протекающей через арматуру при перепаде давлений 1 кгс/см².

Для течения сквозь шланг двухслойного потока консерванта, без учета гидравлического сопротивления спирали, в одной из наших работ определены потери давления

$$\Delta p = \frac{8QL_{ш}\eta_{ц}\eta_{с}}{\pi [R^4\eta_{ц} - r^4(\eta_{ц} - \eta_{с})]}, \quad (3)$$

где Q – объемный расход консерванта, м³/с; Δp – потери давления в шланге, Па; R и $L_{ш}$ – радиус и длина канала в шланге, м; r – радиус центральной

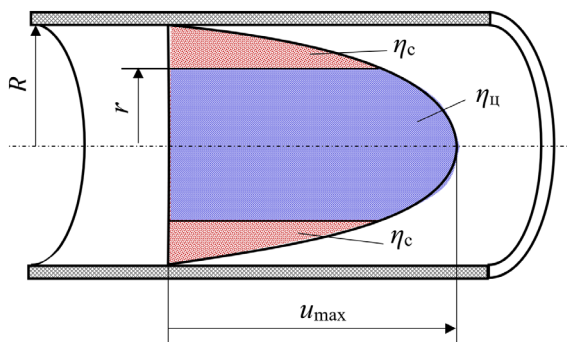
части потока, м; $\eta_{ц}$ и $\eta_{с}$ – динамическая вязкость слоев консерванта в центральной части и в пристенной области, Па·с.

С одной стороны, потери давления Δp в шланге напрямую зависят от расхода Q консерванта, а с другой – на расход консерванта влияют потери давления⁵. Для дальнейшего анализа течения двухслойного потока, по примеру ГОСТа⁶, из формулы (3) определим пропускную способность шланга как отношение расхода Q консерванта к потерям давления Δp :

$$K = \frac{Q}{\Delta p} = \frac{\pi [R^4\eta_{ц} - r^4(\eta_{ц} - \eta_{с})]}{8L_{ш}\eta_{ц}\eta_{с}}, \quad (4)$$

где K – пропускная способность шланга, м³/(Па·с).

Обозначим коэффициентом разделения потока в шланге κ отношение радиуса центральной части потока к радиусу канала ($\kappa = r/R$), а коэффициентом понижения вязкости μ – отношение вязкостей разогретого η_p и холодного η слоев консерванта:



Р и с. 4. Профиль скоростей и распределение вязкости двухслойного потока консерванта в сечении F i г. 4. Velocity profile and viscosity distribution of the two-layer flow of the preservative in the section

⁴ ГОСТ 24856-2014. Арматура трубопроводная. Термины и определения. М. : Стандартинформ, 2015. 73 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293767/4293767362.pdf> (дата обращения: 06.11.2021).

⁵ Петрашев А. И. Совершенствование технологических процессов и ресурсосберегающих средств консервации сельскохозяйственной техники при хранении : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Саратов, 2007. 48 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15850201> (дата обращения: 06.11.2021).

⁶ ГОСТ 24856-2014.

$$\mu = \frac{\eta_p}{\eta}. \quad (5)$$

В рамках рассматриваемой схемы потока значения указанных коэффициентов изменяются в интервалах

$$1,0 \geq \kappa \geq 0; 1,0 \geq \mu \geq 0.$$

В случае движения сквозь шланг холодного консерванта, когда вязкость одинакова по всему сечению шланга ($\eta_{ц} = \eta_c = \eta$), пропускную способность (ПС) шланга K_x определим из уравнения (4):

$$K_x = \frac{\pi R^4}{8L_{ш}\eta}. \quad (6)$$

Рассмотрим первый способ нагрева, при котором в шланге греется и разжижается пристенный слой консерванта толщиной $R - r$. Вязкость разогретого консерванта в пристенном слое $\eta_c = \eta_p = \eta\mu$, а холодного консерванта в центральной части потока $\eta_{ц} = \eta$.

Из уравнения (4) найдем ПС шланга K_c при течении консерванта с разогретым пристенным слоем:

$$K_c = \frac{\pi R^4 [\mu^{-1} - \kappa^4 (\mu^{-1} - 1)]}{8L_{ш}\eta}. \quad (7)$$

Из выражений (7) и (6) определим уровень роста ПС шланга K_c / K_x при течении потока консерванта с разогретым пристенным слоем:

$$\frac{K_c}{K_x} = \mu^{-1} - \kappa^4 (\mu^{-1} - 1). \quad (8)$$

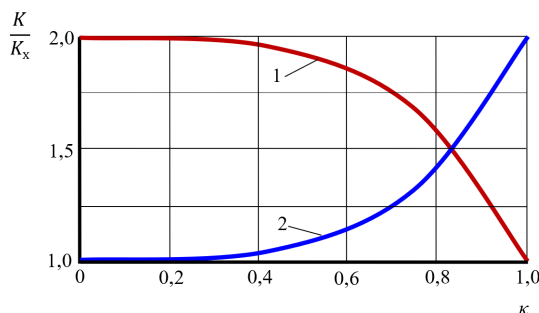
Рассмотрим второй способ нагрева, при котором греется и разжижается центральная часть потока. Вязкость разогретого консерванта в центральной части $\eta_c = \eta_p = \eta\mu$, а холодного в пристенном слое $\eta_c = \eta$. Из уравнения (4) найдем ПС шланга $K_{ц}$ при течении консерванта с разогретой центральной частью:

$$K_{ц} = \frac{\pi R^4 [1 + \kappa^4 (\mu^{-1} - 1)]}{8L_{ш}\eta}. \quad (9)$$

Уровень роста ПС шланга $K_{ц} / K_x$ при течении потока консерванта с разогретой центральной частью находим из выражений (9) и (6):

$$\frac{K_{ц}}{K_x} = 1 + \kappa^4 (\mu^{-1} - 1). \quad (10)$$

Если за счет разогрева вязкость консерванта снизится в 2 раза (коэффициент понижения вязкости $\mu = 0,5$), то графики, отображающие зависимости (8) и (10), будут иметь вид, показанный на рисунке 5.



Р и с. 5. Уровень роста ПС шланга K / K_x при течении консерванта двухслойным потоком в зависимости от коэффициента разделения κ : 1 – с нагретым пристенным слоем; 2 – с нагретой центральной частью

Fig. 5. Level of growth the throughput of the hose K / K_x during the flow of the preservative in a two-layer, depending on the separation factor κ : 1 – with a heated wall layer; 2 – with a heated central part

Графики 1 и 2 симметричны относительно ординаты, проходящей через точку их пересечения $K / K_x = 1,5$. Определим эквивалентный коэффициент κ_3 разделения двухслойного потока, при котором значения ПС шланга будут равными ($K_{ц} = K_c$) в обоих вариантах разогрева консерванта. Для этого приравняем выражения (8) и (10), а после разделения переменных получим

$$\kappa_3^4 = 0,5, \quad \kappa_3 = r_3 / R = 0,84,$$

где r_3 – эквивалентный радиус потока, м.

Расчеты показывают, что при разделении двухслойного потока по эквивалентному радиусу ($r_3 = 0,84R$) ПС шланга одинакова ($K_c = K_{ц} = K_3$) в обоих вариантах нагрева консерванта. Если при течении по шлангу вязкость нагреваемого слоя консерванта повысить в 2 раза (коэффициент $\mu = 0,5$), то ПС шланга возрастет в 1,5 раза ($K_3 = 1,5K_x$).

Установим, как меняется ПС шланга K_3 / K_x при прокачке консерванта двухслойным потоком в зависимости от коэффициента понижения вязкости μ . Граничные условия следующие: величина эквивалентного радиуса разделения потока $r_3 = 0,84R$, коэффициент понижения вязкости в диапазоне $1,0 \geq \mu > 0,1$. Под-

ставив эквивалентный коэффициент разделения потока ($\kappa_3 = 0,84$) в формулу (8) или (10), определим уровень роста эквивалентной ПС шланга при нагреве консерванта в двухслойном потоке:

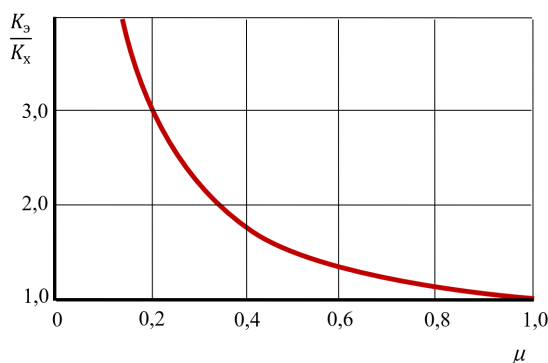
$$\frac{K_3}{K_x} = 0,5(\mu^{-1} + 1). \quad (11)$$

На рисунке 6 представлен график, иллюстрирующий формулу (11).

Из графика видно, что в случае течения консерванта двухслойным потоком с разогретой центральной частью (равно как и с разогретым пристенным слоем) при понижении коэффициента вязкости μ от 1,0 до 0,2 (в 5 раз) эквивалентная ПС шланга K_3 / K_x возрастет в 3 раза по сравнению с течением холодного консерванта.

Сравним затраты тепловой энергии на предварительный разогрев холодного консерванта в центральной части и в пристенном слое канала шланга. Затраты энергии $E_{ц}$ на предварительный разогрев консерванта в центральной части, ограниченной эквивалентным радиусом r_3 , определим по формуле

$$E_{ц} = \pi (\kappa_3 R)^2 L_{ш} \cdot c \cdot \Delta T, \quad (12)$$



Р и с. 6. Уровень роста эквивалентной ПС шланга K_3 / K_x в зависимости от коэффициента μ понижения вязкости консерванта

Fig. 6. Level of growth the equivalent in the throughput of the hose K_3 / K_x depending on the coefficient μ of reducing the viscosity of the preservative

где R – радиус канала шланга, $R = 0,5d_{ш}$, м; c – объемная теплоемкость консерванта, Дж/(м³·°C); ΔT – повышение температуры консерванта при разогреве, °C.

Затраты энергии E_c на предварительный разогрев консерванта в пристенном слое, ограниченном эквивалентным радиусом r_3 и поверхностью шланга:

$$E_c = \pi \left[R^2 - (\kappa_3 R)^2 \right] L_{ш} \cdot c \cdot \Delta T. \quad (13)$$

Из формул (12) и (13) найдем соотношение затрат энергии:

$$\frac{E_{ш}}{E_c} = \frac{\kappa_3^2}{1 - \kappa_3^2} = \frac{0,84^2}{1 - 0,84^2} = 2,4.$$

Как видим, при равной ПС шлангов затраты энергии на предварительный разогрев консерванта в центральной части, ограниченной эквивалентным радиусом, будут в 2,4 раза выше затрат энергии на разогрев пристенного слоя. Следовательно, энергетически менее затратным является первый способ разогрева вязкого консерванта в пристенном слое от электронагревательной

спирали, размещенной внутри шланга возле стенки.

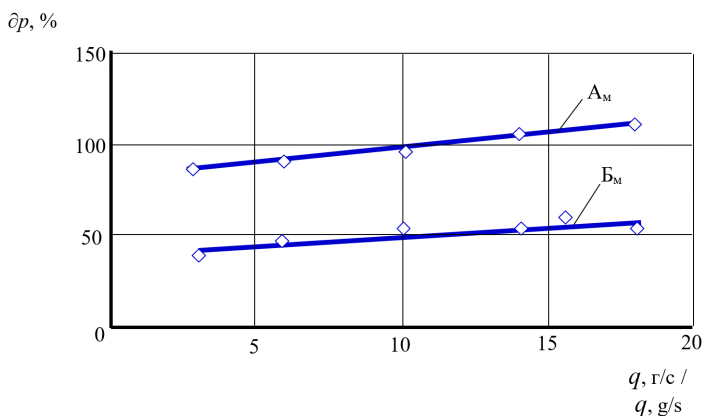
При выборе проволочной спирали для разогрева консерванта в шланге оценивалась ее поверхностная мощность (β , Вт/см²):

$$\beta = \frac{N_c}{F} = \frac{N_c}{\pi d_{ш} L_{ш}}, \quad (14)$$

где N_c – нагрузка (мощность) спирали, $N_c = 250$ Вт; F – площадь поверхности проволоки в спирали, см²; $L_{ш}$ – длина проволоки в спирали, $L_{ш} = 1700$ см; $d_{ш}$ – диаметр проволоки, $d_{ш} = 0,12$ см.

Расчет по формуле (14) дал величину поверхностной мощности спирали ($\beta = 0,4$ Вт/см²), которая в 2 раза ниже допустимой поверхностной мощности ($\beta_d = 0,8$ Вт/см²) для резинотекстильных шлангов [12]. Поэтому электронагревательные спирали А и Б, выполненные из проволоки с указанными геометрическими параметрами, пригодны для использования внутри исследуемого шланга.

Результаты первого этапа исследования потерь давления при течении сквозь шланги масла моторного отработанного отражены на рисунке 7.



Р и с. 7. Изменение потерь давления δp в шлангах со спиралями по отношению к потерям давления в гладком шланге в зависимости от расхода q отработанного масла:

A_M – для холодной спирали А; B_M – для холодной спирали Б; температура масла 20 °C

F i g. 7. Change in pressure loss δp in hoses with coils in relation to pressure loss in smooth hoses depending on the consumption q of waste oil: A_M – for cold spiral А; B_M – for cold coil Б; oil temperature 20 °C

Режим течения отработанного масла по гладкому шлангу оценивали числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{4q}{\pi d_{ш} v_m \rho_m}, \quad (15)$$

где q – расход масла, г/с; ρ_m – плотность масла, $\rho_m = 9 \cdot 10^{-4}$ г/мм³; $d_{ш}$ – диаметр канала в шланге, $d_{ш} = 12$ мм; v_m – кинематическая вязкость масла, $v_m = 122$ мм²/с.

По формуле (15) для минимального и максимального значений расхода (3 и 18 г/с) определен диапазон чисел Рейнольдса в данном исследовании $26 \leq Re \leq 156$. Данный диапазон чисел Рейнольдса относится к ламинарной области течения масла.

Графики A_m и B_m указывают на рост относительных потерь давления при увеличении расхода масла. С увеличением расхода масла от 3 до 18 г/с относительные потери давления в шланге А возросли от 88 до 112 %, а в шланге Б – от 45 до 54 %. Как видим, относительные потери давления в шланге со спиралью Б, витки которой находились ближе к стенке канала шланга, были почти в 2 раза ниже, чем в шланге со спиралью А.

Более высокие потери давления в шланге со спиралью А можно объяснить двумя причинами. Во-первых, спираль А имела меньший шаг ($s_a = 15,6$ мм), чем спираль Б ($s_b = 19,8$ мм), и, согласно формуле (1), оказывала большее гидравлическое сопротивление течению масла. Но расчет по формуле (1) для шагов спиралей 19,8 и 15,6 мм дает величину повышения коэффициента гидравлического сопротивления всего в 1,22 раза, что значительно ниже полученного результата. Во-вторых, витки спирали А находились ближе к оси шланга ($b_a = 0,8$ мм), чем

спирали Б ($b_b = 3,0$ мм). При ламинарном режиме течения потока жидкости его осевая скорость является максимальной (см. рис. 3). Как показано в работе А. М. Гайфуллина и А. В. Зубцова, сопротивление вставки определяется величиной импульса, который теряет поток жидкости в слое взаимодействия со вставкой (в слое смешения) [20]. Так как величина импульса зависит от скорости течения, то взаимодействие спирали А с быстродвижущимися слоями вдоль оси шланга увеличило потери импульса в потоке масла и потери давления по сравнению со спиралью Б.

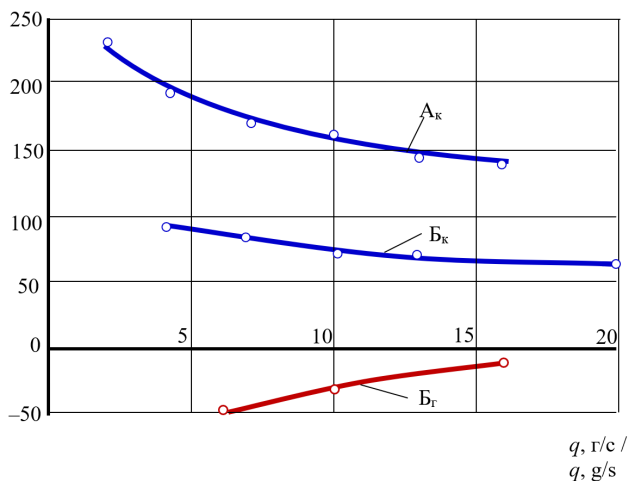
На рисунке 8 (графики A_k и B_k) показано изменение потерь давления при течении загущенного консерванта сквозь шланги с холодными спиральями, температура 20 °С.

Графики A_k и B_k указывают на снижение относительных потерь давления при увеличении расхода загущенного консерванта. С увеличением расхода консерванта от 4 до 16 г/с относительные потери давления в шланге А снизились от 190 до 140 %, а в шланге Б – от 95 до 70 %. Полученные результаты отражают аномальность течения загущенного консерванта как неньютоновской структурированной жидкости.

Так как эффективная вязкость структурированной жидкости зависит от скорости сдвига, то она уменьшается при увеличении давления и скорости течения⁷. Это относится к исследуемому консерванту, вязкость которого снижается в результате механического разрушения структур, образовавшихся благодаря наличию парафина в качестве загустителя⁸. Так как спираль А оказывает большее сопротивление течению консерванта сквозь шланг, разрушение структур в консерванте происходит интенсивнее, чем в шланге со спиралью Б.

⁷ Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. Изд. 7-е, испр. М. : Дрофа, 2003. 340 с.

⁸ Гуреев А. А., Фукс И. Г., Лашхи В. А. Химмотология. М. : Химия, 1986. 368 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29137610> (дата обращения: 06.11.2021).



Р и с. 8. Изменение потерь давления Δp в шлангах со спиралями по отношению к потерям давления в гладком шланге в зависимости от расхода q загущенного консерванта: A_k – для холодной спирали А; B_k – для холодной спирали Б, температура консерванта 20 °С; B_r – для нагретой спирали Б, начальная температура консерванта 12 °С

F i g. 8. Change in pressure loss Δp in hoses with coils in relation to pressure loss in smooth hoses depending on the consumption q of the thickened preservative: A_k – for cold coil А; B_k – for cold coil Б, preservative temperature 20 °С; B_r – for heated coil Б, the initial temperature of the preservative is 12 °С

Об этом свидетельствует более крутой угол наклона графика A_k к оси абсцисс в сравнении с углом наклона графика B_k . Несмотря на различие в характере течения загущенного консерванта и масла, в опытах с консервантом гидравлическое сопротивление спирали Б большего диаметра было тоже в 2 раза ниже, чем спирали А меньшего диаметра.

В ходе исследований, проведенных на отработанном моторном масле и на загущенном консерванте, однозначно установлено, что шланг со спиралью Б большего диаметра имеет меньшее гидравлическое сопротивление, чем шланг со спиралью А. Поэтому в серии опытов второго этапа, проводимых с нагревом загущенного консерванта, был использован шланг со спиралью Б. Результаты выполненного исследования показаны на рисунке 8, график B_r .

Потери давления в шланге, обогреваемом спиралью Б, тоже зависели от расхода загущенного консерванта, но при этом оставались ниже, чем в глад-

ком шланге. В результате относительные потери давления Δp имели отрицательные значения. В интервале расхода от 6 до 16 г/с потери давления Δp увеличились от –50 до –10 % (в 5 раз). Рост потерь давления при увеличении расхода был обусловлен снижением температуры нагреваемого загущенного консерванта и, соответственно, повышением его вязкости. Для этого уровня расхода потери давления в обогреваемом спиралью Б шланге ниже, чем в гладком шланге соответственно на 50–25 % (см. рис. 8, график B_r).

Благодаря нагреву загущенного консерванта от спирали Б уменьшаются относительные потери давления и изменяется пропускная способность шланга. Определим пропускные способности гладкого шланга $K_{гп}$ и шланга со спиралью K_c :

$$K_{гп} = \frac{q_{\phi}}{\Delta p_o \cdot \rho}, \quad K_c = \frac{q_{\phi}}{\Delta p \cdot \rho}, \quad (16)$$

где q_ϕ – опытное значение массового расхода консерванта, кг; ρ – плотность консерванта, кг/м³; Δp_o – потери давления в гладком шланге, Па; Δp – потери давления в шланге со спиралью, Па.

Из выражений (16) найдем потери давления в шлангах:

$$\Delta p_o = \frac{q_\phi}{K_{г\text{л}} \cdot \rho}, \quad \Delta p = \frac{q_\phi}{K_c \cdot \rho}. \quad (17)$$

Подставив полученные выражения в формулу (2), установим взаимосвязь между пропускными способностями шланга со спиралью Б (нагретой или холодной) и гладкого шланга:

$$\frac{K_c}{K_{г\text{л}}} = \frac{100}{100 + \partial p}. \quad (18)$$

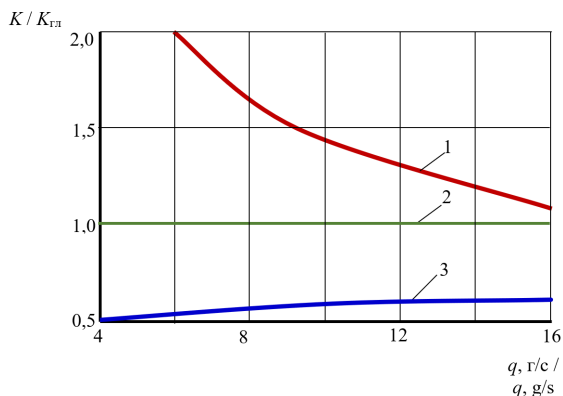
Используя данные с графиков Б_к и Б_г (см. рис. 8), по формуле (18) рассчитаем изменения величин $K / K_{г\text{л}}$ пропускных способностей шлангов в интервале массового расхода $4 \leq q \leq 16$ г/с. Результаты расчетов в виде графиков показаны на рисунке 9.

ПС шланга с холодной спиралью Б (рис. 9, график 3) практически наполовину ($K_{с.х.} / K_{г\text{л}} = 0,5-0,6$) ниже ПС гладкого шланга (рис. 9, график 2). Если работать с нагретой спиралью Б (рис. 9, график 1), то ПС шланга повысится в 2 раза ($K_{с.н.} / K_{г\text{л}} = 2$) при расходе консерванта $q = 6$ г/с и в 1,4 раза при расходе 10 г/с. Более высокая ПС шланга с нагретой спиралью при меньшем расходе обусловлена более высокой температурой нагреваемого консерванта и, соответственно, его меньшей вязкостью.

Обсуждение и заключение

В условиях осеннего сезона работоспособность пневмораспылительного оборудования для нанесения загущенного консерванта на рабочие органы сельхозмашин может быть обеспечена нагревом и разжижением материала в напорном шланге от электрической спирали. Показано, что нагрев консерванта в периферийном слое возле стенки шланга увеличивает его пропускную способность с меньшими затратами энергии (в 2,4 раза), чем нагрев в центральной части шланга.

Исследовано влияние геометрических параметров электрической спирали



Р и с. 9. Влияние расхода q консерванта на относительные пропускные способности $K / K_{г\text{л}}$ шлангов: 1 – шланг с нагретой спиралью Б ($K_{с.н.} / K_{г\text{л}}$); 2 – гладкий шланг; 3 – шланг с холодной спиралью Б ($K_{с.х.} / K_{г\text{л}}$)

F i g. 9. The influence of the consumption q of the preservative on the relative throughput $K / K_{г\text{л}}$ of the hoses: 1 – hose with a heated coil Б ($K_{с.н.} / K_{г\text{л}}$); 2 – smooth hose; 3 – hose with a cold coil Б ($K_{с.х.} / K_{г\text{л}}$)

мощностью 250 Вт, выполненной из стальной сварочной проволоки толщиной 1,2 мм и размещенной в шланге длиной 10 м, диаметром $d_{\text{ш}} = 12$ мм. Установлено, что гидравлическое сопротивление шланга и потери давления в нем зависят от диаметра спирали, вязкости и структуры протекающей жидкости. По сравнению с гладким шлангом потери давления в шланге со спиралью увеличиваются для отработанного моторного масла на 54–112 %, для загущенного консерванта – на 70–140 %. При ламинарном режиме течения потери давления в шланге в 2 раза ниже от спирали диаметром 0,85 диаметра канала шланга, чем от спирали диаметром 0,67 диаметра канала шланга.

В результате выполненных исследований определен рациональный способ размещения электрической спирали возле стенки канала обогреваемого

шланга. При пониженной температуре воздуха снижение вязкости загущенного консерванта за счет нагрева периферийного слоя способствует уменьшению гидравлического сопротивления шланга, увеличению его пропускной способности в 1,4–2,0 раза и, следовательно, повышению производительности нанесения защитного покрытия.

Использование электрической спирали в шланге с загущенным консервантом минимизирует потребление энергии при консервации техники на открытых площадках хранения. Благодаря этому становится возможным применение низковольтного автотракторного генератора с напряжением 28 В в качестве мобильного источника электроэнергии, используемой для разогрева загущенного консерванта в процессе его нанесения на рабочие органы сельхозмашин.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Миронов Е. Б., Воронов Е. В., Шишарина А. Н. Современные разработки и технологии в области хранения сельскохозяйственной техники // Аграрный научный журнал. 2019. № 6. С. 93–96. doi: <https://doi.org/10.28983/asj.y2019i6pp93-96>
2. Некоторые проблемы ингибирования атмосферной коррозии стали отработавшими моторными маслами / Л. Г. Князева [и др.] // Практика противокоррозионной защиты. 2012. № 1. С. 60–65. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21183407> (дата обращения: 06.11.2021).
3. Kinetics and Mechanism of Electrode Reactions in Corrosion of Some Metals Covered with Oil Films in Acid and Neutral Chloride Environments / V. I. Vigdorovich [et al.] // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2016. Vol. 52, Issue 7. P. 1157–1165. doi: <https://doi.org/10.1134/S2070205116070170>
4. Properties of Petroleum and Synthetic Oils as Bases for Anticorrosion Materials / V. I. Vigdorovich [et al.] // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2019. Vol. 55, Issue 4. P. 412–423. doi: <https://doi.org/10.1007/s10553-019-01046-0>
5. Эффективность использования высших карбоновых кислот и алифатических аминов в качестве маслорастворимых антикоррозионных присадок и загустителей масел / В. И. Вигдорovich [и др.] // Журнал прикладной химии. 1996. Т. 69, № 4. С. 611–619. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23261888> (дата обращения: 06.11.2021).
6. Tanygina E. D., Vigdorovich V. I. Effect of a Solvent and an Anticorrosive Additive on the Processes That Occur on the Phase Boundary and in the Phase Volume // Polymer Science, Series D. 2018. Vol. 11, Issue 3. P. 312–319. doi: <https://doi.org/10.1134/S1995421218030188>
7. Быков В. В., Голубев М. И. Защита лесохозяйственных машин от коррозии консервационными составами на основе отходов производства с учетом параметров окружающей среды // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 4. С. 30–33. doi: <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2019-0-30-33>

8. Петрашев А. И. Гидравлические основы технологического процесса нанесения консервационного состава // Наука в центральной России. 2020. № 2. С. 83–92. doi: <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2020-2-83-92>

9. Vigdorovich V. I., Shel' N. V. Theoretical Foundations and Practical Development of Few-Component Anticorrosive Oil-Based Conservation Materials // Protection of Metals. 2005. Vol. 41, Issue 4. P. 394–401. doi: <https://doi.org/10.1007/s11124-005-0055-7>

10. Устройство для нагрева и нанесения защитного материала : патент 2420359 Российская Федерация / Петрашев А. И. [и др.]. № 2009107463/05 ; заявл. 27.02.2009 ; опубл. 10.06.2011, Бюл. № 16. 11 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37747231> (дата обращения: 06.11.2021).

11. Устройство для нагрева защитной смазки при нанесении на сельхозмашины : патент 2525493 Российская Федерация / Петрашев А. И., Клепиков В. В., Шумов Ю. А. № 2013109670 ; заявл. 04.03.2013 ; опубл. 20.08.2014, Бюл. № 23. 10 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37451471> (дата обращения: 06.11.2021).

12. Петрашев А. И., Клепиков В. В. Технические решения проблемы консервации сельхозмашин вязкой мастикой с подогревом // Наука в центральной России. 2019. № 4. С. 114–122. doi: <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2019-4-114-122>

13. Лукьянов П. В., Мешков И. В. Структура и расход закрученного потока жидкости в криволинейной трубе // Прикладна гідромеханіка. Гідромашини і гідроагрегати. 2018. № 2. С. 15–22. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/inhpn_2018_2_5 (дата обращения: 06.11.2021).

14. Enhancement of Laminar and Transitional Flow Heat Transfer in Tubes by Means of Wire Coil Inserts / A. García [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2007. Vol. 50, Issues 15–16. P. 3176–3189. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.01.015>

15. Flow Pattern Assessment in Tubes with Wire Coil Inserts in Laminar and Transition Regimes / A. García [et al.] // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2007. Vol. 28, Issue 3. P. 516–525. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.07.001>

16. Назмеев Ю. Г., Конахина И. А. Интенсификация теплообмена при течении вязкой жидкости в трубах с винтовой накаткой // Теплоэнергетика. 1993. № 11. С. 59–62. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37062584> (дата обращения: 06.11.2021).

17. Investigation of a Heat Transfer Augmenter as a Fouling Cleaner and Its Optimum Geometry in the Tube Side of a Condenser / S. R. Yang [et al.] // Experimental Thermal and Fluid Science. 1992. Vol. 5, Issue 6. P. 795–802. doi: [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(92\)90123-M](https://doi.org/10.1016/0894-1777(92)90123-M)

18. Thermohydraulic Efficiency of Tubes with Internal Spiral Finning / A. N. Skrypnik [et al.] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2018. Vol. 91, Issue 1. P. 52–63. doi: <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1718-y>

19. Hydraulic Resistance of Tubes with Internal Helical Finning Designed by Deforming Cutting [Электронный ресурс] / I. A. Popov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 980. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/980/1/012004>

20. Гайфуллин А. М., Зубцов А. В. Обтекание пластины с подвижной поверхностью // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2009. № 4. С. 73–78. URL: <https://mzg.ipmnet.ru/ru/Issues.php?y=2009&n=4&p=73> (дата обращения: 06.11.2021).

Поступила 19.07.2021; одобрена после рецензирования 10.11.2021; принята к публикации 15.11.2021

Об авторах:

Петрашев Александр Иванович, заведующий лабораторией хранения и защиты техники от коррозии Всероссийского научно-исследовательского института использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве (392022, Российская Федерация, г. Тамбов, пер. Ново-Рубежный, д. 28), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7949-6883>, Researcher ID: ABD-2066-2021, Scopus ID: 57211665518, vitin-10.pet@mail.ru

Князева Лариса Геннадьевна, главный научный сотрудник лаборатории хранения и защиты техники от коррозии Всероссийского научно-исследовательского института использования техники

и нефтепродуктов в сельском хозяйстве (392022, Российская Федерация, г. Тамбов, пер. Ново-Пу-
бежный, д. 28), доктор химических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3232-2210>, Re-
searcher ID: S-4930-2017, Scopus ID: 7003449084, knyazeva27@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

А. И. Петрашев – проведение теоретических и экспериментальных исследований, формули-
ровка цели и выводов.

Л. Г. Князева – обзор литературы, обработка и анализ полученных результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Mironov Ye.B., Voronov Ye.V., Shisharina A.N. Modern Developments and Technologies in the Field of Agricultural Machinery Storage. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = Agrarian Scientific Journal. 2019; (6):93-96. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.28983/asj.y2019i6pp93-96>
2. Knyazeva L.G., Akolzin A.P., Vigdorovich V.I., Shel' N.V. Some Problems of Inhibition of Steel Atmospheric Corrosion by the Waste Motor Oils. *Praktika protivokorroziionnoy zashchity* = Practice Corrosion Protection. 2012; (1):60-65. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21183407> (accessed 06.11.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
3. Vigdorovich V.I., Tsygankova L.E., Shel' N.V., et al. Kinetics and Mechanism of Electrode Reactions in Corrosion of Some Metals Covered with Oil Films in Acid and Neutral Chloride Environments. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2016; 52(7):1157-1165. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1134/S2070205116070170>
4. Vigdorovich V.I., Knyazeva L.G., Tsygankova L.E., et al. Properties of Petroleum and Synthetic Oils as Bases for Anticorrosion Materials. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2019; 55(4):412-423. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/s10553-019-01046-0>
5. Vigdorovich V.I., Boldyryev A.V., Tsygankova L.Ye., Shyel N.V. [Effectiveness of Using Higher Carboxylic Acids and Aliphatic Amines as Oil-Soluble Rust-Preventive Additives and Oil Thickeners]. *Zhurnal prikladnoy khimii* = Russian Journal of Applied Chemistry. 1996; 69(4):611-619. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23261888> (accessed 06.11.2021). (In Russ.)
6. Tanygina E.D., Vigdorovich V.I. Effect of a Solvent and an Anticorrosive Additive on the Processes That Occur on the Phase Boundary and in the Phase Volume. *Polymer Science, Series D*. 2018; 11(3):312-319. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1134/S1995421218030188>
7. Bykov V.V., Golubev M.I. Protection of Forestry Equipment Against Corrosion with Corrosion-Preventing Compounds Based on Production Waste, Taking into Account Environment Parameters. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* = Repair, Reconditioning, Modernization. 2019; (4):30-33. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2019-0-30-33>
8. Petrashev A.I. Hydraulic Bases of Technological Process for Application of Conservation Composition. *Nauka v tsentralnoy Rossii* = Science in the Central Russia. 2020. (2):83-92. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2020-2-83-92>
9. Vigdorovich V.I., Shel' N.V. Theoretical Foundations and Practical Development of Few-Component Anticorrosive Oil-Based Conservation Materials. *Protection of Metals*. 2005; 41(4):394-401. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/s11124-005-0055-7>
10. Petrashev A.I., Prokhorenkov V.D., Shatalin Ju.Ju, et al. Device to Heat and Apply Protective Material. Patent 2,420,359 Russian Federation. 2011 June 10. 11 p. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37747231> (accessed 06.11.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
11. Petrashev A.I., Klepikov V.V., Shumov Ju.A. Device for Heating Protective Lubricant When Applied to Agricultural Machine. Patent 2,525,493 Russian Federation. 2014 August 20. 10 p. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37451471> (accessed 06.11.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

12. Petrashev A.I., Klepikov V.V. Technical Solutions Conservation Problem for Agricultural Machines by Viscous Mastic with Heating. *Nauka v tsentralnoy Rossii = Science in the Central Russia*. 2019; (4):114-122. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2019-4-114-122>
13. Lukyanov P.V., Meshkov I.V. Helical Flux Structure and Rate of Fluid in Curvilinear Pipe with Constant Cross-Section. *Prikladna gidromekhanika. Gidromashini i gidroagregati = Applied Hydromechanics. Hydromachines and Hydraulic Units*. 2018; (2):15-22. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/inhpn_2018_2_5 (accessed 06.11.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
14. García A., Solano J.P., Vicente P.G., Viedma A. Enhancement of Laminar and Transitional Flow Heat Transfer in Tubes by Means of Wire Coil Inserts. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007; 50(15-16):3176-3189. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.01.015>
15. García A., Solano J.P., Vicente P.G., Viedma A. Flow Pattern Assessment in Tubes with Wire Coil Inserts in Laminar and Transition Regimes. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2007; 28(3):516-525. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.07.001>
16. Nazmeev Yu.G., Konakhina I.A. [Intensification of Heat Transfer in Viscous Fluid Flow in Pipes with Helical Knurling]. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 1993; (11):59-62. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37062584> (accessed 06.11.2021). (In Russ.)
17. Yang S.R., Wang J.M., Zai G.D., Kim R.H. Investigation of a Heat Transfer Augmenter as a Fouling Cleaner and Its Optimum Geometry in the Tube Side of a Condenser. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1992; 5(6):795-802. (In Eng.) doi: [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(92\)90123-M](https://doi.org/10.1016/0894-1777(92)90123-M)
18. Skrypnik A.N., Shchelchkov A.V., Popov I.A., et al. Thermohydraulic Efficiency of Tubes with Internal Spiral Finning. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2018; 91(1):52-63. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1718-y>
19. Popov I.A., Shchelchkov A.V., Skrypnik A.N., et al. Hydraulic Resistance of Tubes with Internal Helical Finning Designed by Deforming Cutting. *Journal of Physics: Conference Series*. 980. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/980/1/012004>
20. Gayfullin A.M., Zubtsov A.V. [Streamlining a Plate with a Moving Surface]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza = Fluid Dynamics. A Journal of Russian Academy of Sciences*. 2009; (4):73-78. Available at: <https://mzg.ipmnet.ru/ru/Issues.php?y=2009&n=4&p=73> (accessed 06.11.2021). (In Russ.)

Submitted 19.07.2021; approved after reviewing 10.11.2021; accepted for publication 15.11.2021

About the authors:

Aleksandr I. Petrashev, Head of the Laboratory for Storage and Protection of Equipment from Corrosion, All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture (28 Novo-Rubezhnyy Pereulok, Tambov 392022, Russian Federation), Dr.Sci (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7949-6883>, Researcher ID: ABD-2066-2021, Scopus ID: 57211665518, vitin-10.pet@mail.ru

Larisa G. Knyazeva, Chief Scientist of the Laboratory of Storage and Protection of Equipment from Corrosion, All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture (28 Novo-Rubezhnyy Pereulok, Tambov 392022, Russian Federation), Dr.Sci (Chem.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3232-2210>, Researcher ID: S-4930-2017, Scopus ID: 7003449084, knyazeva27@mail.ru

Contribution of the authors:

A. I. Petrashev – conducting theoretical and experimental research, formulating goals and conclusions.
L. G. Knyazeva – literature review, processing and analyzing the results.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

УДК 631.361.43

doi: 10.15507/2658-4123.031.202104.577-590

Научная статья



Экспериментальное определение влияния конструктивных и режимных параметров шелушильной машины на критерии эффективности процесса шелушения

А. В. Анисимов*, Ф. Я. Рудик*Саратовский ГАУ (г. Саратов, Российская Федерация)** anisimovaleksan@mail.ru

Аннотация

Введение. Определение оптимальной технологической эффективности процесса шелушения, с точки зрения количества отделяемых оболочек и удельных затрат на процесс, является важной задачей. Цель исследования – обосновать комплексный критерий оценки технологической эффективности шелушения зерна пшеницы и выбрать оптимальные значения параметров шелушения зерна с учетом энергоемкости процесса.

Материалы и методы. Для количественной оценки технологической эффективности шелушения зерна пшеницы были использованы следующие локальные критерии эффективности: относительный выход отходов шелушения, относительное снижение зольности зерна, увеличение количества битых зерен, а также комплексный критерий эффективности, учитывающий локальные критерии и удельный расход электроэнергии.

Результаты исследования. Проведенные эксперименты показали, что технологическая целесообразность процесса шелушения обеспечивается при проценте открытия заслонки на выходе из машины 60–70 %. При этом относительный выход отходов шелушения составляет 3,2–2,8 %, относительное снижение зольности зерна 0,32–0,20 %, а увеличение количества битых зерен не превышает 0,85 %. С увеличением степени открытия заслонки на выходе из машины с 50 до 100 % удельные затраты электроэнергии снижаются с 8,7 до 3,5 кВт·ч/т.

Обсуждение и заключение. Для оценки технологической эффективности шелушения зерна пшеницы предложен обобщенный критерий эффективности, включающий в себя локальные критерии. Экспериментально доказана их зависимость от интенсивности процесса обработки зерна в машине. Определено оптимальное сочетание степени открытия заслонки на выходе машины 67 % (производительность 0,7 т/ч) с удельным расходом электроэнергии 5,8 кВт·ч/т. В этом случае комплексный критерий эффективности, с учетом энергоемкости процесса, равен 4,5 кг/кВт·ч.

© Анисимов А. В., Рудик Ф. Я., 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: шелушение, критерии эффективности, отходы шелушения, зольность, удельные энергозатраты

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Анисимов А. В., Рудик Ф. Я. Экспериментальное определение влияния конструктивных и режимных параметров шелушильной машины на критерии эффективности процесса шелушения // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 4. С. 577–590. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.577-590>

Original article

Experimental Determination of the Influence of the Peeling Machine Constructive and Operating Parameters on the Criteria of the Peeling Process Efficiency

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

Saratov State Agrarian University (Saratov, Russian Federation)

* anisimovaleksan@mail.ru

Abstract

Introduction. The determination of the optimal technological efficiency of the peeling process, in terms of the number of detached casings and unit costs of the process, is an important task. The purpose of the study is to give reasons for a comprehensive evaluation criterion of the technological efficiency of peeling wheat grain and choose the optimal values of the parameters of grain peeling, taking into account the energy intensity of the process.

Materials and Methods. To quantify the technological efficiency of peeling wheat grain, we used the following local efficiency criteria: the relative yield of peeling by-products, the relative decrease in grain ash content, the increase in the number of cracked grains, and a comprehensive criterion of efficiency taking into account local criteria and the specific power consumption.

Results. The experiments have shown that the technological feasibility of the peeling process is ensured at the percentage of the flap opening at the outlet of the machine 60–70%. In this case, the relative yield of waste husk is 3.2–2.8%, the relative decrease in grain ash content is 0.32–0.20%, and the increase in the number of cracked grains does not exceed 0.85%. With increasing the degree of the flap opening at the outlet of the machine from 50 to 100%, the specific power consumption decreases from 8.7 to 3.5 kW·h/t.

Discussion and Conclusion. To assess the technological efficiency of wheat grain peeling a generalized efficiency criterion, which includes local criteria, is proposed. It has been experimentally proved their dependence on the intensity of grain processing in the machine. The optimum combination of the flap opening degree at the outlet of the machine at 67% (productivity 0.7 t/h) and the specific power consumption of 5.8 kW·h/t was defined. In this case, the efficiency complex criterion, taking into account the process energy intensity of, is 4.5 kg/kW·h.

Keywords: peeling, efficiency criteria, peeling by-products, ash content, specific energy consumption

The authors declare no conflict of interest.

For citation: Anisimov A.V., Rudik F.Ya. Experimental Determination of the Influence of the Peeling Machine Constructive and Operating Parameters on the Criteria of the Peeling Process Efficiency. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(4):577-590. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.577-590>

Введение

Уровень продовольственного использования белков, витаминов и минеральных веществ, содержащихся в зерне пшеницы, повышается с увеличением общего выхода муки. При этом увеличение выхода муки высшего сорта, при неизменном общем выходе, приводит к увеличению содержания эндосперма в конечной продукции и уменьшению ценных компонентов зерна: белков, витаминов, микро- и макроэлементов. Шелушение увлажненного зерна как способ очистки поверхности от минеральных и микробиологических загрязнений вместе с внешними плодовыми оболочками, не представляющими пищевой ценности, является наиболее рациональной и эффективной технологической операцией. В обработанном зерне сохраняется более 90 % ценных для питания человека веществ. Они перейдут в муку при обойном помоле. Из этой муки производится хлеб с повышенными пищевыми качествами.

В результате технологической операции шелушения зерна пшеницы в машинах, сжатии и трении, продукты обработки должны состоять только из ошелушенного зерна и отделяемых оболочек [1–4]. Однако несовершенство применяемых методов и средств шелушения приводит к получению смеси из следующих продуктов: целое и дробленое, шелушеное и нешелушеное зерно; снятые оболочки и мучка; загрязнения, удаленные с поверхности зерна [5–9]. При этом эффективность процесса увеличивается, если содержание мучки, нешелушенных и битых зерен в продуктах шелушения ниже, а содержание целого ядра и снятых оболочек выше.

Цель исследования – обосновать комплексный критерий оценки технологической эффективности шелушения зерна пшеницы и выбрать оптимальные значения параметров шелушения зерна с учетом энергоемкости процесса.

Обзор литературы

Шелушение зерна – это процесс отделения наружных плодовых оболочек (для зерновых культур) или пленок (для пленчатых культур). Операция шелушения является одним из основных этапов технологического процесса получения муки и крупы. Эта операция непосредственно влияет на выход и качество конечной продукции, а также на технико-экономические показатели производства муки и крупы в целом. Проблемой шелушения зерна пшеницы и крупяных культур перед переработкой занимались многие ученые [10–13].

В исследованиях авторов представлены данные по шелушению как пленчатых культур (гречиха, рис, ячмень и др.), так и голозерновых (пшеница и др.). Эффективность процесса шелушения оценивают либо визуально, либо с помощью коэффициента шелушения [14–16]. Главной целью исследований было удалить максимальное количество оболочек вместе с наиболее ценными веществами и оставить только ядро с крахмалом. Для сохранения в зерне всех витаминов, макро- и микроэлементов (содержащихся в основном во внутренних оболочках зерна) и передачи в конечный продукт (муку, крупу) важной задачей является изучение процесса шелушения с точки зрения влияния интенсивности процесса на выход и качество продуктов шелушения. Важно установить критерии оценки эффективности процесса шелушения, в частности зерна пшеницы, при получении крупы и муки и обосновать их оптимальные значения с точки зрения технологической эффективности и затрат энергии [17–20].

Технологический эффект работы шелушильной машины может быть установлен после определения количества ошелушенного зерна и полученного целого ядра. Для характеристики используется коэффициент шелушения [16; 17].

Однако известно, что данный коэффициент достаточно легко определить при обработке пленчатых культур (ячмень, овес и др.), а при шелушении зерна пшеницы достаточно сложно отличить обработанные и необработанные зерна без использования приборов (визуально) [21–24].

Материалы и методы

Для количественной оценки технологической эффективности шелушения зерна пшеницы при выборе оптимальных кинематических и конструктивных параметров машины может быть применен обобщенный критерий эффективности. Он включает следующие составляющие, выраженные в долях единицы:

1. Относительный выход отходов шелушения

$$C_{\text{о.ш.}} = \left(1 - \frac{Q_{\text{о.з.}}}{Q_{\text{и.з.}}} \right) \leq 1,$$

где $Q_{\text{и.з.}}$ и $Q_{\text{о.з.}}$ – производительность машины по исходному и обработанному зерну, кг/ч.

2. Относительное снижение зольности зерна

$$\Delta Z = \left(1 - \frac{Z_{\text{о.з.}}}{Z_{\text{и.з.}}} \right) \leq 1,$$

где $Z_{\text{и.з.}}$ и $Z_{\text{о.з.}}$ – зольность (в перерасчете на абсолютно сухое вещество) исходного и ошелушенного зерна, %.

3. Относительное увеличение количества битых зерен

$$\Delta B = \frac{Q_{\text{о.з.}} \cdot B_{\text{о.з.}} - Q_{\text{и.з.}} \cdot B_{\text{и.з.}}}{Q_{\text{и.з.}} (1 - B_{\text{и.з.}})} \leq 1,$$

где $B_{\text{и.з.}}$ и $B_{\text{о.з.}}$ – содержание битых зерен в исходном и шелушенном зерне, выраженное в долях единицы.

Если отходы шелушения состоят только из покровных тканей зерна, то они не содержат эндосперма (мучки).

Попадание его в отходы шелушения свидетельствует о разрушении ядра зерна, его истирании и выкрашивании. Так как образование битых зерен при шелушении учитывается локальным критерием ΔB , то в критерий $C_{\text{о.ш.}}$ показатель содержания мучки вводить нецелесообразно.

Локальные критерии возможно применять для оценки эффективности различных режимов обработки зерна с одинаковыми механико-технологическими свойствами. Их применение весьма ограничено для сопоставления технологической эффективности шелушительных машин различных принципов действия.

Комплексную оценку эффективности процесса целесообразно осуществлять по критериям, значения которых сопоставляются с единицей, считая ее оптимальной величиной.

Интенсивность образования отходов шелушения E_0 можно характеризовать выражением

$$E_0 = \frac{1}{1 + \sqrt{\left(\frac{C_{\text{об}}}{C_{\text{о.ш.}}} \right)^2 - 1}} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta \text{Об}}{C_{\text{о.ш.}}}} \leq 1,$$

где $C_{\text{об}}$ – максимально возможный относительный выход оболочек, подлежащих удалению с поверхности исходного зерна; $\Delta \text{Об}$ – остаток покровных тканей в обработанном зерне.

При $C_{\text{о.ш.}} = C_{\text{об}}$ значение $E_0 = 1$ и, следовательно, технологический режим обработки поверхности зерна оптимален. При $C_{\text{о.ш.}} < C_{\text{об}}$ значение $E_0 < 1$ отражает сниженную эффективность процесса шелушения, характеризуемого неполным отделением оболочек. Увеличение количества отходов шелушения до значения $C_{\text{о.ш.}} > C_{\text{об}}$ возможно только в результате полного съема оболочек и дополнительных потерь эндосперма зерна, что снижает

эффективность шелушения и отражает минимальное значение критерия E_0 .

Для повышения достоверности обобщенного критерия оценки эффективности процесса шелушения дополнительно необходимо ввести составляющие, учитывающие образование битых зерен E_6 и снижение зольности зерна пшеницы E_3 .

Значение E_6 определяется выражением

$$E_6 = \frac{1}{1 + \frac{\Delta B}{\Delta B_n}} \leq 1,$$

где ΔB_n и $\Delta B = B_{o.z.} - B_{n.z.}$ – нормативно допустимое и действительное содержание битых зерен соответственно.

Оптимальный режим шелушения зерна будет при $\Delta B = 0$ и $E_6 = 1$, а при $\Delta B > 0$ значение $E_6 < 1$.

Величина E_3 характеризуется выражением

$$E_3 = \frac{1}{1 + \frac{\Delta Z_n}{\Delta Z}} \leq 1,$$

где $\Delta Z_n = 1 - \frac{Z_3}{Z_{i.z.}}$ – определяемое

в лабораторных условиях предельно возможное снижение зольности зерна пшеницы в результате практически полного отделения покровных тканей; Z_3 – зольность эндосперма зерна пшеницы.

В то же время следует отметить, что достижение 100 % отделения оболочек ($E_0 = 1$) не всегда целесообразно (особенно при обойном помоле), так как при повышении интенсивности шелушения увеличивается содержание битых зерен (E_6 уменьшается) и снижается содержание в конечном продукте ценных компонентов зерна: минеральных веществ и витаминов. Выбор оптимальной

интенсивности шелушения, при которой бы выполнялась основная задача шелушения – отделить внешние оболочки вместе с загрязнениями при минимальном приращении дробленого зерна, является важной задачей.

Для зерна пшеницы при минимальном и максимальном содержании покровных тканей в интервале $C_{o.g.} = 0,04-0,08$ (среднее 0,06) зона технологического оптимума критерия E_0 находится в интервале $0,45 \leq E_0 < 1$ [17; 24].

С учетом данных о допуске увеличении относительного количества битых зерен $\Delta B_n = \Delta B = 2,0$ % зона технологического оптимума для критерия E_6 определяется интервалом $0,5 \leq E_6 < 1$ [17; 24]. Для принятых интервалов зольности зерна и эндосперма пшеницы $Z_{i.z.} = 1,5-2,2$ % (среднее 1,85 %) и $Z_3 = 0,36-0,60$ % (среднее 0,48 %) величина предельно возможного относительного ее снижения составляет $\Delta Z_n = 0,74$ [17; 24]. Тогда при рекомендуемом снижении зольности на 0,02 % в процессе обработки поверхности зерна на существующих машинах зона технологического оптимума для критерия E_3 будет ограничена значениями $0,03 \leq E_3 < 1$.

При известных пределах изменения каждого из частных критериев можно определить комплексный критерий эффективности:

$$E_1 = \frac{\nu_1 \left(E_0 + \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1} E_6 + \frac{\vartheta_3}{\vartheta_1} E_3 \right)}{\vartheta_1 + \vartheta_2 + \vartheta_3} \leq 1,$$

где $\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3$ – коэффициенты значимости влияния составляющих величин на результирующую функцию. Отношения $\vartheta_2 / \vartheta_1, \vartheta_3 / \vartheta_1$ характеризуют величину долевого вклада каждого из коэффициентов по сравнению с коэффициентом наименьшего влияния на обобщенный критерий.

Возможным является также применение размерного комплексного критерия, учитывающего энергоёмкость процесса. Энергоёмкость характеризуется отношением производительности машины $(Q_{и.з.} - Q_{о.з.})$ по отходам шелушения к среднему расходу энергии $N(t)$ за контролируемый промежуток времени:

$$E_2 = \frac{\nu_1 \left(E_0 + \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1} E_6 + \frac{\vartheta_3}{\vartheta_1} E_3 \right) (Q_{и.з.} - Q_{о.з.})}{(\vartheta_1 + \vartheta_2 + \vartheta_3) N(t)} \leq 1.$$

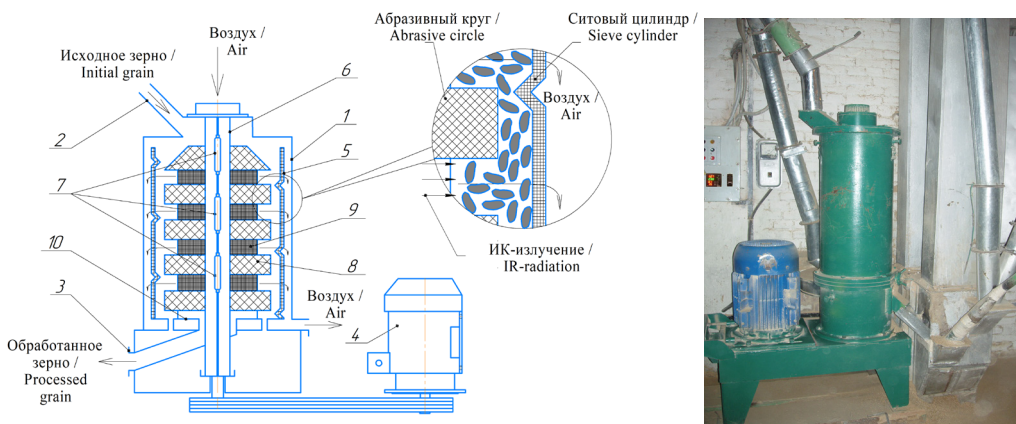
При необходимости обеспечить многократную обработку зерна в шелушильной машине сопоставление результатов позволяет подбирать по каждому из значений E_2 наиболее приемлемые конструктивные и кинематические параметры.

Опыты шелушения увлажненного и кратковременно отволоженного зерна пшеницы проводили при зольности 1,9 %, содержании битых зерен $B_{и.з.} = 1,0$ % и различных режимах работы шелушильной машины с осредненной производительностью 0,7 т/ч.

Установлено, что соотношение значений коэффициентов значимости локальных критериев E_0, E_6, E_3 с достоверной вероятностью 95 % может быть принято как $\vartheta_1 = 1; \vartheta_2 = 2,5; \vartheta_3 = 3$ [7; 20]. Для исследования было использовано зерно мягкой пшеницы сорта Саратовская 90.

Шелушение исследуемых образцов осуществляли в производственных условиях на разработанной шелушильной машине с производительностью 0,5–1,0 т/ч. [20; 25]. Обработка протекает по принципу трения зерна о неподвижный ситовый цилиндр и подвижные абразивные круги (рис. 1). Производительность машины задается шиберной заслонкой, установленной на выходном патрубке и управляемой штурвалом через червячную передачу путем изменения площади выходного отверстия установки.

Шелушению подвергали зерно, очищенное от примесей, без мелкого зерна (проход сита $1,7 \times 20$ мм) после проведенной гидротермической обработки [7]. Фракцию дробленого ядра отбирали проходом сита диаметром 2,7 мм.



Р и с. 1. Шелушильно-сушильная машина: 1 – корпус; 2, 3 – входной и выходной патрубки; 4 – привод; 5 – ситовый цилиндр; 6 – полый вал с отверстиями; 7 – ИК-излучатели; 8 – абразивные круги; 9 – обечайки; 10 – вентилятор

F i g. 1. Peeling and drying machine: 1 – body; 2, 3 – inlet and outlet nozzles; 4 – drive; 5 – sieve cylinder; 6 – hollow shaft with holes; 7 – infrared radiators; 8 – abrasive wheels; 9 – shells; 10 – fan

Зольность определяли по ГОСТу 10847-2019 (рис. 2)¹. Удельный расход электроэнергии $N_{уд}$ определяли по показаниям амперметра, включенного в цепь питания электродвигателя.

Результаты исследования

При изучении процесса шелушения была поставлена задача проанализировать влияние степени открытия заслонки на выходе δ_3 разработанной шелушильной машины на частные и комплексный критерии эффективности. В процессе исследований проводили обработку партий зерна в машине с различным процентом открытия заслонки (от 50 до 100 %, с шагом 10 %), определяли $C_{о.ш.}$, ΔZ и ΔB , а также зависимости Q и $N_{уд}$ от δ_3 .

В результате проведенных исследований получены следующие зависимости: выход продуктов шелушения и дробленого зерна, зольность обработанного зерна и удельного расхода электроэнергии $N_{уд}$ от положения заслонки

на выходе из машины δ_3 , % открытия. Графики зависимостей представлены на рисунках 3–5.

Уравнения регрессии для рисунка 3

$$\delta_3 / \Delta B:$$

$$y = 4,3586 - 0,0791 \cdot x + 0,0004 \cdot x^2;$$

$$R^2 = 0,8556; p = 0,0082;$$

$$\delta_3 / C_{о.ш.}:$$

$$y = 3,3429 + 0,0351 \cdot x - 0,0007 \cdot x^2;$$

$$R^2 = 0,9318; p = 0,0018.$$

Уравнение регрессии для рисунка 4

$$\delta_3 / \Delta Z:$$

$$y = 1,2414 - 0,0217 \cdot x + 9,6429 \cdot E - 5 \cdot x^2;$$

$$R^2 = 0,9374; p = 0,0015.$$

Уравнения регрессии для рисунка 5

$$\delta_3 / Q: y = -0,1214 + 0,0123 \cdot x;$$

$$r = 0,9984; R^2 = 0,9968;$$

$$\delta_3 / N_{уд}: y = 24,1143 - 0,4078 \cdot x +$$

$$+ 0,002 \cdot x^2; R^2 = 0,9240; p = 0,0022.$$



a)

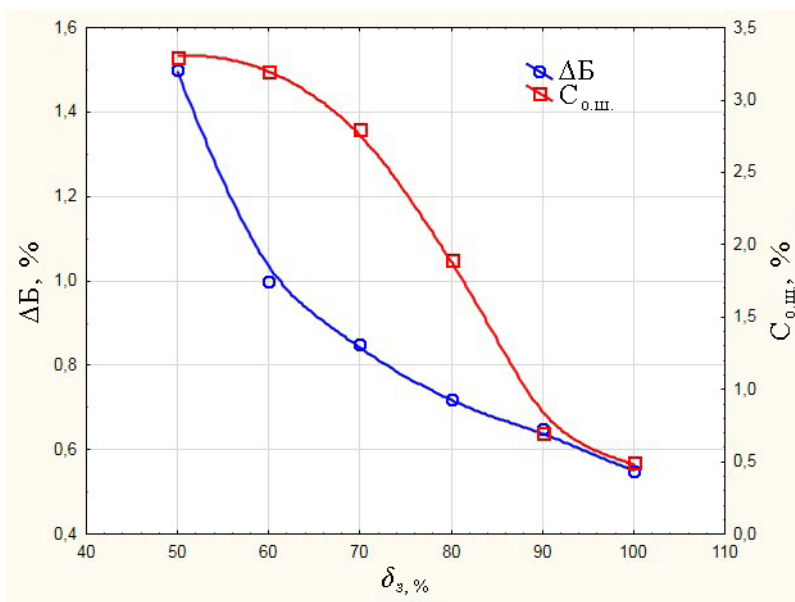


b)

Р и с. 2. Оборудование для определения зольности: а) лабораторные электронные весы ADAM HCB 123; б) печь муфельная ПМ-8

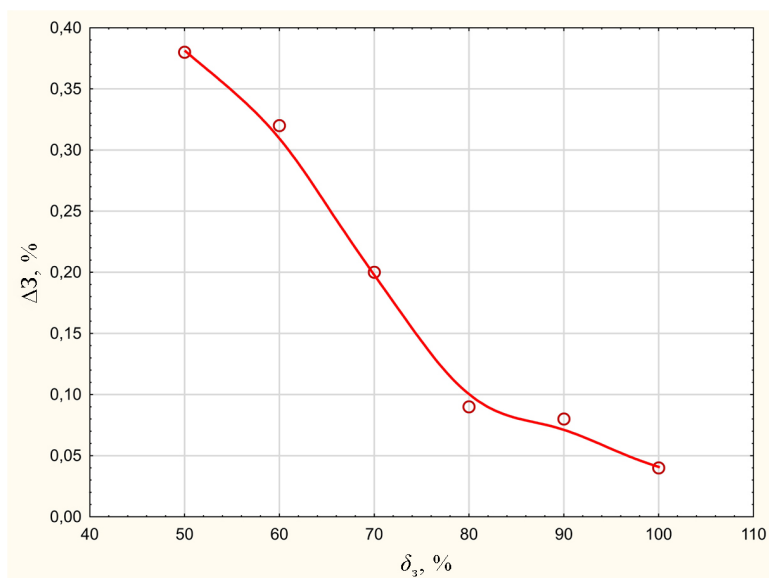
F i g. 2. Equipment for determining ash content: a) laboratory electronic scales ADAM HCB 123; b) muffle furnace PM-8

¹ ГОСТ 10847-2019. Зерно. Методы определения зольности. М., 2019.



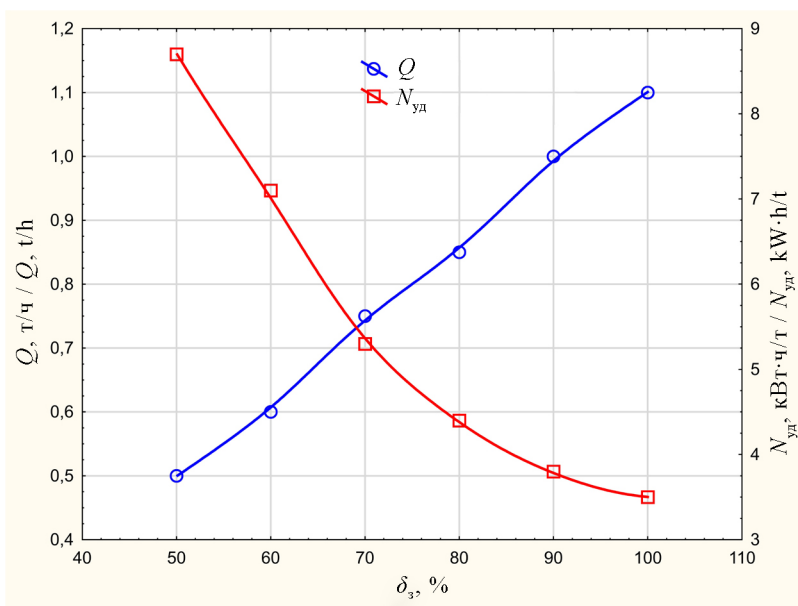
Р и с. 3. График зависимостей количества снятых оболочек шелушения $C_{0.ш.}$ и битых зерен $\Delta Б$ от положения заслонки на выходе из машины $\delta_з$

F i g. 3. Diagram of dependencies of the number of peelings removed $C_{0.ш.}$ and cracked grains $\Delta Б$ on the position of the damper at the exit of the machine $\delta_з$



Р и с. 4. График зависимости относительного снижения зольности $\Delta З$ от положения заслонки на выходе из машины $\delta_з$

F i g. 4. Graph of the dependence of the relative decrease in ash content $\Delta З$ on the position of the damper at the exit from the machine $\delta_з$



Р и с. 5. График зависимостей производительности Q и удельных энергозатрат $N_{\text{уд}}$ от положения заслонки на выходе из машины δ_3

F i g. 5. Graph of dependences of productivity Q and specific energy consumption $N_{\text{уд}}$ on the position of the damper at the exit from the machine δ_3

Анализ полученных зависимостей (рис. 3, 4) показывает, что с увеличением процента открытия заслонки на выходе из машины δ_3 с 50 до 100 % происходит снижение показателей $C_{\text{о.ш.}}$ с 3,3 до 0,6 %, ΔZ с 0,38 до 0,04 % и ΔB с 1,50 до 0,55 %. Это объясняется тем, что при небольших зазорах выпускного отверстия на выходе из машины создается подпор зерна и увеличивается межзерновое давление, а процесс шелушения идет более интенсивно. При 90 % открытии заслонки сопротивление выпуску значительно уменьшается и снижается эффективность шелушения. Дальнейшее открытие заслонки позволяет зерну практически свободно выходить из машины, и шелушение осуществляется только за счет давления, создаваемого абразивными дисками при трении зерна о них и перфорированный ситовый барабан.

Максимальное количество битых зерен $\Delta B = 1,5$ % наблюдалось при открытии заслонки $\delta_3 = 50$ %, что объясняется значительным подпором зерна на выходе из машины и возникающими при этом в зерновой массе напряжениями, близкими к пределу прочности зерновок. При $\delta_3 = 80$ % величина $\Delta B = 0,8$ % и далее снижается. Незначительное разрушение зерен объясняется снижением напряжений в зерновой массе до значений, достаточных для отделения оболочек. Однако они меньше предела прочности зерновок.

Проведенный анализ позволил установить, что технологическая целесообразность процесса шелушения обеспечивается при проценте открытия заслонки на выходе из машины $\delta_3 = 60$ –70 %, при этом значение $C_{\text{о.ш.}}$ составляет 3,2–2,8 %, $\Delta Z = 0,32$ –0,20 %, а ΔB не превышает 0,85 %. В то же время при оценке технологического

оптимума необходимо также брать во внимание и удельные энергозатраты $N_{уд}$ на шелушение с учетом производительности машины Q .

Анализ зависимости (рис. 5) показывает, что с увеличением процента открытия заслонки на выходе из машины производительность возрастает с 0,5 до 1,1 т/ч, а удельные затраты электроэнергии снижаются с 8,7 до 3,5 кВт·ч/т. Оптимальное сочетание этих двух параметров находится в точке пересечения графиков при $\delta_3 = 67\%$, что соответствует $Q = 0,7$ т/ч, $N_{уд} = 5,8$ кВт·ч/т и согласуется с вышеприведенными данными. В этом случае комплексный критерий эффективности, с учетом энергоемкости процесса, $E_2 = 4,5$ кг/кВт·ч.

Обсуждение и заключение

Предложен обобщенный критерий оценки технологической эффективности шелушения зерна пшеницы, учитывающий энергоемкость процесса.

Экспериментально выяснена зависимость локальных критериев эффективности процесса шелушения $C_{о.ш.}$, ΔB и ΔZ от интенсивности процесса обработки зерна в машине.

Установлена и обоснована производительность шелушильной машины $Q = 0,6-0,7$ т/ч, обеспечивающая оптимальные показатели локальных критериев эффективности обработки зерна с учетом удельных энергозатрат $N_{уд}$ на шелушение, $C_{о.ш.} = 3,2-2,8\%$, $\Delta Z = 0,32-0,20\%$, а ΔB не превышает 0,85%. Комплексный критерий эффективности при этом $E_2 = 4,5$ кг/кВт·ч.

Полученные результаты позволяют подобрать оптимальную интенсивность шелушения зерна при различных помолах (сортовой, обойный) и определить для каждого из показателей, входящих в комплексный критерий эффективности E_2 , наиболее приемлемые конструктивные и кинематические параметры шелушильной машины.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кондрок Р. Х., Панкратов Г. Н. Роль шелушения зерна в технологии переработки твердой пшеницы // *Хлебопродукты*. 2013. № 3. С. 44–45. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20230231> (дата обращения: 01.04.2021).
2. Влияние шелушения зерна на параметры процесса его измельчения / О. С. Журба [и др.] // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2012. № 8. С. 18–23. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17972818> (дата обращения: 01.04.2021).
3. Adherence within Biological Multilayered Systems: Development and Application of a Peel Test on Wheat Grain Peripheral Tissues / M. R. Martelli [et al.] // *Journal of Cereal Science*. 2010. Vol. 52, Issue 1. P. 83–89. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.03.007>
4. Electrostatic Separation of Peeling and Gluten from Finely Ground Wheat Grains / M. Remadnia [et al.] // *Particulate Science and Technology*. 2014. Vol. 32, Issue 6. P. 608–615. doi: <https://doi.org/10.1080/02726351.2014.943379>
5. Марьин В. А., Верещагин А. Л., Бычин Н. В. Шелушения зерна гречихи на деках из вязкоупругого материала // *Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова*. 2019. № 2. С. 237–242. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42332683> (дата обращения: 01.04.2021).
6. Study of Efficiency of Peeling Machine with Variable Deck / A. Dmitriev [et al.] // *Proceedings of International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”* (20–22 May 2020). Jelgava, 2020. P. 1053–1058. doi: <https://doi.org/10.22616/erdev.2020.19.tf249>

7. Анисимов А. В., Рудик Ф. Я. Экспериментальное определение оптимальных параметров оборудования для обработки зерна при подготовке к помолу // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 4. С. 594–613. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.594-613>
8. К вопросу шелушения зерна в пневмомеханическом шелушителе / Р. Ш. Лотфуллин [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2016. Т. 11, № 4. С. 84–88. doi: https://doi.org/10.12737/article_592fc7b69bdfd2.43572402
9. Халиуллин Д. Т., Дмитриев А. В. Пневмомеханическое устройство для шелушения зерна // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2016. № 2. С. 85–88. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26747961> (дата обращения: 01.04.2021).
10. Перов А. А. Способы шелушения зерна // Комбикорма. 2010. № 3. С. 45–46. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16543568> (дата обращения: 01.04.2021).
11. Верещинский А. П. Подготовка зерна шелушением на мельницах сортовых помолов пшеницы большой производительности // Хлебопродукты. 2010. № 1. С. 32–33. URL: <https://khlebprod.ru/old/text.php?text=2651&heads=1> (дата обращения: 01.04.2021).
12. Верещинский А. П. Эффективность шелушильно-шлифовальных машин «Каскад» при подготовке зерна пшеницы в сортовых помолах // Хлебопродукты. 2012. № 11. С. 40–41. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18101211> (дата обращения: 01.04.2021).
13. Шелушение увлажненной пшеницы / И. Р. Дударев // Хранение и переработка зерна. 1973. № 2. С. 34–35.
14. Марьин В. А., Верещагин А. Л. Повышение целостности ядра овса при шелушении // Хлебопродукты. 2018. № 7. С. 54–56. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35235264> (дата обращения: 01.04.2021).
15. Маланичев И. В., Нуруллин Э. Г. Компьютерная модель процесса пневмомеханического шелушения зерна гречихи // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2008. Т. 3, № 1. С. 169–171. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11684557> (дата обращения: 01.04.2021).
16. Брасалин С. Н., Минаков А. С. Влияние режима влаготепловой обработки на оценки технологической эффективности шелушения зерна овса // Ползуновский вестник. 2020. № 4. С. 40–43. doi: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2020.04.008>
17. Косцова И. С., Лысенкова А. И. Процесс шелушения твердой пшеницы при получении недробленной крупы и оценка его эффективности // Вестник Могилевского государственного университета продовольствия. 2019. № 2. С. 58–67. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43784396> (дата обращения: 01.04.2021).
18. Горбатовская Н. А. Разработка техники и технологии в переработке зерновых культур для создания продуктов питания повышенной ценности // Механика и технологии. 2013. № 1. С. 59–66. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25411135> (дата обращения: 01.04.2021).
19. Влияние способов увлажнения зерна овса при гидротермической обработке на эффективность его шелушения [Электронный ресурс] / В. В. Беляев [и др.] // Горизонты образования. 2017. Вып. 19. URL: http://edu.secna.ru/media/f/thpz_tez_2017_.pdf (дата обращения: 01.04.2021).
20. Анисимов А. В., Рудик Ф. Я., Загородских Б. П. Совершенствование технологии подготовки зерна к помолу на малых предприятиях // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 4. С. 603–623. doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.603-623>
21. Брасалин С. Н. Оценка технологической эффективности шелушения зерна в крупяном производстве // Хлебопродукты. 2014. № 9. С. 60–62. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21853052> (дата обращения: 01.04.2021).
22. Марьин В. А., Верещагин А. Л., Бычин Н. В. Влияние увлажнения зерна гречихи перед пропариванием на эффективность шелушения // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2016. № 7. С. 163–168. URL: <http://www.asau.ru/vestnik/2016/7/163-168.pdf> (дата обращения: 01.04.2021).
23. Константинов М. М., Румянцев А. А. Комплексный показатель эффективности технологического процесса производства крупы // Вестник Российской академии сельскохозяйственных

наук. 2012. № 6. С. 81–82. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18372731> (дата обращения: 01.04.2021).

24. Брасалин С. Н. Методические аспекты определения коэффициента технологической эффективности шелушения пленчатого зерна // *Хлебопродукты*. 2013. № 5. С. 48–49. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20221348> (дата обращения: 01.04.2021).

25. Шелушильно-сушильная машина : патент 2491124 Российская Федерация / Анисимов А. В., Богданова М. С. № 2012104970 ; заявл. 13.02.2012 ; опубл. 27.08.2013. 7 с. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2491124C1_20130827.pdf (дата обращения: 01.04.2021).

Поступила 16.04.2021; одобрена после рецензирования 20.05.2021; принята к публикации 15.06.2021

Об авторах:

Анисимов Александр Владимирович, доцент кафедры технологий продуктов питания Саратовского ГАУ (410012, Российская Федерация, г. Саратов, Театральная пл., д. 1), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5313-6329>, Researcher ID: E-7817-2018, anisimovaleksan@mail.ru

Рудик Феликс Яковлевич, профессор кафедры технологий продуктов питания Саратовского ГАУ (410012, Российская Федерация, г. Саратов, Театральная пл., д. 1), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0115>, Researcher ID: E-8546-2018, rudik.sgau@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

А. В. Анисимов – подготовка начального текста с последующей доработкой, проведение исследований, анализ исследований, визуализация.

Ф. Я. Рудик – научное руководство, анализ и доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Kondrokov R.Kh., Pankratov G.N. [The Role of Grain Peeling in Durum Wheat Processing]. *Khleboprodukty* = Bakery Products. 2013; (3):44-45. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20230231> (accessed 01.04.2021). (In Russ.)

2. Zhurba O.S., Karamzin A.V., Krikunova L.N., Ryabova S.M. Influence of a Peeling of Grain on Parameters of Process of Its Crushing. *Khranenie i pererabotka selhozsyrira* = Storage and Processing of Farm Products. 2012; (8):18-23. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17972818> (accessed 01.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

3. Martelli M.R., Barron C., Mabilie F., et al. Adherence within Biological Multilayered Systems: Development and Application of a Peel Test on Wheat Grain Peripheral Tissues. *Journal of Cereal Science*. 2010; 52(1):83-89. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.03.007>

4. Remadnia M., Kachi M., Messal S., et al. Electrostatic Separation of Peeling and Gluten from Finely Ground Wheat Grains. *Particulate Science and Technology*. 2014; 32(6):608-615. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1080/02726351.2014.943379>

5. Maryin V.A., Vereshchagin A.L., Bychin N.V. Characteristics of Grain Buckwheats on Viscoelastic Material Decks. *Izvestiya Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova* = Proceedings of the Razzakov Kyrgyz State Technical University. 2019; (2):237-242. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42332683> (accessed 01.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

6. Dmitriev A., Ziganshin B., Khaliullin D., Aleshkin A. Study of Efficiency of Peeling Machine with Variable Deck. In: Proceedings of International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (20-22 May 2020). Jelgava; 2020. p. 1053-1058. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.22616/erdev.2020.19.tf249>

7. Anisimov A.V., Rudik F.Ya. The Experimental Determination of Optimum Parameters of the Equipment for Processing Grain in Preparation for Grinding. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(4):594-613. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.594-613>
8. Lotfullin R., Ibyatov R., Dmitriev A., Ziganshin B. On the Issue of Grain Peeling in Rotor Peelers. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2016; 11(4):84-88. (In Russ., abstract in Eng.) doi: https://doi.org/10.12737/article_592fc7b69bdfd2.43572402
9. Khaliullin D.T., Dmitriev A.V. Pnevmo Mechanical Device for Grain Hulling. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2016; (2):85-88. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26747961> (accessed 01.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
10. Perov A.A. [Ways of Peeling Grain]. *Kombikorma* = Compound Feeds. 2010; (3):45-46. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16543568> (accessed 01.04.2021). (In Russ.)
11. Vereshchinskiy A.P. [Grain Preparation by Husking in High-Capacity Wheat Mills]. *Khleboprodukty* = Bakery Products. 2010; (1):32-33. Available at: <https://khlebprod.ru/old/text.php?text=2651&heads=1> (accessed 01.04.2021). (In Russ.)
12. Vereshchinskiy A.P. [Effectiveness Peeling-Rubbing Machines “Cascade” by Wheat Seed Preparation in High-Quality Grindings]. *Khleboprodukty* = Bakery Products. 2012; (11):40-41. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18101211> (accessed 01.04.2021). (In Russ.)
13. Dudarev I.R. [Pilling of Moistened Wheat]. *Khranenie i pererabotka zerna* = Storage and Processing of Grain. 1973; (2):34-35. (In Russ.)
14. Marin V.A., Vereshchagin A.L. [Increasing the Integrity of the Oat Kernel in Peeling]. *Khleboprodukty* = Bakery Products. 2018; (7):54-56. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35235264> (accessed 01.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
15. Malanichev I.V., Nurullin E.G. [Computer Model of Pneumatic-Mechanical Buckwheat Grain Peeling Process]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Kazan State Agrarian University Bulletin. 2008; 3(1):169-171. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11684557> (accessed 01.04.2021). (In Russ.)
16. Brasalin S.N., Minakov A.S. [Influence of Moisture-Heat Treatment Mode on Assessments of Technological Efficiency of Oat Grain Flaking]. *Polzunovskiy vestnik* = Polzunov’s Bulletin. 2020; (4):40-43. (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2020.04.008>
17. Kostsova I.S., Lysenkova A.I. Peeling Process of Durum Wheat in the Production of Uncrushed Cereals and Evaluation of Its Efficiency. *Vestnik Mogilevskogo gosudarstvennogo universiteta prodovol’stviya* = Bulletin of the Mogilev State University of Food. 2019; (2):58-67. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43784396> (accessed 01.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
18. Gorbatovskaya N.A. Development of Engineering and Technology in Processing of Grain Food for Creating High Value Food Products. *Mekhanika i tekhnologii* = Mechanics and Technology. 2013; (1):59-66. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25411135> (accessed 01.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
19. Belyaev V.V, Ovcharov D.Ye., Anisimova L.V., et al. [Influence of Methods of Oat Grain Moistening at Hydrothermal Treatment on Its Peeling Efficiency]. *Gorizonty obrazovaniya* = Horizons of Education. 2017; 19. Available at: http://edu.secna.ru/media/f/thpz_tez_2017_.pdf (accessed 01.04.2021). (In Russ.)
20. Anisimov A.V., Rudik F.Ya., Zagorodskih B.P. Technological Improvements of Grain Preparation for Milling in Small Enterprises. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(4):603-623. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.603-623>
21. Brasalin S.N. [Assessment of Technological Efficiency of Grain Flaking in Cereal Production]. *Khleboprodukty* = Bakery Products. 2014; (9):60-62. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21853052> (accessed 01.04.2021). (In Russ.)

22. Maryin V.A., Vereshchagin A.L., Bychin N.V. The Effect of Buckwheat Grain Damping Prior to Steaming on Hulling Effectiveness. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University. 2016; (7):163-168. Available at: <http://www.asau.ru/vestnik/2016/7/163-168.pdf> (accessed 01.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

23. Konstantinov M.M., Rummyantsev A.A. Complex Indicator of Efficiency in the Technological Process of Groats Production. *Vestnik Rossiyskoy akademii selskokhozyaystvennykh nauk* = Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 2012; (6):81-82. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18372731> (accessed 01.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

24. Brasalin S.N. [Methodological Aspects of Determining the Coefficient of Technological Efficiency of Flaked Grain Peeling]. *Khleboprodukty* = Bakery Products. 2013; (5):48-49. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20221348> (дата обращения: 01.04.2021).

25. Anisimov A.V., Bogdanova M.S. Shelling Drier. Patent 2,491,124 Russian Federation. 2013 August 27. 7 p. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU2491124C1_20130827.pdf (accessed 01.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

Submitted 16.04.2021; approved after reviewing 20.05.2021; accepted for publication 15.06.2021

About the authors:

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

Feliks Ya. Rudik, Professor of the Chair of Technologies of Food Products, Saratov State Agrarian University (1 Theatre Sq., Saratov 410012, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0115>, Researcher ID: E-8546-2018, rudik.sgau@mail.ru

Contribution of the authors:

A. V. Anisimov – preparation of the initial text with subsequent refinement, research, research analysis, visualization.

F. Ya. Rudik – scientific guidance, analysis and revision of the text.

All authors have read and approved the final manuscript.



Результаты экспериментальных исследований измельчения высушенных волокнистых растительных материалов

С. В. Брагинец, О. Н. Бахчевников*, А. С. Алферов

Аграрный научный центр «Донской»
(г. Зерноград, Российская Федерация)

* oleg-b@list.ru

Аннотация

Введение. Разработка способа энергоэффективного измельчения волокнистого растительного сырья, предотвращающего засорение решет, остается актуальной задачей. Цель исследования – изучить процесс измельчения высушенных волокнистых растительных материалов и оценить влияние режимных характеристик устройства на качество измельчения и энергоёмкость процесса.

Материалы и методы. Экспериментальная установка представляла собой роторный измельчитель. Его рабочими органами являлись чередующиеся ножи и молотки. При движении молотка треугольный вырез его грани создает область пониженного давления, под действием которого происходит отрыв растительных частиц от поверхности решета. Изучалось влияние линейной скорости движения ножей и подачи сырья на фракционный состав измельченного сырья, производительность измельчителя и удельную энергоёмкость измельчения.

Результаты исследования. Установлено, что при увеличении скорости ножей ротора происходит изменение фракционного состава измельченного продукта. Оптимальный диапазон изменения скорости ножей для получения продукта требуемого фракционного состава 55–75 м/с. Увеличение скорости приводит к повышению производительности, но сопровождается ростом удельной энергоёмкости. При постоянной скорости ротора увеличение подачи сырья повышает и производительность измельчителя, но лишь до некоторой величины. После производительность снижается из-за излишнего заполнения сырьем рабочей камеры и засорения решета. Для каждого значения скорости ножей существует оптимальная подача, обеспечивающая максимальную производительность. Высокие значения скорости ножей приводят к значительной энергоёмкости процесса и переизмельчению сырья. Поэтому оптимальный диапазон скорости ножей 55–65 м/с.

Обсуждение и заключение. Эффективное измельчение сырья достигается благодаря более низкой энергоёмкости процесса резания, а также отсутствию засорения решета вследствие отрыва растительных частиц от их поверхности.

Ключевые слова: волокнистые растительные материалы, измельчение, резание, измельчитель, удельная энергоёмкость, линейная скорость ножей, фракционный состав измельченного продукта, пониженное давление воздуха

Благодарности: авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Брагинец С. В., Бахчевников О. Н., Алферов А. С., 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: Брагинец С. В., Бахчевников О. Н., Алферов А. С. Результаты экспериментальных исследований измельчения высушенных волокнистых растительных материалов // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 4. С. 591–608. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.591-608>

Original article

Experimental Data of Grinding Dried Fibrous Plant Materials

S. V. Braginetz, O. N. Bakhchevnikov*, A. S. Alferov
*Agricultural Research Center “Donskoy”
(Zernograd, Russian Federation)*

* oleg-b@list.ru

Abstract

Introduction. Developing a method for energy-efficient grinding of fibrous vegetable raw materials to avoid the clogging of grids remains an urgent task. The aim of the research is to study the process of grinding dried fibrous plant materials and to estimate the influence of the device operating characteristics on the quality of grinding and the process energy intensity.

Materials and Methods. The experimental apparatus is a rotor grinder. Its working bodies are alternate knives and hammers. When a hammer is in motion, its triangle side creates the reduced pressure area. There was studied the influence of the linear velocities of knife motion and of feed of raw materials on fractional composition of the grinded materials, grinder productivity, and grinding specific energy capacity.

Results. It is found that the change in the fractional composition of the grinded product occurs when the speed of the rotor knives increases. Optimal range of knife speed for producing the product of the required fractional composition is 55–75 m/s. The increase in the speed leads to increasing productivity, but is accompanied by the growth of specific power intensity. If the rotor speed is constant, the increase of raw material feed increases the grinder productivity, but only up to a certain value. After that, the productivity decreases because of excessive filling of the working chamber with raw materials and clogging of the grates. For each value of the knife speed, there is an optimal feed that ensures the maximum productivity. High values of knife speed lead to significant energy intensity of the process and overgrinding of raw materials. Therefore, the optimal range of knife speed is 55–65 m/s.

Discussion and Conclusion. Effective grinding of raw materials is achieved through lower energy capacity of grinding process and absence of grate clogs resulted from separating particles from the surface of plants to be grinded.

Keywords: fibrous plant materials, grinding, cutting, grinder, specific energy capacity, blades linear velocity, fractional content the grinded product, low air pressure

Acknowledgments: The authors are grateful to the editors and reviewers for their attentive attitude to the article and for the indicated remarks, which improved its quality.

The authors declare no conflict of interest.

For citation: Braginetz S.V., Bakhchevnikov O.N., Alferov A.S. Experimental Data of Grinding Dried Fibrous Plant Materials. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(4):591-608. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.591-608>

Введение

В настоящее время актуальной проблемой является организация малоэнергоемкого измельчения волокнистого

растительного сырья, а именно высушенной листостебельной массы злаков и трав, для последующего приготовления кормов [1]. В частности, в процессе

приготовления витаминно-травяной муки при подготовке высушенной зеленой массы к гранулированию ее необходимо измельчить до частиц с размером меньше диаметра отверстий матрицы гранулятора [2]. Кроме того, измельчение листьев и стеблей зеленых растений является необходимой технологической операцией при производстве биотоплива [3; 4].

Основным техническим средством, применяемым в сельхозпредприятиях для измельчения растительного сырья, например зерна, являются молотковые дробилки, в том числе дробилки с вертикальным валом ротора [5]. Недостатком молотковых дробилок, в частности вертикальных, является то, что в них невозможно эффективно измельчать растительные волокнистые материалы: листья и стебли кормовых трав [6]. Обусловлено это тем, что сила удара молотков недостаточна, чтобы измельчить гибкие частицы листостебельной массы и разорвать содержащиеся в них волокна [7; 8]. Кроме того, недоизмельченные листья и стебли налипают на молотки, снижая силу удара, и засоряют отверстия решет, препятствуя выводу из рабочей камеры измельченного продукта [9]. Это приводит к излишнему накоплению в ней уже измельченных и недоизмельченных частиц растений, что фактически останавливает процесс измельчения.

Эти негативные явления во многом обусловлены тем, что частицы вегетативной массы растений, особенно высушенные, имея малую массу и большую площадь поверхности, обладают низкой скоростью витания [10]. Из-за этого ударный импульс молотка дробилки не может разрушить частицу и отбросить на решето со скоростью, достаточной для ее разрушения [11].

В измельчителях рабочим органом являются ножи, поэтому процесс измельчения протекает более эффективно. Однако не решена проблема

очистки решет от недоизмельченных растительных частиц и, соответственно, своевременного удаления уже измельченного сырья из рабочей камеры [12]. Помимо этого, для эффективного измельчения желательнее сохранить не только усилие резания, но и ударное воздействие на измельчаемые частицы [13–15].

Перечисленные выше негативные факторы приводят к значительному увеличению энергоемкости процесса измельчения волокнистого растительного сырья, в частности люцерны и других трав, по сравнению с зерном [16]. В то же время для сельхозпредприятий, заготавливающих вегетативную массу растений для использования в качестве корма, желательнее, чтобы энергоемкость ее измельчения не превышала энергоемкость измельчения фуражного зерна, то есть 10 кВт·ч/т [5].

Оснащение измельчителей встроенными вентиляторами частично позволяет решить проблему очистки решет, но приводит к значительному увеличению энергоемкости процесса и усложнению конструкции машин [17].

Помимо этого, технология, применяемая во многих хозяйствах, предусматривает разделение зеленой массы на листовую и стеблевую фракции и их отдельное измельчение. Эта операция усложняет технологический процесс и увеличивает его энергоемкость [18; 19]. Поэтому желательнее использовать способ, предусматривающий измельчение листостебельной массы без разделения на фракции.

Все это вызвало необходимость разработать новый способ измельчения волокнистого растительного сырья. Определены основные предпосылки для разработки нового способа измельчения растений. Во-первых, замена в конструкции измельчителя части молотков ножами позволит частично заменить ударное воздействие

на резание, во-вторых, создание области пониженного давления воздуха позади движущихся рабочих органов обеспечит условия для предотвращения засорения отверстий решет.

Цель исследования – изучить процесс измельчения высушенных волокнистых растительных материалов и оценить влияние режимных характеристик устройства на качество измельчения и энергоёмкость процесса.

Обзор литературы

Опыт эксплуатации измельчающих устройств показал, что проблема измельчения волокнистого растительного сырья, в том числе стебельчатых кормов, еще не полностью решена [11; 17]. С. Ф. Вольвак с соавторами исследовали процесс измельчения стебельчатых кормов измельчителем с комбинированными ножами и пришли к важному выводу, что для снижения энергоёмкости и получения качественного измельченного продукта необходимо, помимо усилия резания, ударное воздействие на сырье [15; 20; 21].

А. А. Вертий с коллегами занимались усовершенствованием технологии измельчения грубых стебельчатых кормов и установили, что эффективность этого процесса зависит от продольного расщепления растительных волокон, а основными параметрами, влияющими на нее, являются степень измельчения и удельная энергоёмкость [1; 22]. Была разработана математическая модель работы измельчителя кормов [7]. С. В. Вендин и соавторы обосновали конструктивные параметры ножей при резании плоского слоя растительного продукта [23]. Л. З. Бестаев разработал метод качественной оценки измельченных стебельчатых кормов, который может быть использован при совершенствовании измельчающих аппаратов [24].

Д. Т. Абилжанов и Т. Абилжанулы обосновали способ разделения зеленых

кормов на листовую и стеблевую фракции с последующим раздельным измельчением, что, по нашему мнению, усложняет технологию и увеличивает ее энергоёмкость [18; 19; 25].

Анализ публикаций отечественных ученых показал, что основное внимание в своих исследованиях они уделяют измельчению грубых стебельчатых кормов, а конкретно их стеблей, но вопрос измельчения кормовых трав, таких как люцерна, и их листьев остается недостаточно изученным.

Изучение иностранных источников показало, что основное внимание в исследованиях уделяется вопросу измельчения стеблей растений способами резания и удара.

К. Иггинатхан и соавторы изучали измельчение стеблей пшеницы вращающимися сеточными ножами и установили оптимальные режимы их работы [13]. Н. Чеванан и коллеги изучили влияние параметров измельчения стеблей ножами на объемную плотность измельченного продукта [26].

Другие ученые исследовали измельчение стеблей (соломы) зерновых культур в молотковой дробилке [12]. Они установили, что оно требует значительных затрат энергии. Например, энергоёмкость измельчения стеблей пшеницы до размера частиц менее 3,2 мм составляет 11 кВт·ч/т. Группа ученых во главе с Дж. Ш. Тумулуру описала ударное измельчение стеблей зерновых культур и установила, что ударное воздействие необходимо дополнить усилием резания [9].

К сожалению, недостаточно научных работ, посвященных измельчению волокнистых растительных материалов. Из имеющихся публикаций следует отметить статью А. Довгялло, который разработал математическую модель процесса резания волокнистых материалов, описывающую зависимость усилия резания от скорости рабочего органа [27].

Для целей производства кормов в сельхозпредприятиях наибольший интерес представляют исследования, посвященные измельчению кормовых трав, особенно люцерны. Л. Г. Табил – младший и С. Сохансандж изучили влияние процесса измельчения люцерны на объемную плотность получаемого продукта [28].

Большой вклад в исследования процесса измельчения зеленой массы люцерны внесли иранские ученые З. Горбани, А. А. Массуми и А. Хеммат [8; 14; 16; 29]. Они определили энергоемкость процесса измельчения нарезанной люцерны в молотковой дробилке в зависимости от различных параметров [8; 14]. Установлено, что на энергоемкость измельчения люцерны в наибольшей степени влияет плотность сырья, причем потребление электроэнергии увеличивается при использовании решет с более мелкими отверстиями [16; 29]. Вопросы измельчения растительного сырья рассматриваются и в публикациях, посвященных производству биотоплива, но они не учитывают специфику приготовления кормов [4; 11].

На основе изложенного сделано заключение, что вопрос энергоэффективного измельчения волокнистых растительных материалов еще недостаточно изучен. На основе имеющихся данных невозможно обосновать рациональные параметры этого процесса и конструктивные параметры устройства для его осуществления.

Основой для разработки способа измельчения волокнистого сырья и устройства для его осуществления, по нашему мнению, могут служить результаты работ С. Ф. Вольвака [15; 20; 21] и Дж. Ш. Тумулуру [9]. В них обоснована необходимость сочетания ударного воздействия на растительное сырье и резания в рамках одной машины. В качестве теоретической базы для наших исследований при обосновании

оптимальной скорости резания была использована математическая модель А. Довгялло [27]. Для выявления параметров, характеризующих качество измельчения, наиболее подходит метод качественной оценки, предложенный Л. З. Бестаевым [24].

Таким образом, анализ литературных источников подтвердил необходимость разработки нового способа измельчения волокнистого растительного сырья и устройства для его осуществления.

Материалы и методы

Оригинальная экспериментальная установка (рис. 1) представляла собой роторный измельчитель волокнистых растительных материалов [30]. Измельчитель включает цилиндрический корпус, содержащий рабочую камеру 1 и ротор. Рабочая камера образована цилиндрическим вертикальным и плоским горизонтальным решетками. В верхней части корпуса размещен загрузочный бункер 3 с питающим шнековым транспортером 5. В нижней части корпуса имеется конусообразная наклонная камера с выгрузной горловиной 7.

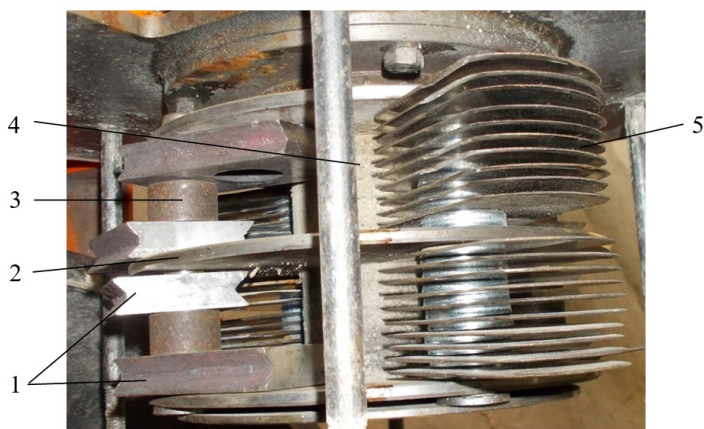
Ротор (рис. 2) состоит из установленной на вертикальном валу ступицы 4 и закрепленных на ней параллельных дисков 2. Молотки 1 и ножи 5 шарнирно закреплены в несколько ярусов посредством осей 3, продетых сквозь имеющиеся в них и в дисках отверстия. Ротор включает по два набора молотков и ножей. Молотки и ножи размещены под углом 90° друг к другу, чередуясь вдоль окружности диска.

Молоток представляет собой прямоугольную пластину, боковые грани которой срезаны под углом 45° с верхней и нижней сторон по направлению к середине грани и образуют треугольный в сечении вырез. Нож – это пластина, торцевая поверхность которой выполнена в форме кругового сегмента с двусторонней режущей кромкой.



Р и с. 1. Экспериментальное устройство (общий вид): 1 – рабочая камера; 2 – привод ротора; 3 – загрузочный бункер; 4 – привод питающего шнекового транспортера; 5 – питающий шнековый транспортер; 6 – рама; 7 – выгрузная горловина

F i g 1. Experimental apparatus (general view): 1 – working chamber; 2 – rotor drive; 3 – load bunker; 4 – drive of the feeding screw conveyor; 5 – feeding screw conveyor; 6 – frame; 7 – unloading neck



Р и с. 2. Ротор измельчителя волокнистых растительных материалов: 1 – молотки; 2 – диск; 3 – ось; 4 – вал со ступицей; 5 – ножи

F i g. 2. Rotor of a fibrous plant materials grinder: 1 – hammers; 2 – disk; 3 – axis; 4 – shaft with a hub; 5 – knives

В процессе работы измельчителя высушенная листостебельная масса через загрузочный бункер и шнековый питатель поступает в рабочую камеру, где при движении сверху вниз поочередно подвергается действию молотков и ножей вращающегося ротора.

При столкновении с передней по направлению вращения ротора боковой гранью молотка частицы растений подвергаются ударному воздействию, из-за которого они перемещаются к поверхности вертикального решета. Вырез в передней по направлению вращения ротора боковой

границы молотка должен препятствовать налипанию частиц растительных материалов на его поверхность. При дальнейшем движении молотка треугольный вырез его задней боковой грани создает область пониженного давления воздуха, под действием которого происходит отрыв растительных частиц от поверхности решета и их перемещение в область действия ножей. Нож разрезает растительные частицы своей режущей кромкой. После этого процесс воздействия на них молотков и ножей многократно повторяется до тех пор, пока растительные частицы не приобретут размер меньший, чем диаметр отверстий решета. Затем они покинут камеру измельчения и через выгрузную горловину будут выведены из установки.

В качестве объекта измельчения использовали листостебельную массу люцерны изменчивой (*Medicago varia* Martyn) сорта Голубка первого укоса с выраженным разделением на стебельную и листовую фракции, она была убрана в Ростовской области в конце мая 2021 г. [31]. Она имела начальную влажность 75–80 % [32]. После конвективной сушки масса люцерны имела влажность 10–15 %.

В качестве факторов, влияющих на процесс измельчения растительного сырья, были выбраны следующие:

– линейная скорость грани ножа V в точке, ближайшей к решету измельчителя, то есть наиболее удаленной от

оси вращения ротора (параметр, зависящий от частоты вращения ротора и его рабочего диаметра), м/с;

– подача сырья в измельчитель Q , кг/ч. [24].

Для определения оптимальных параметров процесса измельчения вегетативной массы был реализован полный факторный эксперимент для двух переменных, варьируемых на трех уровнях (табл.).

В качестве критериев оптимизации были выбраны следующие: y_1 – неравномерность фракционного состава измельченной растительной массы по размеру ее частиц, %; y_2 – удельная энергоемкость процесса измельчения, кВт·ч/т; y_3 – производительность измельчителя, кг/ч.

Неравномерность фракционного состава измельченного сырья характеризует доли его частиц, размер которых соответствует либо не соответствует технологическим требованиям. Фракционный состав измельченного сырья определяли с помощью решетчатого отсева, для чего использовали решета с круглыми отверстиями диаметром 1,3, 2,5 и 4,0 мм. Отсортированные по размеру частиц фракции готового продукта (остаток на решетках и сборном дне) взвешивали и вычисляли их долю в общей массе. Таким образом измельченный продукт разделяли на 4 фракции по размеру частиц: более 4 мм; 2,5–4,0 мм; 1,3–2,5 мм; менее 1,3 мм.

Т а б л и ц а

T a b l e

Уровни варьирования факторов эксперимента
Grades of an experiment factors variation

Факторы / Factors	Уровни варьирования / Variation grades		
	нижний / lower	основной / basic	верхний / upper
Линейная скорость ножа V , м/с / Linear velocity of knives V , m/s	41,4	69	96,6
Подача сырья Q , кг/ч / Raw materials feed Q , kg/h	20,0	59	100,0

В ходе экспериментов в загрузочный бункер измельчителя вручную загружали фиксированную по массе порцию сырья.

Производительность измельчителя q определяли посредством измерения продолжительности измельчения фиксированной по массе порции сырья. Длительность измельчения фиксированной навески сырья измеряли с помощью ленточного транспортера, размещенного под выгрузной горловиной измельчителя, с постоянной скоростью движения ленты 0,5 м/мин.

Удельную энергоёмкость процесса измельчения W определяли как общую энергоёмкость, отнесенную к массе измельченного сырья. Энергоёмкость процесса определяли посредством пересчета показаний частотного преобразователя по силе тока и напряжению.

Каждый опыт выполняли в трех повторностях. Результаты измерений были представлены как «среднее значение \pm среднеквадратичное отклонение». Достоверность различий средних определяли методом однофакторного дисперсионного анализа с применением апостериорного анализа по критерию Тьюки при $p < 0,05$.

Частоту вращения ротора и, соответственно, линейную скорость грани ножа V изменяли частотным преобразователем DELTA VFD-075E путем изменения частоты тока асинхронного электродвигателя. Линейную скорость ножа измельчителя определяли как величину, производную от частоты вращения ротора. Линейную скорость грани ножа изменяли ступенчато с шагом 13,8 м/с. Частоту вращения вала питающего шнекового транспортера изменяли аналогично. Подачу сырья в измельчитель ступенчато варьировали, меняя частоту вращения вала питающего шнекового транспортера.

В ходе опытов по определению зависимости производительности измель-

чителя от линейной скорости ножей ротора при увеличении частоты вращения ротора увеличивали и подачу сырья. При определении зависимости удельной энергоёмкости измельчения от линейной скорости ножей ротора подача сырья была постоянной. Зависимость производительности измельчителя от подачи сырья определяли при постоянной линейной скорости ножей ротора.

Также в ходе экспериментов контролировали насыпную плотность сырья и измельченного продукта. В среднем исходная плотность сырья составила 53,2 кг/м³, плотность после измельчения 120 кг/м³.

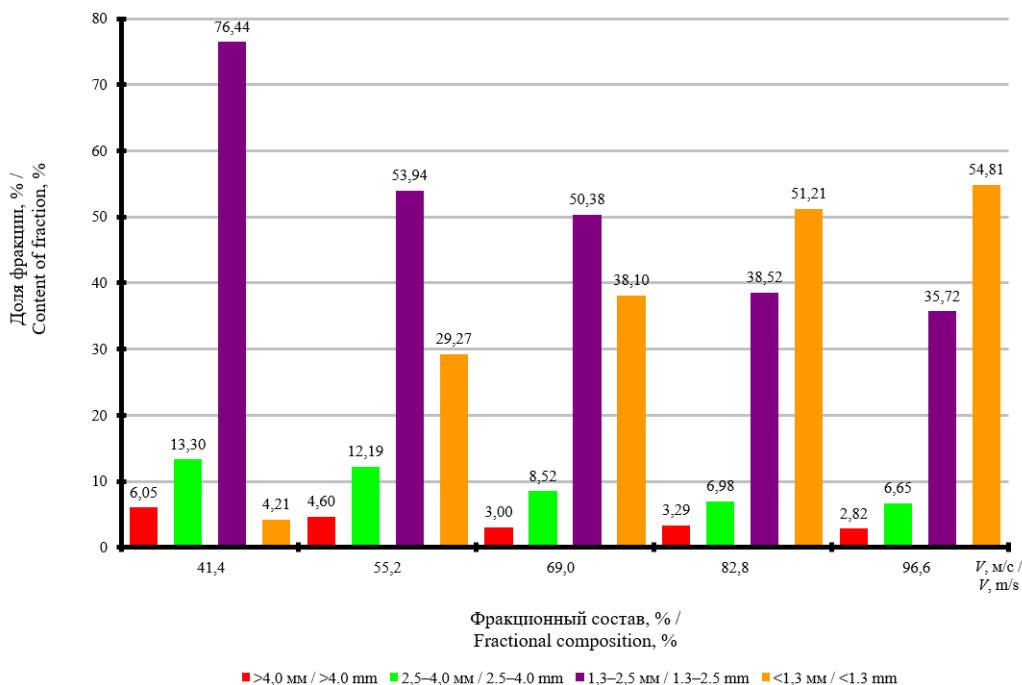
Результаты исследования

В результате выполненных исследований установлено, что процесс измельчения волокнистого растительного сырья (высушенная листостебельная масса люцерны) в экспериментальной установке протекает успешно и дает удовлетворительные результаты.

В результате обработки экспериментальных данных получена графическая зависимость фракционного состава измельченного продукта (вегетативная масса люцерны) от линейной скорости ножей ротора (рис. 3).

Установлено, что при увеличении линейной скорости ножей ротора происходит изменение фракционного состава измельченного продукта. В целом происходит увеличение доли мелкой фракции (менее 1,3 мм) и сокращение доли крупных частиц (более 1,3 мм). Если при минимальной скорости ножей 41,4 м/с основную долю в измельченной зеленой массе составляют частицы размером 1,3–2,5 мм (76,44 %), то при максимальной скорости 96,6 м/с большую часть составляют частицы размером менее 1,3 мм (54,81 %).

На графике (рис. 4) можно наглядно проследить изменение доли каждой из фракций при увеличении линейной скорости ножей ротора. Количество частиц



Р и с. 3. Зависимость фракционного состава измельченного продукта (высушенная вегетативная масса люцерны) от линейной скорости ножей ротора V (гистограмма)

F i g. 3. Relationship of a fractional composition of the grinded product (dried vegetative mass of an alfalfa) on the linear velocity of knives of a rotor V (histogram)

наиболее крупной фракции (более 4 мм) снижается с 6,05 до 2,82 %, уменьшаясь более чем в два раза. Количество частиц размером 2,5–4,0 мм снижается с 13,30 до 6,65 %, то есть в 2 раза. Количество частиц размером 1,3–2,5 мм снижается с 76,44 до 35,72 %, то есть в 2,14 раза. Напротив, доля частиц размером менее 1,3 мм увеличивается с 4,21 до 54,81 %, то есть в 13 раз.

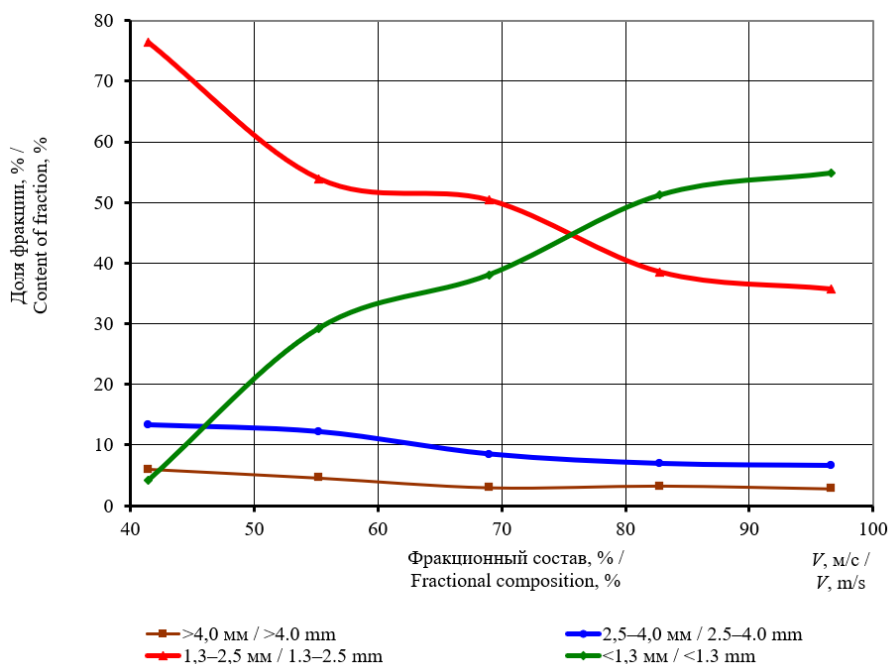
Анализ экспериментальных данных показывает, что при увеличении скорости ротора доля мелкой фракции (менее 1,3 мм) в основном возрастает за счет снижения содержания фракции 1,3–2,5 мм.

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что увеличение частоты вращения ротора и, соответственно, линейной скорости ножей

способствует лучшему измельчению растительной массы.

Для лучшего переваривания кормов предпочтителен более мелкий размер частиц измельченного сырья. Но для гранулирования растительного сырья необходимо, чтобы доля мелких частиц размером менее 1,3 мм не превышала 40 %. Исходя из этого, оптимальный фракционный состав измельченного растительного сырья был получен при линейной скорости ножей 69 м/с (рис. 3). Анализ графика (рис. 4) показывает, что оптимальный диапазон изменения скорости для получения корма требуемого фракционного состава 55–75 м/с.

Результаты экспериментов показали, что производительность измельчителя зависит от линейной скорости



Р и с. 4. Зависимость фракционного состава измельченного продукта (высушенная вегетативная масса люцерны) от линейной скорости ножей ротора V (график)

F i g. 4. Relationship of a fractional composition of the grinded product (dried vegetative mass of an alfalfa) on the linear velocity of knives of a rotor V (diagram)

ножей ротора (рис. 5). Как видно из графика (рис. 5), зависимость производительности измельчителя от линейной скорости ножей ротора имеет практически линейный характер. Увеличение скорости ротора приводит к повышению производительности (при условии обеспечения соответствующей подачи сырья).

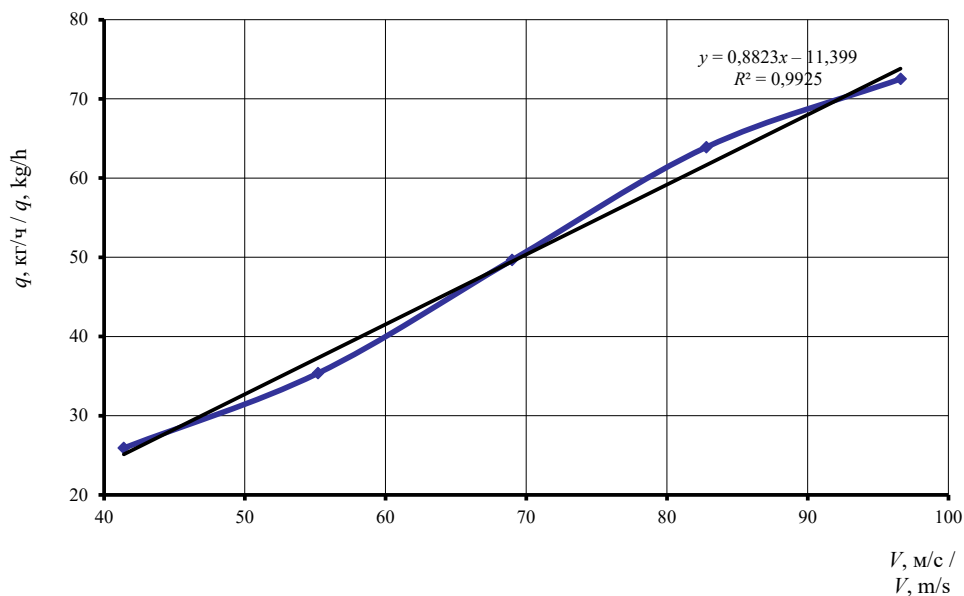
Однако происходящее при повышении скорости движения рабочих органов увеличение производительности сопровождается и ростом энергоемкости процесса измельчения (рис. 6).

Как видно из графика (рис. 6), зависимость удельной энергоемкости измельчения от линейной скорости ножей ротора так же близка к линейной. Анализ этого графика показывает, что с точки зрения энергоемкости процесса

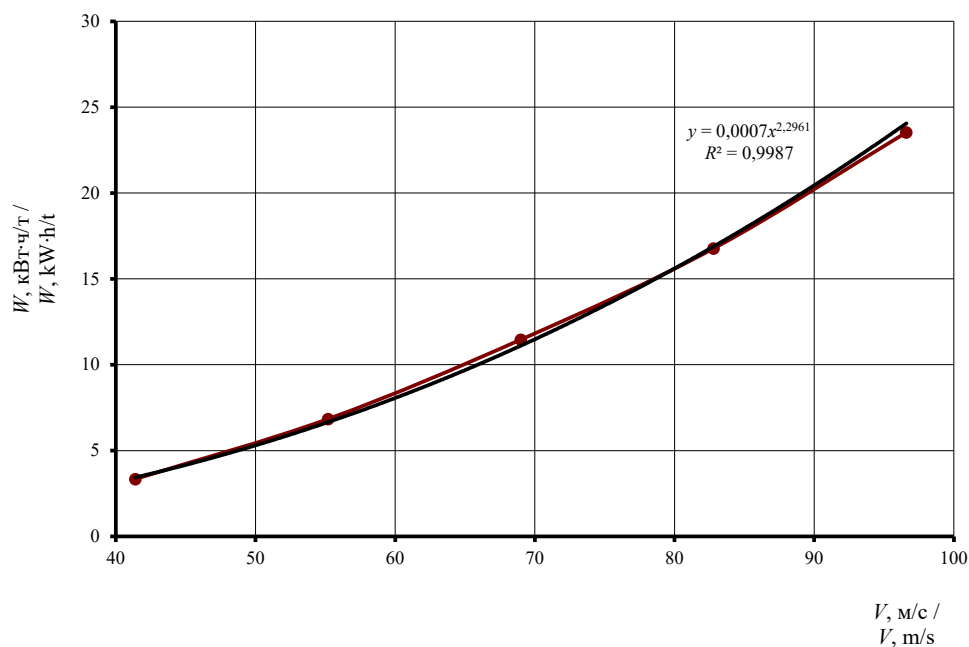
оптимальный диапазон изменения скорости ножей для получения корма требуемого фракционного состава 55–65 м/с.

При постоянной скорости ротора увеличение подачи сырья повышает и производительность измельчителя, но лишь до некоторой величины, после которой наблюдается снижение производительности (рис. 7).

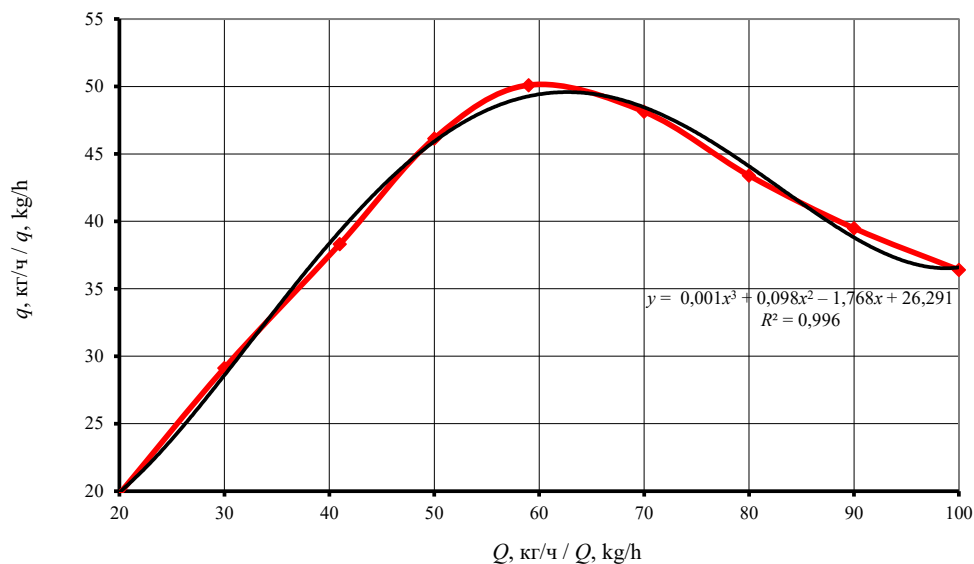
Снижение производительности в этом случае обусловлено излишним заполнением рабочей камеры измельчителя и засорением отверстий его решет недоизмельченным сырьем. Еще одной причиной снижения производительности является то, что при постоянной скорости движения рабочих органов чрезмерное увеличение подачи сырья приводит к тому, что уже не обеспечивается отрыв растительных частиц



Р и с. 5. Зависимость производительности измельчителя q от линейной скорости ножей ротора V
 F i g. 5. Relationship of a grinder productivity q on the linear velocity of knives of a rotor V



Р и с. 6. Зависимость удельной энергоёмкости измельчения W от линейной скорости ножей ротора V
 F i g. 6. Relationship of a specific energy capacity of grinding W on the linear velocity of knives of a rotor V



Р и с. 7. Зависимость производительности измельчителя q от подачи сырья Q (при линейной скорости ножей $V = 69$ м/с)

F i g. 7. Relationship of a grinder productivity q on raw materials feed Q (in case of the linear velocity of knives of rotor $V = 69$ m/s)

от поверхности решета областью пониженного давления, создаваемой молотками.

На основе экспериментальных данных был выполнен двухфакторный анализ зависимости производительности измельчителя от подачи сырья и линейной скорости ножей (рис. 8). Анализ показал, что при увеличении линейной скорости ножей ротора повышается и производительность измельчителя при условии одновременного увеличения подачи сырья. При постоянной скорости ножей и увеличении подачи повышение производительности измельчителя происходит лишь до некоторого максимального значения, после достижения которого происходит снижение производительности.

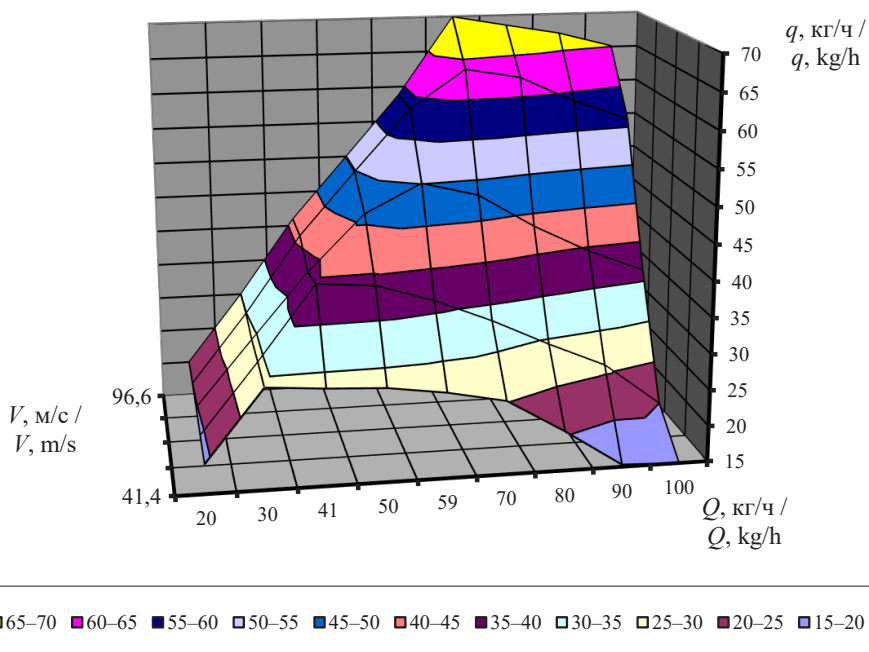
Таким образом, для каждого значения линейной скорости ножей ротора существует оптимальная величина подачи сырья, обеспечивающая максимальную производительность измельчителя. В то же время для каждого

значения подачи сырья максимальная производительность обеспечивается при максимальной линейной скорости ножей.

Однако, как было показано ранее, высокие значения скорости ротора приводят к высокой энергоемкости процесса измельчения. Кроме того, при максимальных значениях скорости ножей ротора происходит переизмельчение сырья, что негативно сказывается на качестве кормов. Поэтому оптимальный диапазон линейной скорости ножей для измельчения высушенной зеленой массы составляет 55–65 м/с.

Обсуждение и заключение

В результате экспериментальных исследований установлено, что процесс измельчения волокнистого растительного сырья протекает успешно и дает удовлетворительные результаты. При соблюдении оптимального диапазона линейной скорости ножей 55–65 м/с получается измельченный продукт требуемого гранулометрического состава



Р и с. 8. Зависимость производительности измельчителя q от подачи сырья Q и линейной скорости ножей ротора V

F i g. 8. Relationship of a grinder productivity q on feed of raw materials Q and the linear velocity of knives of a rotor V

с низкой энергоемкостью, не превышающей 10 кВт·ч/т.

Установлено, что эффективное измельчение высушенного волокнистого растительного сырья в экспериментальной установке достигается за счет высокой скорости движения ножей и более низкой энергоемкости процесса резания по сравнению с дроблением и истиранием. Также повышению эффективности процесса измельчения способствует отсутствие засорения отверстий решетки. Этот эффект достигается благодаря отрыву растительных частиц от поверхности вертикального решета. Отрыв

происходит при попадании частиц в область пониженного давления воздуха. Эта область создается при движении молотка вырезом его задней грани.

Применение разработанного способа измельчения волокнистого растительного сырья и соответствующего роторного измельчителя позволит организовать эффективное измельчение высушенной листостебельной массы, что особенно важно при приготовлении кормов на основе травяной муки в сельхозпредприятиях, так как обеспечивает низкую энергоемкость выполнения этой технологической операции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Демченко В. Н., Вертий А. А. Повышение эффективности процесса измельчения грубых и стебельчатых кормов // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. 2011. № 1–3. С. 74–79. URL: <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdatu/pdf1t3/11DVNRSF.pdf> (дата обращения: 20.06.2021).

2. Костомахин Н. М., Костомахин М. Н. Традиционные технологии производства травяной муки // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2015. № 4. С. 14–28. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24258297&> (дата обращения: 20.06.2021).
3. Обзор: производство биотоплива из биомассы растений и водорослей / Р. А. Волошин [и др.] // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). 2019. № 7–9. С. 12–31. doi: <https://doi.org/10.15518/isjaee.2019.07-09.012-031>
4. Comminution of Dry Lignocellulosic Biomass, a Review: Part I. From Fundamental Mechanisms to Milling Behaviour [Электронный ресурс] / С. Mayer-Laigle [et al.] // Bioengineering. 2018. Vol. 5, Issue 2. doi: <https://doi.org/10.3390/bioengineering5020041>
5. Садов В. В., Сорокин С. А. Повышение эффективности молотковой дробилки с вертикальным валом при измельчении зерновых компонентов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018. № 11. С. 86–92. URL: <http://www.asau.ru/vestnik/2018/11/086-092.pdf> (дата обращения: 20.06.2021).
6. Исследование рабочего процесса молотковой дробилки с вертикальным валом / А. В. Смоленский [и др.] // Техника в сельском хозяйстве. 2012. № 5. С. 20–21. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20344403> (дата обращения: 20.06.2021).
7. Гулевский В. А., Вертий А. А. Математическое моделирование работы измельчителя кормов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2018. № 3. С. 120–128. doi: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2018.3.120>
8. Ghorbani Z., Masoumi A. A., Hemmat A. Specific Energy Consumption for Reducing the Size of Alfalfa Chops Using a Hammer Mill // Biosystems Engineering. 2010. Vol. 105, Issue 1. P. 34–40. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.09.006>
9. Grinding Energy and Physical Properties of Chopped and Hammer-Milled Barley, Wheat, Oat, and Canola Straws / J. S. Tumuluru [et al.] // Biomass and Bioenergy. 2014. Vol. 60. P. 58–67. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.10.011>
10. Разработка и исследование машины для воздушной очистки семян трав и зерна / П. А. Савиных [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2021. Т. 16, № 1. С. 84–89. doi: <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2021-84-89>
11. Energy Consumption at Size Reduction of Lignocellulose Biomass for Bioenergy [Электронный ресурс] / G. Moiceanu [et al.] // Sustainability. 2019. Vol. 11, Issue 9. doi: <https://doi.org/10.3390/su11092477>
12. Mani S., Tabil L. G., Sokhansanj S. Grinding Performance and Physical Properties of Wheat and Barley Straws, Corn Stover and Switchgrass // Biomass and Bioenergy. 2004. Vol. 27, Issue 4. P. 339–352. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.03.007>
13. Size Reduction of High- and Low-Moisture Corn Stalks by Linear Knife Grid System / C. Igathinathane [et al.] // Biomass and Bioenergy. 2009. Vol. 33, Issue 4. P. 547–557. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.09.004>
14. Ghorbani Z., Hemmat A., Masoumi A. A. Physical and Mechanical Properties of Alfalfa Grind as Affected by Particle Size and Moisture Content // Journal of Agricultural Science and Technology. 2012. Vol. 14, Issue 1. P. 65–76. URL: https://www.researchgate.net/publication/265877094_Physical_and_Mechanical_Properties_of_Alfalfa_Grind_as_Affected_by_Particle_Size_and_Moisture_Content (дата обращения: 20.06.2021).
15. Вольвак С. Ф., Бахарев Д. Н., Вертий А. А. Теоретические исследования измельчителя стебельчатых кормов с шарнирно подвешенными комбинированными ножами // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2016. № 3. С. 24–34. URL: http://bsaa.edu.ru/InfResource/library/Journal_3_2016.pdf#page=25 (дата обращения: 20.06.2021).
16. Prediction of Specific Energy Consumption in Milling Process Using Some Physical and Mechanical Properties of Alfalfa Grind / Z. Ghorbani [et al.] // Australian Journal of Crop Science. 2013. Vol. 7, Issue 10. P. 1449–1455. URL: http://www.cropj.com/ghorbani_7_10_2013_1449_1455.pdf (дата обращения: 20.06.2021).
17. Булатов С. Ю. Повышение эффективности приготовления кормов путем совершенствования конструкции и технологического процесса кормоприготовительных машин // Пермский аграрный вестник. 2017. № 1. С. 55–64. URL: http://agrovest.psa.ru/?smd_process_download=1&download_id=4253#page=56 (дата обращения: 20.06.2021).
18. Обоснование диаметра отверстий решета сепаратора листовой части трав / Д. Т. Абилжанов [и др.] // Техника и оборудование для села. 2017. № 8. С. 24–27. URL: <https://rosinformagrotech.>

ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/send/56-arkhiv-zhurnala-za-2017/445-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-avgust-8-242-2017-g (дата обращения: 20.06.2021).

19. Абижанулы Т., Абижанов Д. Т. Определение скорости перемещения предварительно измельченного сена по поверхности решета сепаратора листовой части трав // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 4. С. 53–57. URL: <https://tismash.mospolytech.ru/upload/files/tismash/Тракторы и сельхозмашины №4 2020.pdf> (дата обращения: 20.06.2021).

20. Теоретическое обоснование затрат мощности на измельчение стебельчатых кормов измельчителем с шарнирно подвешенными комбинированными ножами / С. Ф. Вольвак [и др.] // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2017. № 1. С. 23–32. URL: [http://bsaa.edu.ru/InfResource/library/Journal%201\(13\)%202017.pdf#page=23](http://bsaa.edu.ru/InfResource/library/Journal%201(13)%202017.pdf#page=23) (дата обращения: 20.06.2021).

21. Вольвак С. Ф., Шаповалов В. И. Анализ математической модели технологического процесса измельчения стебельчатых кормов // Известия Международной академии аграрного образования. 2015. Т. 1. С. 90–93. URL: <https://maorus.ru/assets/files/journals/izvestiya-maao-vypusk-25-tom-1.pdf#page=90> (дата обращения: 20.06.2021).

22. Гулевский В. А., Вергий А. А. Усовершенствование технологии измельчения грубых стебельчатых кормов измельчителем с шарнирно подвешенными комбинированными ножами // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2019. Т. 12, № 1. С. 73–81. doi: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2019.1.73>

23. Обоснование конструктивных параметров ножей при резании плоского слоя продукта / С. В. Вендин [и др.] // Вестник ВНИМЖ. 2019. № 4. С. 101–104. URL: <https://clck.ru/YjdcU> (дата обращения: 20.06.2021).

24. Бестаев Л. З. Комплексная оценка показателей качества измельчения стебельчатых кормов // Инновации в сельском хозяйстве. 2014. № 2. С. 49–53. URL: <https://journal.viesh.ru/wp-content/uploads/2018/04/insel7.pdf> (дата обращения: 20.06.2021).

25. Абижанов Д. Т., Уметалиева Ч. Т., Абижанулы Т. Определение скорости и ускорения решета сепаратора мелкой листовой части трав // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2019. Т. 19, № 12. С. 72–76. URL: <http://vestnik.krsu.edu.kg/archive/70/2858> (дата обращения: 20.06.2021).

26. Bulk Density and Compaction Behavior of Knife Mill Chopped Switchgrass, Wheat Straw, and Corn Stover / N. Chevanan [et al.] // Bioresource Technology. 2010. Vol. 101, Issue 1. P. 207–214. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.083>

27. Dowgiallo A. Cutting Force of Fibrous Materials // Journal of Food Engineering. 2005. Vol. 66, Issue 1. P. 57–61. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.02.034>

28. Tabil Jr. L. G., Sokhansanj S. Bulk Properties of Alfalfa Grind in Relation to Its Compaction Characteristics // Applied Engineering in Agriculture. 1997. Vol. 13, Issue 4. P. 499–505. URL: <https://www.academia.edu/download/32827663/97.001.pdf> (дата обращения: 20.06.2021).

29. Principal Component Modeling of Energy Consumption and Some Physical-Mechanical Properties of Alfalfa Grind / Z. Ghorbani [et al.] // Australian Journal of Crop Science. 2011. Vol. 5, Issue 8. P. 932–938. URL: http://www.cropj.com/ghorbani_5_8_2011_932_938.pdf (дата обращения: 20.06.2021).

30. Измельчитель волокнистых растительных материалов : патент на полезную модель 205978 Российская Федерация / Пахомов В. И. [и др.]. № 2021102128 ; заявл. 29.01.2021 ; опубл. 13.08.2021, Бюл. № 23. 12 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46472232> (дата обращения: 20.06.2021).

31. Люцерна изменчивая Голубка : патент на селекционное достижение 10598 Российская Федерация / Грязева Т. В. [и др.]. № 67896 ; заявл. 16.11.2015 ; опубл. 23.07.2019. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44119477> (дата обращения: 20.06.2021).

32. Перспективный сорт люцерны изменчивой Голубка / С. А. Игнатъев [и др.] // Зерновое хозяйство России. 2018. № 1. С. 20–24. doi: <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2018-55-1-20-23>

Поступила 02.07.2021; одобрена после рецензирования 05.08.2021; принята к публикации 10.10.2021

Об авторах:

Брагинец Сергей Валерьевич, ведущий научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, *Technologies and means of agricultural mechanization*

ул. Научный городок, д. 3), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>, Researcher ID: Y-6307-2019, Scopus ID: 57202639521, sbraginet@mail.ru

Бахчевников Олег Николаевич, старший научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>, Researcher ID: S-3312-2016, Scopus ID: 57202648620, oleg-b@list.ru

Алферов Александр Сергеевич, научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5210-781X>, alfa-8303@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

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

О. Н. Бахчевников – анализ литературных данных, подготовка первоначального варианта текста и доработка текста.

А. С. Алферов – проведение экспериментов и обработка их результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Demchenko V.N., Vertiy A.A. Increase of Efficiency Process of Grinding Down of Rough and Stem Forages. *Naukoviy visnik Tavriyskogo derzhavnogo agrotekhnologichnogo universitetu* = Scientific Bulletin of the Tavria State Agrotechnological University. 2011; (1-3):74-79. Available at: <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdatu/pdf/t3/11DvNRSF.pdf> (accessed 20.06.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
2. Kostomakhin N.M., Kostomakhin M.N. [Traditional Technologies of Grass Meal Production]. *Selskokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont* = Agricultural Machinery: Maintenance and Repair. 2015; (4):14-28. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24258297&> (accessed 20.06.2021). (In Russ.)
3. Voloshin R.A., Rodionova M.V., Zharmukhamedov S.K., et al. Review: Biofuel Production from Plant and Algal Biomass. *Alternativnaya energetika i ekologiya (ISJAE)* = Alternative Energy and Ecology (ISJAE). 2019; (7-9):12-31. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15518/isjae.2019.07-09.012-031>
4. Mayer-Laigle C., Blanc N., Rajaonarivony R.K., Rouau X. Comminution of Dry Lignocellulosic Biomass, a Review: Part I. From Fundamental Mechanisms to Milling Behaviour. *Bioengineering*. 2018; 5(2). (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3390/bioengineering5020041>
5. Sadv V.V., Sorokin S.A. Improving the Efficiency of Hammer Crusher with Vertical Shaft When Crushing Grain Components. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2018; (11):86-92. Available at: <http://www.asau.ru/vestnik/2018/11/086-092.pdf> (accessed 20.06.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
6. Smolensky A.V., Mikhaylov V.A., Alfyerov A.S., Byelyayev S.A. Research Workflow Hammer Crusher Vertical Shaft. *Tekhnika v selskom khozyaystve* = Machinery in Agriculture. 2012; (5):20-21. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20344403> (accessed 20.06.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
7. Gulevsky V.A., Vertij A.A. Mathematical Modeling of Forage Cutter Operation. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Voronezh State Agrarian University Bulletin. 2018; (3):120-128. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2018.3.120>
8. Ghorbani Z., Masoumi A.A., Hemmat A. Specific Energy Consumption for Reducing the Size of Alfalfa Chops Using a Hammer Mill. *Biosystems Engineering*. 2010; 105(1):34-40. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.09.006>
9. Tumuluru J.S., Tabil L.G., Song Y., et al. Grinding Energy and Physical Properties of Chopped and Hammer-Milled Barley, Wheat, Oat, and Canola Straws. *Biomass and Bioenergy*. 2014; 60:58-67. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.10.011>

10. Savinyh P.A., Sychugov Y.V., Kazakov V.A., Ziganshin B.G. Development and Research of a Machine for Air Cleaning of Grass and Grain Seeds. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2021; 16(1):84-89. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2021-84-89>
11. Moiceanu G., Paraschiv G., Voicu Gh., et al. Energy Consumption at Size Reduction of Lignocellulose Biomass for Bioenergy. *Sustainability*. 2019; 11(9). (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3390/su11092477>
12. Mani S., Tabil L.G., Sokhansanj S. Grinding Performance and Physical Properties of Wheat and Barley Straws, Corn Stover and Switchgrass. *Biomass and Bioenergy*. 2004; 27(4):339-352. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.03.007>
13. Igathinathane C., Womac A.R., Sokhansanj S., Narayand S. Size Reduction of High- and Low-Moisture Corn Stalks by Linear Knife Grid System. *Biomass and Bioenergy*. 2009; 33(4):547-557. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.09.004>
14. Ghorbani Z., Hemmat A., Masoumi A.A. Physical and Mechanical Properties of Alfalfa Grind as Affected by Particle Size and Moisture Content. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2012; 14(1):65-76. Available at: https://www.researchgate.net/publication/265877094_Physical_and_Mechanical_Properties_of_Alfalfa_Grind_as_Affected_by_Particle_Size_and_Moisture_Content (accessed 20.06.2021). (In Eng.)
15. Volvak S.F., Bakharev D.N., Vertiy A.A. Theoretical Studies of the Shredder Stalked Feed Is Pivotaly Suspended Combined with Knives. *Innovatsii v APK: problemy i perspektivy* = Innovations in Agricultural Complex: Problems and Perspectives. 2016; (3):24-34. Available at: http://bsaa.edu.ru/InfResource/library/Journal_3_2016.pdf#page=25 (accessed 20.06.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
16. Ghorbani Z., Masoumi A.A., Hemmat A., Seifi M.R. Prediction of Specific Energy Consumption in Milling Process Using Some Physical and Mechanical Properties of Alfalfa Grind. *Australian Journal of Crop Science*. 2013; 7(10):1449-1455. Available at: http://www.cropj.com/ghorbani_7_10_2013_1449_1455.pdf (accessed 20.06.2021). (In Eng.)
17. Bulatov S.Iu. Increase of Efficiency of Preparation of Feed by Improving the Design and Process of Feeding Machines. *Permskiy agrarnyy vestnik* = Perm Agrarian Journal. 2017; (1):55-64. Available at: http://agrovest.psaa.ru/?smd_process_download=1&download_id=4253#page=56 (accessed 20.06.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
18. Abilzhanov D.T., Abilzhanuly T., Gol'tyapin V.Ya., Orazov B.A. Substantiation of Diameter of Separating Sieve Holes for Leafy Part of Grasses. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2017; (8):24-27. Available at: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/send/56-arkhiv-zhurnala-za-2017/445-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-avgust-8-242-2017-g> (accessed 20.06.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
19. Abilzhanuly T., Abilzhanov D.T. Determination of the Rotation Speed of Chopped Hay on the Surface of the Separator Sieve of the Leaf Part of Herbs. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2020; (4):53-57. Available at: <https://tismash.mospolytech.ru/upload/files/tismash/Тракторы и сельхозмашины №4 2020.pdf> (accessed 20.06.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
20. Vol'vak S.F., Bakharev D.N., Vertii A.A., Korchagina E.E. Theoretical Basis of Costs for Power Feed Grinding Stalk Shredders Is Pivotaly Suspended Combined with Knives. *Innovatsii v APK: problemy i perspektivy* = Innovations in Agricultural Complex: Problems and Perspectives. 2017; (1):23-32. Available at: [http://bsaa.edu.ru/InfResource/library/Journal%20\(13\)%202017.pdf#page=23](http://bsaa.edu.ru/InfResource/library/Journal%20(13)%202017.pdf#page=23) (accessed 20.06.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
21. Volvak S.F., Shapovalov V.I. Analysis of Mathematical Model of Technological Process of Grinding of Stalked Feed. *Izvestiya Mezhdunarodnoy akademii agrarnogo obrazovaniya* = Proceedings of the International Academy of Agrarian Education. 2015; 1:90-93. Available at: <https://maaurus.ru/assets/files/journals/izvestiya-maao-vypusk-25-tom-1.pdf#page=90> (accessed 20.06.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
22. Gulevsky V.A., Vertij A.A. Improvements of Technology of Rough Stalk Forage Grinding by Chopper Equipped with Free-Swinging Combined Knives. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Voronezh State Agrarian University Bulletin. 2019; 12(1):73-81. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2019.1.73>
23. Vendin S.V., Samsonov V.A., Saenko Y.V., et al. Ustification of Knives' Design Parameters at Product's Flat Layer Cutting. *Vestnik VNIMZh* = Journal of VNIIMZH. 2019; (4):101-104. Available at: <https://clck.ru/YjdcU> (accessed 20.06.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

24. Bestaev L.Z. [Comprehensive Evaluation of Quality Indicators of Stalk Fodder Chopping]. *Innovatsii v selskom khozyaystve* = Innovations in Agriculture. 2014; (2):49-53. Available at: <https://journal.viesh.ru/wp-content/uploads/2018/04/inse17.pdf> (accessed 20.06.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
25. Abilzhanov D.T., Umetaliyeva Ch.T., Abilzhanuly T. Determination of Speed and Acceleration of the Separator Sieve of the Finely Sheet Part of the Herbs. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo Slavyanskogo universiteta* = Vestnik KRSU. 2019; 19(12):72-76. Available at: <http://vestnik.krsu.edu.kg/archive/70/2858> (accessed 20.06.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
26. Chevanan N., Womaca A.R., Bitraa V.S.P., et al. Bulk Density and Compaction Behavior of Knife Mill Chopped Switchgrass, Wheat Straw, and Corn Stover. *Bioresource Technology*. 2010; 101(1):207-214. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.083>
27. Dowgiallo A. Cutting Force of Fibrous Materials. *Journal of Food Engineering*. 2005; 66(1):57-61. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.02.034>
28. Tabil Jr. L.G., Sokhansanj S. Bulk Properties of Alfalfa Grind in Relation to Its Compaction Characteristics. *Applied Engineering in Agriculture*. 1997; 13(4):499-505. Available at: <https://www.academia.edu/download/32827663/97.001.pdf> (accessed 20.06.2021). (In Eng.)
29. Ghorbani Z., Masoumi A.A., Hemmat A., et al. Principal Component Modeling of Energy Consumption and Some Physical-Mechanical Properties of Alfalfa Grind. *Australian Journal of Crop Science*. 2011; 5(8):932-938. Available at: http://www.cropj.com/ghorbani_5_8_2011_932_938.pdf (accessed 20.06.2021). (In Eng.)
30. Pakhomov V.I., Braginyets S.V., Bakhchevnikov O.N., Alfyerov A.S. [Shredder of Fibrous Plant Materials]. Patent 205,978 Russian Federation. 2021 August 13. 12 p. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46472232> (accessed 20.06.2021). (In Russ.)
31. Gryazyeva T.V., Dyerova T.G., Ignatyev S.A., et al. [Lucerne Variegated "Golubka"]. Patent 10,598 Russian Federation. 2019 July 23. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44119477> (accessed 20.06.2021). (In Russ.)
32. Ignatiev S.A., Gryazeva T.V., Metlina G.V., Ignatieva N.G. The Promising Variety of Alfalfa (Medicago Polymorpha) "Golubka". *Zernovoe khozyaystvo Rossii* = Grain Economy of Russia. 2018; (1):20-24. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2018-55-1-20-23>

Submitted 02.07.2021; approved after reviewing 05.08.2021; accepted for publication 10.10.2021

About the authors:

Sergey V. Braginyets, Leading Researcher of Plant Production Processing Department, Agricultural Research Center "Donskoy" (3 Nauchnyy Gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>, Researcher ID: Y-6307-2019, Scopus ID: 57202639521, sbraginyets@mail.ru

Oleg N. Bakhchevnikov, Leading Researcher of Plant Production Processing Department, Agricultural Research Center "Donskoy" (3 Nauchnyy Gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>, Researcher ID: S-3312-2016, Scopus ID: 57202648620, oleg-b@list.ru

Aleksandr S. Alferov, Researcher of Plant Production Processing Department, Agricultural Research Center "Donskoy" (3 Nauchnyy Gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5210-781X>, alfa-8303@yandex.ru

Contribution of the authors:

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

O. N. Bakhchevnikov – analyzing literary data, preparing the original version of the text and finalizing the text.

A. S. Alferov – conducting experiments and processing their results.

All authors have read and approved the final manuscript.



Интегрированная модель мобильной роботизированной платформы

М. В. Чугунов^{1*}, И. Н. Полунина¹, А. Г. Дивин²,
А. А. Генералова³, А. А. Никулин³, Д. С. Бычков³

¹ Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет

(г. Саранск, Российская Федерация)

² Тамбовский государственный технический университет

(г. Тамбов, Российская Федерация)

³ Пензенский государственный университет

(г. Пенза, Российская Федерация)

* m.v.chugunov@mail.ru

Аннотация

Введение. Комитет «Умное агро» научно-образовательного центра «Инженерия будущего» определил ряд задач, актуальных для повышения эффективности точного, почвозащитного и ресурсосберегающего земледелия. Одной из таких задач является разработка цифровой мультиагентной системы, обеспечивающей ряд сервисов, предоставляемых агропредприятиям, разработчикам и производителям сельскохозяйственной техники. Целью настоящего исследования является моделирование автономной мобильной роботизированной платформы и разработка программно-аппаратных средств тракторного управления.

Материалы и методы. В качестве методов и инструментов решения поставленной задачи используются современные САХ-системы и их приложения, методы 3D- и натурного моделирования, численного решения задач в терминах механики деформируемого твердого тела. Для расширения и углубления штатного функционала САХ-систем (SolidWorks) в части программной реализации алгоритмов тракторного управления используются методы и технологии программирования с использованием API SolidWorks в среде VisualStudio C++ (MFC, ATL, COM), а для построения натуральных моделей – платформы Arduino и fischertechnik.

Результаты исследования. Результатом исследования является программно-аппаратный модуль тракторного управления для интегрированной (натурной и виртуальной) модели мобильной роботизированной платформы, который может быть предоставлен потребителю как сервис автономизации техники. Для разработанной модели выполнено тестирование алгоритмов управления для тракторных различного вида.

Обсуждение и заключение. Разработанная интегрированная программно-аппаратная модель тракторного управления может быть использована как разработчиками и производителями сельскохозяйственной техники, так и непосредственно агропредприятиями для выполнения типовых технологических процессов. Особенностью реализации является открытый программно-аппаратный интерфейс, обеспечивающий интеграцию мобильных роботизированных платформ на базе цифровой мультиагентной системы.

© Чугунов М. В., Полунина И. Н., Дивин А. Г., Генералова А. А., Никулин А. А., Бычков Д. С., 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: роботизированная транспортно-технологическая платформа, CAD/CAE, автономизация техники, натурные и виртуальные модели, траекторное управление, параметрическое проектирование, цифровая мультиагентная платформа

Благодарности: авторы благодарят анонимных рецензентов, а также выражают признательность руководству и модераторам НОЦ «Инженерия будущего» за помощь, оказанную в процессе подготовки проекта.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Интегрированная модель мобильной роботизированной платформы / М. В. Чугунов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 4. С. 609–627. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.609-627>

Original article

Integrated Mobile Robotic Platform Model

**M. V. Chugunov^{a*}, I. N. Polunina^a, A. G. Divin^b,
A. A. Generalova^c, A. A. Nikulin^c, D. S. Bychkov^c**

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

^b *Tambov State Technical University
(Tambov, Russian Federation)*

^c *Penza State University (Penza, Russian Federation)*

* *m.v.chugunov@mail.ru*

Abstract

Introduction. The “Smart Agro” committee of Research and Education Center “Engineering of the Future” has identified a number of tasks relevant for improving the efficiency of precision, soil-protecting and conservation agriculture. One of these tasks is the development of a digital multi-agent system, which provides a number of services for agricultural enterprises, developers and manufacturers of agricultural machinery. The purpose of the present study is to model an autonomous mobile robotic platform, including the development of software and hardware for trajectory control.

Materials and Methods. To solve the problem, there are used modern CAx systems and their applications, the methods of 3D and full-body modeling, and the method of numerical solution of problems in solid mechanics. To expand and improve the standard functionality of CAx-systems (SolidWorks) in the software implementation of trajectory control algorithms, the methods and technologies of programming using API SolidWorks, VisualStudio C++ (MFC, ATL, COM) are used, and to build physical full-scale models – Arduino and fischertechnik platforms.

Results. The result of the study is a software and hardware module of trajectory control for an integrated (physical and virtual) model of a mobile robotic platform, which can be provided to the consumer as a service for technology automation. For the developed integrated model, control algorithms for various types of trajectories were tested.

Discussion and Conclusion. The developed integrated software and hardware model of trajectory control can be used by developers and manufacturers of agricultural machinery, and directly by agro-enterprises for implementing typical technological processes. A feature of the implementation is an open hardware and software interface that provides the integration of mobile robotic platforms based on a digital multi-agent system.

Keywords: robotic transport and technology system, CAD/CAE, technology automation, physical and virtual models, trajectory control, parametric design, digital multi-agent template

Acknowledgments: The authors would like to thank the anonymous reviewers, as well as the management and moderators of the Research and Education Center “Engineering of the Future” for their assistance in the preparation of the project.

The authors declare no conflict of interest.

For citation: Chugunov M.V., Polunina I.N., Divin A.G., et al. Integrated Mobile Robotic Platform Model. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(4):609-627. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.609-627>

Введение

Научно-образовательный центр (НОЦ «Инженерия будущего») – это межрегиональное объединение вузов 6 субъектов Российской Федерации (Самарской, Пензенской, Тамбовской, Ульяновской, Астраханской областей, Республики Мордовия), призванное объединить науку и реальный сектор экономики¹. Целью НОЦ является достижение мирового лидерства в научно-технологическом развитии и подготовке кадров по направлениям деятельности центра.

Одним из таких направлений является агрокибернетика. Комитет «Умное агро» НОЦ разрабатывает цифровую мультиагентную систему. Система включает ряд сервисов для агропредприятий, разработчиков и производителей сельскохозяйственной техники.

В частности, сервис автономизации техники решает задачу беспилотного управления роботизированными транспортно-технологическими системами в контексте более общих задач, решаемых комитетом и направленных на повышение эффективности точного, почвозащитного и ресурсосберегающего земледелия. Среди основных задач такого типа следует указать следующие:

- панорамное гиперспектральное и 3D-сканирование объектов агроценоза;
- выполнение типовых технологических операций (химическая и механическая обработка растений, сбор и сортировка урожая фруктов и овощей с сопутствующим контролем качества

на основе анализа гиперспектров и полученных вегетационных индексов);

- формирование виртуальных моделей для объектов агроценоза и ассоциативных двунаправленных связей между физическими (натурными) и виртуальными объектами;

- комбинированное траекторное управление мобильными системами с использованием современных методов навигации и позиционирования.

Для решения указанных задач необходима транспортно-технологическая автономная роботизированная платформа, отличающаяся маневренностью, высокой точностью управления и позиционирования.

Проект роботизированной платформы включает несущую систему, ходовую часть, систему торможения, управления, осязательства, а также робота-манипулятора и технологический блок. Проект реализуется в виде интегрированных САХ-моделей, предусматривающих анализ и оптимизацию проектных решений. При этом неременным требованием к проекту в целом является возможность глубокой интеграции всех программных, аппаратных модулей и САХ-моделей. САХ-модели формируются в базовой САХ-среде (SolidWorks) с использованием разработанного в рамках проекта программного обеспечения, расширяющего и дополняющего штатный функционал базовой системы в части задач синхронного управления мобильным

¹ НОЦ «Инженерия будущего»: сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://nocsamara.ru/> (дата обращения: 20.06.2021).

роботом (физическим объектом) и его виртуальной САХ-моделью.

Таким образом, целью работы является построение киберфизической робототехнической системы как сервиса, обеспечивающего автономизацию сельскохозяйственной техники. При этом открытый программно-аппаратный интерфейс обеспечивает возможность интеграции платформы в базовую мультиагентную киберфизическую систему в качестве агента.

Обзор литературы

Задача автономизации техники является сложной, междисциплинарной и решается, как правило, для множества разных, но взаимосвязанных объектов (агентов), имеющих единую систему управления. При этом одним из аспектов автономизации является киберфизическая интеграция данных единой цифровой платформы с объектами техники, которые рассматриваются как агенты этой базовой мультиагентной системы [1]. Этот факт предполагает взаимодействие не только агентов техники друг с другом, но еще и с агентами других типов (физических, химических, биологических) [2].

В одной из работ приведен всесторонний анализ структуры, технологий и инструментов, необходимых для реализации киберфизических систем в области интеллектуального агропредприятия в сравнении с аналогичными промышленными комплексами [2]. Общей особенностью этих систем является глубокая интеграция физических и виртуальных компонентов. При этом под виртуальными компонентами понимаются 3D- (САХ: CAD/CAE), математические и программные модели, обладающие достаточной степенью адекватности физическим объектам [3].

Для построения мультиагентных робототехнических систем необходимо решить задачи траекторного управления,

которые сводятся к выводу робота на заданную траекторию из произвольного положения и стабилизации движения по данной траектории.

Среди всего многообразия методов решения этих задач следует указать следующие основные методы: скольжение (sliding / слайдинг), обратный обход интегратора (back-stepping / бэкстеппинг), пропорционально-дифференциально-интегральное регулирование ПИД (proportional-differential-integral control PID) и линеаризация обратной связью (feedback linearization).

Скольльзящие методы обеспечивают сходимость за конечное время, но отличаются сингулярностью. Бэкстеппинг и ПИД-регулирование на практике не допускают аналитическую форму представления и сложны в реализации. Различные модификации этих методов направлены, как правило, на преодоление указанных недостатков [4]. Эту же цель преследуют многочисленные комбинированные методы, которые в последнее время явно преобладают в научной литературе. В работах обоснован комбинированный метод, который сочетает в себе пропорционально-интегральное (ПИ / PI) управление со слайдингом [5], а также слайдинг с бэкстеппингом [6; 7].

Наше исследование затрагивает ту же проблему, что и ряд работ иностранных коллег [8–10]. При проведении экспериментов были использованы методы, описанные в других статьях [11; 12]. Особое место в исследованиях последнего времени занимает проблема формирования двунаправленных связей между реальным объектом (роботом или его натурной моделью) и его виртуальной моделью. Эта проблема хорошо описана в контексте управления мобильными роботами [13–15]. Также проведен всесторонний сравнительный анализ методов управления мобильными роботами [16].

В данной работе для траекторного управления используется метод точной линеаризации замыкающей нелинейной обратной связью, делающей рассматриваемую систему линейной [17]. Метод является отечественной разработкой и отличается непрерывностью управления, задается аналитически, невосприимчив к вибрациям (чаттерингу). При этом полученные стабилизирующие обратные связи обеспечивают экспоненциальное убывание заданной нормы отклонения от целевой траектории.

В пространстве «расстояние до траектории – ориентация» определены области притяжения для выхода на заданную траекторию с установленными показателями экспоненциальной устойчивости и получены управления для стабилизации по прямолинейному пути, по дуге окружности и составным траекториям, сформированным из отрезков прямых и дуг окружностей [17]. Аналогичная задача решена для целевой кривой, заданной параметрически с учетом динамики рулевого привода [18], в работе Л. Б. Рапопорта – для кривой, заданной явно аналитически [19], а в другом исследовании – для криволинейного пути с учетом неровностей поверхности движения [20]. Были рассмотрены варианты замены переменных для кинематической модели, приводящие к точной линеаризации уравнений движения. При этом отмечено, что ключевой проблемой для рассматриваемой задачи является определение расстояния от произвольной точки до целевой кривой [21]. Выполнен анализ результатов, полученных на основе законов управления, синтезированных с помощью разных канонических представлений [22].

Материалы и методы

В качестве базовой транспортной системы рассматривается самоходная база «Туман 1-М» индустриального партнера НОЦ «Пегас-Агро» (рис. 1), эксплуатационные параметры которой являются достаточными для размещения технологического оборудования, разрабатываемого в рамках проектов НОЦ «Умное агро», а также систем энергоснабжения² [23].

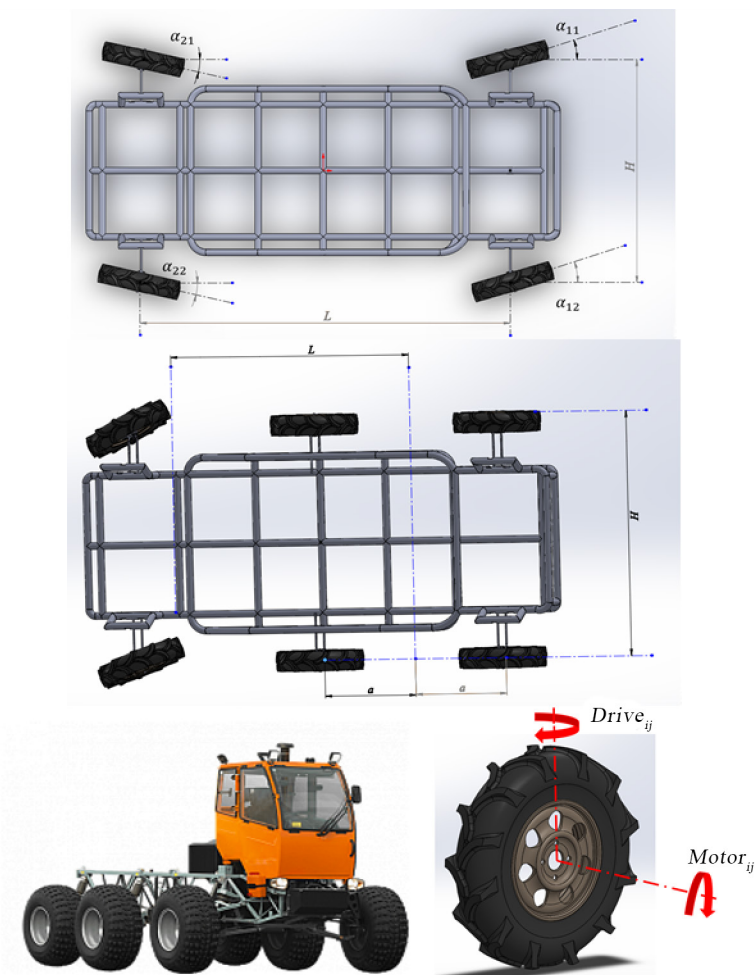
В качестве модели шасси используется универсальная параметрическая CAD/CAE-модель (SolidWorks), разработанная авторами. Она легко адаптируется для разных проектных решений «Пегас-Агро» и предусматривает следующие виды компоновки: двухосевую и трехосевую, заднеприводную, переднеприводную и полноприводную. Модель оснащена одноосевым, двухосевым и дифференциальным управлением с учетом угла Аккермана [9; 24].

На рисунке 1 показаны варианты как двухосевой, так и трехосевой компоновки. Заметим, что для решения задачи траекторного управления существенное значение имеют лишь величины L (колесная база) и H (размер колеи), которые определяются так, как показано на рисунке 1.

В сформированную таким образом CAD/CAE-модель на несущие оси каждой из четырех подвесок установлено по два виртуальных мотора (рис. 1). Первый ($Motor_{ij}$) передает крутящий момент в вертикальной плоскости непосредственно на движитель и моделирует работу мотор-колеса. Второй мотор ($Drive_{ij}$) передает крутящий момент в горизонтальной плоскости и моделирует работу системы управления на базе шагового (серво) двигателя. Работу системы управления иллюстрирует видеоролик³.

² Пегас-Агро : сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://pegas-agro.ru/> (дата обращения: 20.06.2021).

³ URL: <https://drive.google.com/file/d/1HrWptGiffLpuuYdZ4kroUwCJUHy4RNpp/view?usp=sharing> (дата обращения: 20.06.2021).



Р и с. 1. Самоходная база «Туман-1М» и модель компоновки для шасси робота
 F i g. 1. Fog-1M self-propelled base and layout model for robot chassis

$Motor_{ij}$, $Drive_{ij}$ установлены попарно на каждой подвеске и обеспечивают универсальность модели мобильного робота для наиболее общего случая его компоновки и управления ($i = 1, 2$, $j = 1, 2$: индекс i соответствует номеру оси, индекс j – позициям «справа» и «слева» соответственно).

Управляющими параметрами являются угловые кинематические характеристики и углы поворота вокруг вертикальных осей для колес, отвечающих

за управление роботом. Таким образом задается угол Аккермана и моделируется функция механического дифференциала. При этом программный модуль допускает возможность адаптации к различным вариантам компоновки, а сама модель имеет иерархическую структуру, исключающую упругие и демпфирующие элементы на стадии решения задачи траекторного управления, что существенно снижает вычислительные затраты. Так, в случае

классического варианта в качестве целевой точки рассматривается срединная точка задней оси с координатами x_c и y_c , ориентация робота задается углом θ между центральной осью платформы и осью x . Рассматривается движение робота без проскальзывания. Углы поворота передних колес α_1 и α_2 (рис. 1), отвечающие за ориентацию робота, определяются из соотношений:

$$\operatorname{tg}(\alpha_1) = \frac{uL}{1 - \frac{uH}{2}} \text{ — для внутренней траектории,}$$

$$\operatorname{tg}(\alpha_2) = \frac{uL}{1 + \frac{uH}{2}} \text{ — для внешней траектории,}$$

где u — мгновенное значение кривизны траектории, описываемой целевой точкой [17]. Во всех других случаях компоновки актуальные параметры управления автоматически связываются с кривизной u .

Уравнения движения робота имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= v_c \cos \theta, \\ \dot{y}_c &= v_c \sin \theta, \\ \dot{\theta} &= v_c u, \end{aligned}$$

где $v_c = \|V_c\|$ при движении вперед; $v_c = -\|V_c\|$ при движении задним ходом; V_c — вектор мгновенной скорости целевой точки.

Результаты исследования

Ниже приведены результаты для моделирования траекторного управления для различных траекторий.

Случай движения по прямой

Для прямолинейной траектории, проходящей через начало отсчета под углом β к оси x необходимо выполнить преобразование координат:

$$\begin{aligned} \xi &= x_c \cos \beta + y_c \sin \beta, \\ \eta &= y_c \cos \beta - x_c \sin \beta, \\ \psi &= \theta - \beta. \end{aligned}$$

Как показано в работе Л. Б. Рапорта, управление вида

$$u = - \left(\frac{2\lambda + \lambda^2 z_2}{(1 + z_3^2)^{\frac{3}{2}}} \right), \quad (1)$$

где $z_2 = \eta$, $z_3 = \operatorname{tg} \psi$, обеспечивает экспоненциальную скорость убывания z_2 и z_3 с показателем $-\lambda$ [17].

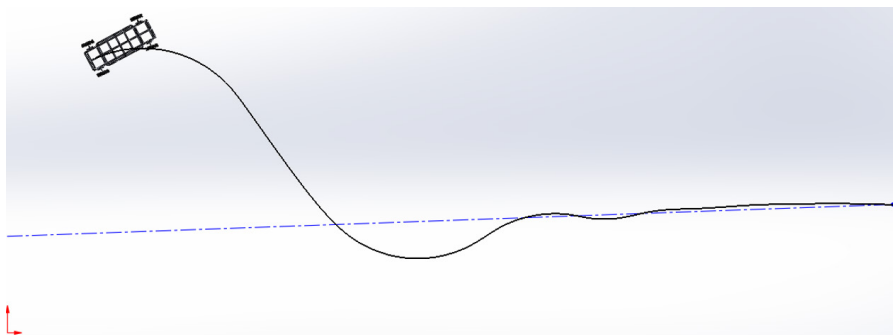
На рисунке 2 показаны результаты численного эксперимента для некоторого произвольного начального положения робота и $\beta = 10^\circ$, $\lambda = 1$, а видеоролик демонстрирует процесс стабилизации во времени⁴. При этом учитывались ограничения на углы поворота передних колес, то есть управление было задано в виде

$$u = -s_{\underline{u}} \left(\frac{2\lambda + \lambda^2 z_2}{(1 + z_3^2)^{\frac{3}{2}}} \right),$$

где $s_{\underline{u}} = [-\underline{u}$ при $u \leq -\underline{u}$, u при $|u| < \underline{u}$, \underline{u} при $u \geq \underline{u}$],

где \underline{u} — ограничение на кривизну траектории, связанное с ограничениями на поворот передних колес.

⁴ URL: https://drive.google.com/file/d/1PqzSYMxwTjmcZyu6n8oml2DC5H3zw_G/view?usp=sharing (дата обращения: 20.06.2021).



Р и с. 2. Результаты численного моделирования для вывода и стабилизации движения робота по прямолинейной траектории

F i g. 2. Results of numerical simulation to bring and to stabilize robot motion along straight path

Случай движения по дуге окружности

Дуга окружности задается центром x_0 , начальной точкой x_b , радиусом R и углом сектора. Обозначим также угол τ между осью x и радиусом-вектором $X_c - X_0$ [17]. Тогда

$$\begin{aligned} \eta &= \sqrt{(x_c - x_0)^2 + (y_c - y_0)^2}, \\ \xi &= \tau R, \psi = \theta + \tau, \\ z_1 &= \xi, z_2 = \eta - R, z_3 = \text{tg} \psi. \end{aligned}$$

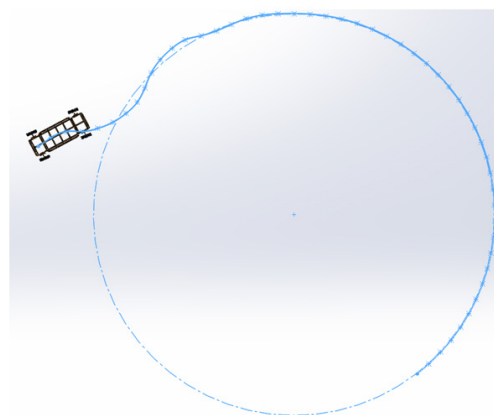
Аналогично (1), (2) управление может быть выбрано в виде

$$u = -s_u \left(\frac{\sigma + \frac{1}{R}(1 + z_3^2)}{\left(1 + \frac{z_2}{R}\right)\left(1 + z_3^2\right)^{\frac{3}{2}}}, \right)$$

где s_u определяется по-прежнему аналогично (2) [5].

На рисунке 3 показаны результаты численного эксперимента при $\lambda = 1$, $X_0 = (10, 20)$ м, заданном радиусе окружности $R = 12$ м. Результаты

демонстрируются для некоторого произвольного начального положения робота, параметры которого считаются с виртуальных сенсоров. Видеоролик демонстрирует процесс движения⁵.



Р и с. 3. Результаты численного моделирования для вывода и стабилизации движения робота по окружности

F i g. 3. Results of numerical simulation to bring and to stabilize robot motion along arc path

Случай движения по сплайну

Введем следующие обозначения: C – текущая позиция робота; A – ближайшая к ней точка на целевой

⁵ URL: https://drive.google.com/file/d/19U2y90vggNrNAzrA_TqE1WS4znHoAjEQ/view?usp=sharing (дата обращения: 20.06.2021).

траектории; O – мгновенный центр кривизны целевой траектории в точке A ; $OA = R(s) = 1/s$; $k(s)$ – значение кривизны траектории в точке A ; τ – угол между касательной к траектории в точке A и осью x , и $\psi = \theta - \tau$ [20].

В качестве фазовых переменных примем z_1 – расстояние от целевой точки до целевой траектории CA , $z_2 = \text{tg}(\psi)$, при этом управление формируется согласно результатам, представленным в работе А. В. Пестерева и Л. Б. Рапорта [22]. Таким образом,

$$u = s_u \left(\frac{k(s)}{\sqrt{1+z_2^2} (1-k(s)z_1)} - \frac{\sigma(z)}{(1+z_2^2)^{3/2}} \right),$$

где $z = (z_1, z_2)^T$, а функция сатуратор s_u , обусловленная ограничениями на ресурс управления, как и ранее, определена как

$$s_u = \begin{cases} -u, & u \leq -u, \\ u, & |u| \leq u, \\ -u, & u \geq u, \end{cases}$$

где u – заданное ограничение, а линейная функция $\sigma(z)$ задается в виде

$$\sigma(z) = \lambda^2 z_1 + 2\lambda z_2, \quad \lambda > 0.$$

В рассматриваемой постановке исходная задача траекторного управления в целом не разделяется для реального робота, его натурной и виртуальной моделей, за исключением лишь способов определения фазовых переменных z_1 и z_2 .

Для виртуальной модели фазовые переменные могут быть определены следующими двумя способами:

а) на основе использования известных кинематических соотношений

и аналитических зависимостей для сплайнов и других траекторий, экспортированных с использованием API САХ-систем и их приложений⁶;

б) на основе непосредственного экспортирования значений переменных z_1 и z_2 из САХ-модели в процессе моделирования движения.

Вторая процедура возможна, если параметрические свойства модели должным образом сформированы, например так, как это показано на рисунке 4. Видеоролик наглядно демонстрирует эти свойства⁷. В этом случае в зависимости от положения робота изменяются $z_1 = \|CA\|$ и $z_2 = t(\psi) = \text{tg}(\theta - \tau)$, но при этом сохраняются заданные параметрические взаимосвязи (принадлежности, касательности, перпендикулярности).

Проведенные нами численные эксперименты показали, что результаты, полученные способами «а» и «б» близки друг другу с высокой (не менее $1e-07$) точностью. Способ «б» имеет особое значение в тех случаях, когда траекторию трудно задать аналитически.

Натурная реализация и моделирование

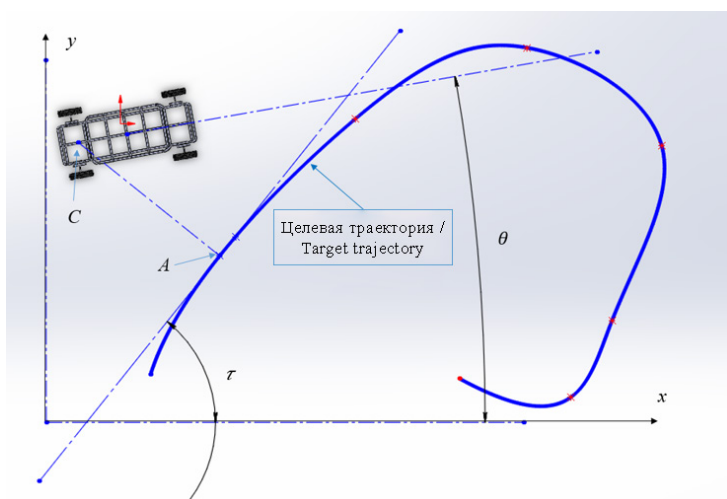
Для натурной модели платформы значения фазовых переменных определяются на основе анализа данных, поступающих от трех модулей чувствительной роботизированной системы:

– модуль визуальной одометрии состоит из двух цифровых камер, определяющих смещение и поворот платформы в пространстве на основе данных с камер⁸ [25];

⁶ SOLIDWORKS API Help [Электронный ресурс]. URL: <https://help.solidworks.com/2021/English/api/sldworksapiproguide/Welcom.htm?verRedirect=1> (дата обращения: 20.06.2021).

⁷ URL: https://drive.google.com/file/d/1O_AbrWxUhw3DoQwuE2D7BNeQg4H9zrbq/view?usp=sharing (дата обращения: 20.06.2021).

⁸ Хабибуллин Р. Р., Бычков Д. С., Генералова А. А. Навигация автотракторной техники // Инновационное развитие современной науки : сборник научных трудов по материалам XXV Международной научно-практической конференции (10 июля 2020 г.). Анапа : ООО «Научно-исследовательский центр экономических и социальных процессов» в Южном Федеральном округе, 2020. С. 21–24.



Р и с. 4. Параметрическая модель для траекторного управления по сплайну
 Fig. 4. Results of numerical simulation to bring and to stabilize robot motion along spline path

– модуль инерциальной навигации состоит из гироскопа и акселерометра и позволяет определить линейные и угловые перемещения платформы в пространстве [26];

– модуль спутниковой навигации с приемником спутникового сигнала по типу GPS/GLONASS [27].

Программно-аппаратный модуль управления тестировался на натурной модели, собранной на платформе Arduino и fischertechnik [28–30]. Заметим при этом, что последующий перенос программного обеспечения с натурной модели на реальную платформу потребует лишь настроить интерфейс на конкретные физические сенсоры, обеспечивающие точное определение фазовых переменных.

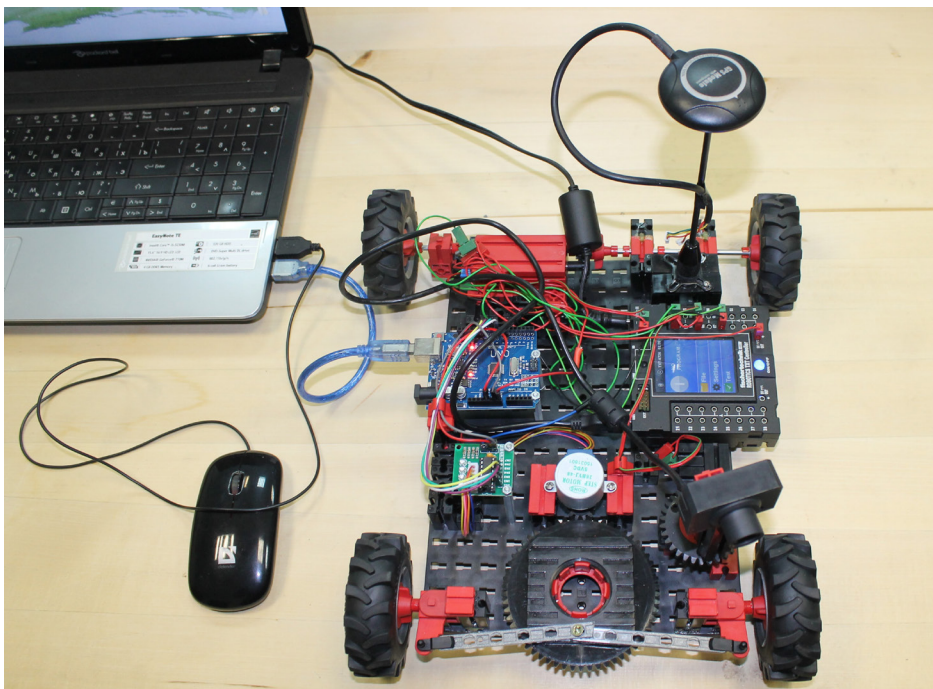
На рисунке 5 показана натурная модель, обеспечивающая тестирование всех рассмотренных алгоритмов и включающая в себя основной привод

двигателей, рулевое управление (в варианте классической компоновки) и поворот видеокамеры. Видеоролик наглядно иллюстрирует работу натурной модели⁹. Траекторное управление рассчитывалось при этом сразу для всей траектории, то есть возможное проскальзывание, неровность поверхности движения и прочие возмущения не учитывались.

Программный модуль представляет собой многодокументное Windows-приложение архитектуры «документ-вид» (среда разработки MS VisualStudio C++/MFC/COM/vMicro(Arduino)/APISolidWorks) и развивает опыт авторов в разработке приложений данного типа¹⁰ [31; 32]. В окне вида отображается масштабированная карта местности, полученная с геоинформационных систем или наземных станций управления и предназначенная для планирования траектории движения робота.

⁹ URL: <https://drive.google.com/file/d/1aQhJ4RHHQg1Qing3JexzDIIfc-rR8wa0/view?usp=sharing> (дата обращения: 20.06.2021).

¹⁰ Программа траекторного управления колесным роботом : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021618351 Российская Федерация / Чугунов М. В. [и др.]. № 2544631 ; заявл. 19.05.2021 ; опубл. 26.05.2021.



Р и с. 5. Натурная модель мобильного робота

F i g. 5. Physical model for mobile robot

Основная особенность программной реализации состоит в том, что управление как функция времени формируется и передается в качестве входных данных на виртуальные и физические устройства (моторы) в рамках одного программного модуля, сформированного одним проектом (project-solution) MS VisualStudio C++.

Окно приложения показано на рисунке 6. Модальная диалоговая панель служит для постановки задачи, ввода исходных данных и компоновки шасси. Возможны два следующих режима работы программы:

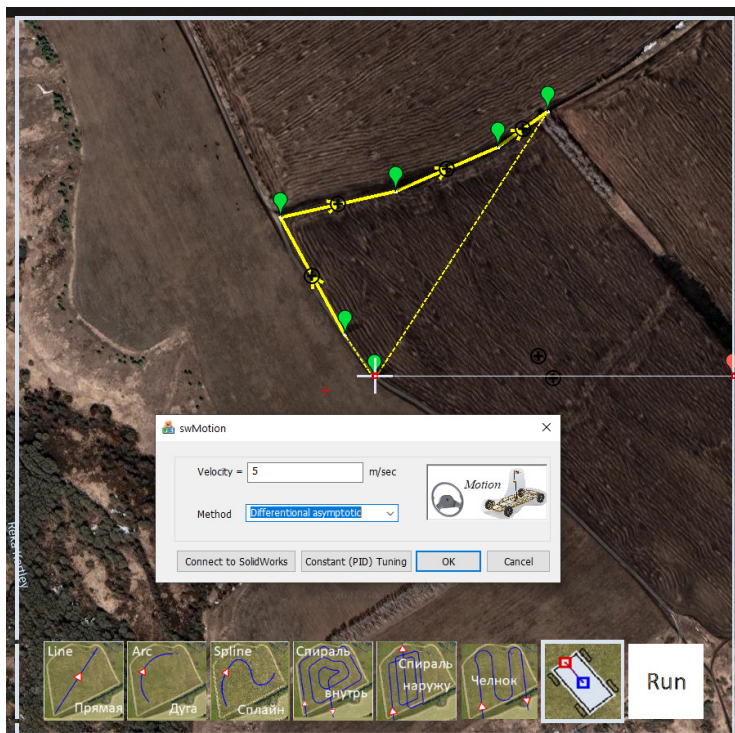
- 1) с использованием базовой САХ-системы в качестве COM-сервера и, соответственно, с использованием API этой системы (на рисунке 8 показан пример в варианте САХ SolidWorks);

- 2) работа в автономном режиме.

В первом случае карта местности загружается в эскиз документа САХ, во втором случае – в окно вида приложения. Первый режим работы целесообразно использовать, если есть необходимость анализа проектного решения соответствующих статических, кинематических, динамических и прочих характеристик системы.

Траектория в обоих случаях формируется пользователем непосредственно в окне вида или документа (эскиза) с использованием стандартных средств графического редактирования.

Первый этап состоит в организации импорта-экспорта данных для САХ-модели робототехнической системы и тракторного управления. В качестве базовой САХ-среды используется SolidWorks, а решение задачи импорта-экспорта решается с использованием COM-интерфейсов и API SolidWorks.



Р и с. 6. Окно приложения
F i g. 6. Application window

Наше приложение относится к типу Stand-Alone, которое подключается к текущему экземпляру COM-сервера sldworks.exe на локальном компьютере посредством использования smart-указателя CComPtr<ISldWorks> и вызова для него функции CoCreateInstance. Функция-обработчик кнопки Connect CAx реализует также определение указателя на текущий документ или открытие необходимого документа SolidWorks.

В контексте рассматриваемой задачи необходимо отметить два момента, которые требуют рассмотрения с точки зрения программной реализации: получение (импорт) данных из CAx-модели; определение (экспорт) данных для моделирования в CAx-среде.

На рисунке 7 показан фрагмент программного кода, реализующего

доступ к фичерам модели, в частности, к эскизу с именем Position и мотору в дереве моделирования с именем Drive₁₁ (в наших обозначениях Drive_{*i*}_{*j*}, *i* = 1, *j* = 1), а также чтение (импорт) значения размера с именем Distance. В наших обозначениях этому параметру соответствует фазовая переменная $z_1 = \|CA\|$ (рис. 4).

Задача экспорта данных решается сразу в двух направлениях, то есть полученные управления экспортируются в качестве входных данных как для виртуальной модели (виртуальных шаговых моторов), так и аналогичных физических устройств натурной модели.

На рисунке 8 показан фрагмент кода для экспорта данных моделирования, причем на рисунке 8а в направлении CAx SolidWorks, в частности,



```

doc->IFirstFeature(&pFeature);
while (pFeature) // Цикл по фитчерам
{
    pFeature->get_Name(&Name);
    if (Name == _T("Position"))// получение имени фитчера и проверка требу-
    емого имени
    {
        VARIANT_BOOL ret;
        pEnumDispDim = NULL;
        pFeature->Select(TRUE, &ret); //выбор текущего фитчера
        pFeatureControl = pFeature;
        pFeatureControl->EnumDisplayDimensions(&pEnumDispDim); // получе-
        ние указателя на размеры модели
        if (pEnumDispDim)
        {
            pEnumDispDim->Next(1, &pDisplayDimension, &NumberDim);
            while (NumberDim)// цикл по размерам
            {
                pDisplayDimension->IGetDimension(&pDim);
                pDim->get_FullName(&Name);// получение имени размера
                pDim->get_Value(&Value); // получение значения размера
                с именем Distance
                if (Name == _T("Distance@Position")) Distance = Value;
                // определение других требуемых параметров аналогично
                pDisplayDimension = pDisplayDimensionNext;
                pEnumDispDim->Next(1, &pDisplayDimension, &NumberDim);
            }
        }
    }
    //
    if (Name == CComBSTR(_T("Drive11")))// Если имя фитчера Drive11
    {
        pSubFeature->GetDefinition(&pDisp);
        pDisp->QueryInterface(&pFeatureMotorData_u1);
    }
}

```

Р и с. 7. Доступ к фитчерам модели

F i g. 7. Accessing to model features

```

// Определение входных данных для мотора как
фитчера моделирования
doc->EditSketch(); // Режим редактирования эскиза
VARIANT spData_u1; // Определение объекта
типа Variant
SafeDoubleArray my_u1(spData_u1); // Опреде-
ление безопасного массива
double CurrentTime = 0.0;
for (int k = 0; k <= NumberTimeLineStep; k++) //
Цикл по времени
{
    my_u1[k] = CurrentTime;
    my_u1[k + NumberTimeLineStep + 1] = u1[k];
    // Упаковка сформированных данных
    в массив
    CurrentTime += TimeLineStep; // Шаг по
    времени
}
pFeatureMotorData_u1->put_SplineData(spData_u1);

```

```

GStepper< STEPPER2WIRE> stepper(steps, step,
dir); // steps – количество шагов на один обо-
рот вала, step, dir – порт ввода-вывода общего
назначения
k=0;
void loop()
{
    stepper.tick(); // time_step – шаг таймера
    в миллисекундах
    static uint32_t tmr2;
    if (millis() - tmr2 > time_step)
    {
        tmr2 = millis();
        static float val;
        if (millis() == my_u1[k]*1000)
        {
            val = u1[k]; k++;
            stepper.setTarget(val); // ставим новую
            позицию для шагового мотора
        }
    }
}

```

a)

b)

Р и с. 8. Экспорт управления в виртуальную модель и натуральный объект

F i g. 8. Export of control to virtual model and to physical object

выполняется определение исходных данных для $Drive_{11}$, то есть массив mu_u1 содержит данные табулирования функции

$$tg(\alpha_1) = \frac{uL}{1 - \frac{uH}{2}}.$$
 На рисунке 8b та же задача решается для определения входных данных для физических устройств, управляемых контроллером семейства Arduino с использованием библиотеки управления шаговыми двигателями Stepper¹¹.

Обсуждение и заключение

Разработан программно-аппаратный модуль траекторного управления интегрированной виртуальной и натурной моделью для мобильной роботизированной платформы. Выполнено тестирование алгоритмов, обеспечивающих экспоненциальную устойчивость управления для траекторий различного вида: отрезка прямой, дуги окружности, сплайна (Безье).

При этом виртуальная САД/CAE-модель позволяет исследовать состояние и поведение конструкции как многотельного объекта в различных режимах ее эксплуатации в терминах механики деформируемого твердого тела.

Программно-аппаратные модули имеют открытый интерфейс и могут быть легко интегрированы в киберфизические системы управления и автономизации техники более общего

вида. При этом полученное управление как функция времени передается в виде управляющего сигнала как на виртуальные, так и на физические устройства. Программно-аппаратное обеспечение и виртуальные модели платформы предусматривают различные варианты компоновки, могут быть адаптированы к требованиям потребителя и предоставлены ему как сервис.

В части использованных алгоритмов управления и их программной реализации отсутствуют существенные различия между управлением реальным объектом, его виртуальной и натурными моделями. В этом смысле проект готов к практической реализации и внедрению в практику точного земледелия.

В качестве перспектив проекта следует указать следующие:

1. Аппаратная реализация управления самоходными базами «Пегас-Агро». Эта задача предусматривает совместную с «Пегас-Агро» разработку мехатронных систем, максимально адаптированных к конструктивным особенностям самоходных баз и технологической среде предприятия.

2. Интеграция мобильной роботизированной платформы в мультиагентную систему в качестве агента.

При этом для решения каждой из этих двух задач программное обеспечение системы управления каких-либо существенных изменений не потребует.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Gorodetsky V., Skobelev P., Mařík V. System Engineering View on Multi-Agent Technology for Industrial Applications: Barriers and Prospects // Cybernetics and Physics. 2020. Vol. 9, Issue 1. P. 13–30. doi: <https://doi.org/10.35470/2226-4116-2020-9-1-13-30>

2. Field Robots for Intelligent Farms—Inhering Features from Industry [Электронный ресурс] / P. Gonzalez-de-Santos [et al.] // Agronomy. 2020. Vol. 10, Issue 11. doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy10111638>

¹¹ Библиотека для шагового двигателя ARDUINO v2.1 [Электронный ресурс]. URL: <https://alexgyver.ru/gyverstepper/> (дата обращения: 20.06.2021).

3. Real-Time 3D Unstructured Environment Reconstruction Utilizing VR and Kinect-Based Immersive Teleoperation for Agricultural Field Robots [Электронный ресурс] / Y. Chen [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. 2020. Vol. 175. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105579>
4. Matraji K., Al-Wahedi K., Al-Durra A. Higher-Order Super-Twisting Control for Trajectory Tracking Control of Skid-Steered Mobile Robot // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 124712–124721. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007784>
5. P+d Plus Sliding Mode Control for Bilateral Teleoperation of a Mobile Robot / L. R. Salinas [et al.] // International Journal of Control, Automation and Systems. 2018. Vol. 16. P. 1927–1937. doi: <https://doi.org/10.1007/s12555-017-0439-x>
6. Xincheng G., Zhenying L., Caihong L. Finite Time Tracking Control of Mobile Robot Based on Non-Singular Fast Terminal Sliding Mode // Systems Science & Control Engineering. 2018. Vol. 6, Issue 1. P. 492–500. doi: <https://doi.org/10.1080/21642583.2018.1542636>
7. Backstepping Trajectory Tracking Based on Fuzzy Sliding Mode Control for Differential Mobile Robots / X. Wu [et al.] // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2019. Vol. 96. P. 109–121. doi: <https://doi.org/10.1007/s10846-019-00980-9>
8. Research and Development in Agricultural Robotics: a Perspective of Digital Farming [Электронный ресурс] / R. R. Shamshiri [et al.] // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2018. Vol. 11, Issue 4. doi: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181104.4278>
9. Extended Ackerman Steering Principle for the Coordinated Movement Control of a Four Wheel Drive Agricultural Mobile Robot / Q. Qiu [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. 2018. Vol. 152, Issue 9. P. 40–50. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.06.036>
10. Gao G., Qin Q., Chen Sh. Turning Control of a Mobile Robot Forgreenhouse Spraying Based on Dynamic Sliding Mode Control [Электронный ресурс] // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2017. Vol. 14, Issue 6. doi: <https://doi.org/10.1177/1729881417744754>
11. Trajectory Tracking Control of Skid-Steered Mobile Robot Based on Adaptive Second Order Sliding Mode Control / I. Matraji [et al.] // Control Engineering Practice. 2018. Vol. 72, Issue 3. P. 167–176. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2017.11.009>
12. LAMDA Control Approaches Applied to Trajectory Tracking for Mobile Robots / L. Morales [et al.] // IEEE Access. 2021. Issue 9. P. 37179–37195. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3062202>
13. Slawiński E., Santiago D., Mut V. Dual Coordination for Bilateral Teleoperation of a Mobile Robot with Time Varying Delay // IEEE Latin America Transactions. 2020. Vol. 18, Issue 10. P. 1777–1784. doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9387669>
14. Haptic Tele-Driving of Wheeled Mobile Robots under Non-ideal Wheel Rolling, Kinematic Control and Communication Time Delay / W. Li [et al.] // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2020. Vol. 50, Issue 1. P. 336–347. doi: <https://doi.org/10.1109/TSMC.2017.2738670>
15. Evaluation of a Predictor-Based Framework in High-Speed Teleoperated Military UGVs / Y. Zheng [et al.] // IEEE Transactions on Human-Machine Systems. 2020. Vol. 50, Issue 6. P. 561–572. doi: <https://doi.org/10.1109/THMS.2020.3018684>
16. Tzafestas S. G. Mobile Robot Control and Navigation: A Global Overview // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2018. Vol. 91. P. 35–58. doi: <https://doi.org/10.1007/s10846-018-0805-9>
17. Rapoport L. B. Estimation of Attraction Domains in Wheeled Robot Control // Automation and Remote Control. 2006. Vol. 67. P. 1416–1435. doi: <https://doi.org/10.1134/S0005117906090062>
18. Gilimyanov R. F., Pesterev A. V., Rapoport L. B. Motion Control for a Wheeled Robot Following a Curvilinear Path // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2008. Vol. 47. P. 987–994. doi: <https://doi.org/10.1134/S1064230708060129>
19. Rapoport L. B. The Periodic Solution of Two-Dimensional Linear Nonstationary Systems and Estimation of the Attraction Domain Boundary in the Problem of Control of a Wheeled Robot // Automation and Remote Control. 2011. Vol. 72. P. 2339–2347. doi: <https://doi.org/10.1134/S0005117911110087>
20. Pesterev A. V., Rapoport L. B. Stabilization Problem for a Wheeled Robot Following a Curvilinear Path on Uneven Terrain // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2010. Vol. 49. P. 672–680. doi: <https://doi.org/10.1134/S1064230710040155>

21. Pesterev A. V. Synthesis of a Stabilizing Control for a Wheeled Robot Following a Curvilinear Path // Automation and Remote Control. 2012. Vol. 73. P. 1134–1144. doi: <https://doi.org/10.1134/S000511791207003X>
22. Pesterev A. V., Rapoport L. B. Canonical Representation of the Path Following Problem for Wheeled Robots // Automation and Remote Control. 2013. Vol. 74. P. 785–801. doi: <https://doi.org/10.1134/S0005117913050044>
23. Mechatronic System for Fruit and Vegetables Sorting [Электронный ресурс] / P. Balabanov [et al.] // II International Scientific Conference “Advanced Technologies in Aerospace, Mechanical and Automation Engineering” (18–21 November 2019). Vol. 734. Krasnoyarsk, 2019. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/734/1/012128>
24. Берестова С. А., Мисюра Н. Е., Митюшов Е. А. Кинематическое управление движением колесных транспортных средств // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2015. Т. 25, № 2. С. 254–266. URL: <http://www.mathnet.ru/links/0ee54f8b9a883b3110138244e322e405/vuu482.pdf> (дата обращения: 14.02.2021).
25. Девятчиков Е. А. Алгоритм описания траектории мобильного робота по данным визуального одометра для автоматического возвращения к оператору // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. № 12. С. 705–715. URL: <https://elck.ru/YK7bM> (дата обращения: 14.02.2021).
26. A General Euler Angle Error Model of Strapdown Inertial Navigation Systems [Электронный ресурс] / J. Li [et al.] // Applied Sciences. 2018. Vol. 8, Issue 1. doi: <https://doi.org/10.3390/app8010074>
27. Sekaran J., Kaluvan H., Irudhayaraj L. Modeling and Analysis of GPS–GLONASS Navigation for Car Like Mobile Robot // Journal of Electrical Engineering & Technology. 2020. Issue 15. P. 927–935. doi: <https://doi.org/10.1007/s42835-020-00365-1>
28. Stelian-Emilian O. Mobile Robot Platform with Arduino Uno and Raspberry Pi for Autonomous Navigation // Procedia Manufacturing. 2019. Vol. 32. P. 572–577. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.254>
29. Al-Sahib N. K. A., Azeez M. Z. Build and Interface Internet Mobile Robot using Raspberry Pi and Arduino // Innovative Systems Design and Engineering. 2015. Vol. 6, no. 1. P. 106–114. URL: <https://www.iiste.org/Journals/index.php/ISDE/article/view/19583>
30. Mikheenko I. S., Romanov A. M. Unified Control System for Modular Reconfigurable Robots // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) (28–31 Jan. 2019). Saint Petersburg, Moscow : IEEE, 2019. P. 661–665. doi: <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8656759>
31. Чугунов М. В., Полунина И. Н. Междисциплинарное моделирование роботов с использованием систем автоматизированного проектирования // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 2. С. 181–190. doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.181-190>
32. Чугунов М. В., Полунина И. Н., Попков М. А. Проектирование квадрокоптера на базе интегрированной модельной среды // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 2. С. 169–186. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.169-186>

Поступила 28.06.2021; одобрена после рецензирования 10.08.2021; принята к публикации 17.09.2021

Об авторах:

Чугунов Михаил Владимирович, заведующий кафедрой конструкторско-технологической информатики Рузавевского института машиностроения Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5318-5684>, Researcher ID: H-7452-2018, m.v.chugunov@mail.ru

Полунина Ирина Николаевна, доцент кафедры конструкторско-технологической информатики Рузавевского института машиностроения Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат педагогических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1093-8401>, Researcher ID: H-7473-2018, my_pk@mail.ru

Дивин Александр Георгиевич, профессор кафедры мехатроники и технологических измерений Тамбовского государственного технического университета (392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7578-0505>, Researcher ID: G-5718-2017, agd@yandex.ru

Генералова Александра Александровна, доцент кафедры транспортных машин Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3900-619X>, Researcher ID: AAS-6867-2021, generalova_aa@mail.ru

Никулин Артем Анатольевич, аспирант кафедры транспортных машин Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1834-6053>, artem.nikulin2003@yandex.ru

Бычков Дмитрий Сергеевич, аспирант кафедры транспортных машин Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1648-2289>, Researcher ID: AAS-5799-2021, deciptikon@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

М. В. Чугунов – концепция и структура проекта, разработка моделей движения и каркаса при-
ложения.

И. Н. Полунина – 3D-моделирование деталей и сборок, разработка программного обеспечения.

А. Г. Дивин – разработка математических моделей и алгоритмов.

А. А. Генералова – разработка натурной модели.

А. А. Никулин – проведение численных экспериментов.

Д. С. Бычков – проведение натурных экспериментов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Gorodetsky V., Skobelev P., Mařík V. System Engineering View on Multi-Agent Technology for Industrial Applications: Barriers and Prospects. *Cybernetics and Physics*. 2020; 9(1):13-30. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.35470/2226-4116-2020-9-1-13-30>
2. Gonzalez-de-Santos P., Fernández R., Sepúlveda D., et al. Field Robots for Intelligent Farms—Inhering Features from Industry. *Agronomy*. 2020; 10(11). (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy10111638>
3. Chen Y., Zhang B., Zhou J., et al. Real-Time 3D Unstructured Environment Reconstruction Utilizing VR and Kinect-Based Immersive Teleoperation for Agricultural Field Robots. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020; 175. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105579>
4. Matraji K., Al-Wahedi K., Al-Durra A. Higher-Order Super-Twisting Control for Trajectory Tracking Control of Skid-Steered Mobile Robot. *IEEE Access*. 2020; 8:124712-124721. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007784>
5. Salinas L.R., Santiago D., Sławiński E., et al. P+d Plus Sliding Mode Control for Bilateral Teleoperation of a Mobile Robot. *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2018; 16:1927-1937. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/s12555-017-0439-x>
6. Xincheng G., Zhenying L., Caihong L. Finite Time Tracking Control of Mobile Robot Based on Non-Singular Fast Terminal Sliding Mode. *Systems Science & Control Engineering*. 2018; 6(1):492-500. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1080/21642583.2018.1542636>
7. Wu X., Jin P., Zou T., et al. Backstepping Trajectory Tracking Based on Fuzzy Sliding Mode Control for Differential Mobile Robots. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2019; 96:109-121. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/s10846-019-00980-9>
8. Shamshiri R.R., Weltzien C., Hameed I.A., et al. Research and Development in Agricultural Robotics: a Perspective of Digital Farming. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018; 11(4). (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181104.4278>
9. Qiu Q., Fan Z., Meng Z., et al. Extended Ackerman Steering Principle for the Coordinated Movement Control of a Four Wheel Drive Agricultural Mobile Robot. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018; 152(9):40-50. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.06.036>
10. Gao G., Qin Q., Chen Sh. Turning Control of a Mobile Robot Forgreenhouse Spraying Based on Dynamic Sliding Mode Control. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2017; 14(6). (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1177/1729881417744754>

Technologies and means of agricultural mechanization

11. Matraji I., Al-Durra A., Haryono A., et al. Trajectory Tracking Control of Skid-Steered Mobile Robot Based on Adaptive Second Order Sliding Mode Control. *Control Engineering Practice*. 2018; 72(3):167-176. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2017.11.009>
12. Morales L., Herrera M., Camacho O., et al. LAMDA Control Approaches Applied to Trajectory Tracking for Mobile Robots. *IEEE Access*. 2021; (9):37179-37195. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3062202>
13. Slawiński E., Santiago D., Mut V. Dual Coordination for Bilateral Teleoperation of a Mobile Robot with Time Varying Delay. *IEEE Latin America Transactions*. 2020; 18(10):1777-1784. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9387669>
14. Li W., Ding L., Gao H., Tavakoli M. Haptic Tele-Driving of Wheeled Mobile Robots under Non-ideal Wheel Rolling, Kinematic Control and Communication Time Delay. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2020; 50(1):336-347. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/TSMC.2017.2738670>
15. Zheng Y., Brudnak M., Jayakumar P., Stein J.L. Evaluation of a Predictor-Based Framework in High-Speed Teleoperated Military UGVs. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*. 2020; 50(6):561-572. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/THMS.2020.3018684>
16. Tzafestas S.G. Mobile Robot Control and Navigation: A Global Overview. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2018; 91:35-58. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/s10846-018-0805-9>
17. Rapoport L.B. Estimation of Attraction Domains in Wheeled Robot Control. *Automation and Remote Control*. 2006; 67:1416-1435. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1134/S0005117906090062>
18. Gilimyanov R.F., Pesterev A.V., Rapoport L.B. Motion Control for a Wheeled Robot Following a Curvilinear Path. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2008; 47:987-994. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1134/S1064230708060129>
19. Rapoport L.B. The Periodic Solution of Two-Dimensional Linear Nonstationary Systems and Estimation of the Attraction Domain Boundary in the Problem of Control of a Wheeled Robot. *Automation and Remote Control*. 2011; 72:2339-2347. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1134/S0005117911110087>
20. Pesterev A.V., Rapoport L.B. Stabilization Problem for a Wheeled Robot Following a Curvilinear Path on Uneven Terrain. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2010; 49:672-680. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1134/S1064230710040155>
21. Pesterev A.V. Synthesis of a Stabilizing Control for a Wheeled Robot Following a Curvilinear Path. *Automation and Remote Control*. 2012; 73:1134-1144. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1134/S000511791207003X>
22. Pesterev A.V., Rapoport L.B. Canonical Representation of the Path Following Problem for Wheeled Robots. *Automation and Remote Control*. 2013; 74:785-801. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1134/S0005117913050044>
23. Balabanov P.V., Divin A.G., Egorov A.S., Yudaev V.A. Mechatronic System for Fruit and Vegetables Sorting. In: II International Scientific Conference “Advanced Technologies in Aerospace, Mechanical and Automation Engineering” (18-21 November 2019). Vol. 734. Krasnoyarsk; 2019. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/734/1/012128>
24. Berestova S.A., Misyura N.E., Mityushov E.A. Kinematic Control of Vehicle Motion. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Kompyuternye nauki* = Bulletin of Udmurt University. Mathematics. Mechanics. Computer Science. 2015; 25(2):254-266. Available at: <http://www.mathnet.ru/links/0ee54f8b9a883b3110138244e322e405/vuu482.pdf> (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
25. Devyaterikov E.A. Algorithm Describing Mobile Robot Path Using the Visual Odometer Data for Automatic Returning to Operator. *Nauka i obrazovanie. MGU im. N. E. Bauman* = Science & Education. Bauman MSTU. 2014; (12):705-715. Available at: <https://clck.ru/YK7bM> (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
26. Li J., Dang P., Li Y., Gu B. A General Euler Angle Error Model of Strapdown Inertial Navigation Systems. *Applied Sciences*. 2018; 8(1). (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3390/app8010074>
27. Sekaran J., Kaluvan H., Irudhayaraj L. Modeling and Analysis of GPS-GLONASS Navigation for Car Like Mobile Robot. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2020; (15):927-935. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/s42835-020-00365-1>
28. Stelian-Emilian O. Mobile Robot Platform with Arduino Uno and Raspberry Pi for Autonomous Navigation. *Procedia Manufacturing*. 2019; 32:572-577. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.254>

29. Al-Sahib N.K.A., Azeez M.Z. Build and Interface Internet Mobile Robot using Raspberry Pi and Arduino. *Innovative Systems Design and Engineering*. 2015; 6(1):106-114. (In Eng.) URL: <https://www.iiste.org/Journals/index.php/ISDE/article/view/19583>

30. Mikheenko I.S., Romanov A.M. Unified Control System for Modular Reconfigurable Robots. In: 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICConRus) (28-31 Jan. 2019). Saint Petersburg, Moscow: IEEE; 2019. p. 661-665. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/EICConRus.2019.8656759>

31. Chugunov M.V., Polunina I.N. Interdisciplinary Modelling of Robots Using CAD/CAE Technology. *Vestnik Mordovskogo universiteta = Mordovia University Bulletin*. 2018; 28(2):181-190. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.181-190>

32. Chugunov M.V., Polunina I.N., Popkov M.A. The Quadcopter Design Based on Integrated Model Environment. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems*. 2019; 29(2):169-186. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.169-186>

Submitted 28.06.2021; approved after reviewing 10.08.2021; accepted for publication 17.09.2021

About the authors:

Mikhail V. Chugunov, Head of the Chair of Design and Technology Informatics of Ruzaevka Institute of Mechanical Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5318-5684>, Researcher ID: H-7452-2018, m.v.chugunov@mail.ru

Irina N. Polunina, Associate Professor of the Chair of Design and Technology Informatics of Ruzaevka Institute of Mechanical Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sci. (Ped.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1093-8401>, Researcher ID: H-7473-2018, my_pk@mail.ru

Alexander G. Divin, Professor of the Chair of Mechatronics and Technological Measurement, Tambov State Technical University (106 Sovetskaya St., Tambov 392000, Russian Federation), Dr.Sci (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7578-0505>, Researcher ID: G-5718-2017, agd@yandex.ru

Aleksandra A. Generalova, Associate Professor the Chair of Transport Machinery, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3900-619X>, Researcher ID: AAS-6867-2021, generalova_aa@mail.ru

Artem A. Nikulin, Postgraduate Student of the Chair of Transport Machinery, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1834-6053>, artem.nikulin2003@yandex.ru

Dmitriy S. Bychkov, Postgraduate Student of the Chair of Transport Machinery, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1648-2289>, Researcher ID: AAS-5799-2021, deciptikon@mail.ru

Contributions of the authors:

M. V. Chugunov – concept and structure of the project, development of traffic models and the application framework.

I. N. Polunina – 3D modeling of parts and assemblies, software development.

A. G. Divin – development of mathematical models and algorithms.

A. A. Generalova – development of the field model.

A. A. Nikulin – numerical experiments.

D. S. Bychkov – conducting field experiments.

All authors have read and approved the final manuscript.

Информация для авторов и читателей

Научный журнал «Инженерные технологии и системы» публикует оригинальные научные исследования, способствующие развитию науки в области инженерных систем и технологий.

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

01.03.02 Приборы и методы экспериментальной физики

01.03.06 Оптика

01.03.13 Электрофизика, электрофизические установки

04.03.01 Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

04.03.02 Электротехнологии, электрооборудование и электроснабжение агропромышленного комплекса

Не допускается направление в редакцию уже опубликованных статей или статей, отправленных на публикацию в другие журналы. **В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий опубликованная статья будет ретрагирована (отозвана из печати).** Мониторинг несанкционированного цитирования осуществляется с помощью систем «Антиплагиат» и CrossCheck.

Журнал приветствует статьи, имеющие потенциально высокий импакт-фактор и/или содержащие материал о значительных достижениях в указанных направлениях. Особое внимание следует уделить качеству перевода. Желательно, чтобы он был выполнен носителем английского языка.

При подготовке статьи к публикации в журнале «Инженерные технологии и системы» необходимо учесть следующие пункты:

1. Указать **УДК**.

2. **Заголовок статьи** должен кратко и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного исследования. *Приводится на русском и английском языках.*

3. **Аннотация** (200–250 слов) выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В ней должны быть четко обозначены следующие составные части:

1) Введение (Introduction);

2) Материалы и методы (Materials and Methods);

3) Результаты исследования (Results);

4) Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion).

Приводится на русском и английском языках.

4. **Ключевые слова** (5–10) являются поисковым образом научной статьи. В связи с этим они должны отражать основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования. *Приводятся на русском и английском языках.*

5. **Благодарности**. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам. *Приводятся на русском и английском языках.*

6. **Основной текст** статьи излагается на русском или английском языках.

1) Введение – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

2) Обзор литературы. Необходимо описать основные (последние по времени) исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы; выделить нерешенные вопросы в пределах общей проблемы, которым посвящена статья.

3) Материалы и методы. В данном разделе описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, использованная аппаратура; даются подробные сведения об объекте исследования; указывается последовательность выполнения исследования и обосновывается выбор используемых методов (наблюдение, опрос, тестирование, эксперимент, лабораторный опыт и т. д.).

4) Результаты исследования. Это основной раздел, цель которого – при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно эти данные.

5) Обсуждение и заключение. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области.

7. **Список использованных источников** (оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008). Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 30–40 источников. Из них за последние 3 года – не менее 20, иностранных – не менее 15. Следует указать DOI или адрес доступа в сети Интернет. *Оформляется на русском и английском языках.*

8. **Об авторах.** Ф.И.О., организация(и), адрес организации(й) (требуется указать все места работы автора, в которых выполнялись исследования (постоянное место, место выполнения проекта и др.)), должность и ученое звание, ORCID, Researcher ID, электронная почта, телефон, почтовый адрес для отправки авторского экземпляра. *Приводится на русском и английском языках.*

9. **Заявленный вклад соавторов.** В конец рукописи необходимо включить примечания, в которых разъясняется фактический вклад каждого соавтора в выполненную работу. *Приводится на русском и английском языках.*

10. **Техническое оформление.**

1) Редакция принимает тексты, сохраненные в формате .doc, .docx, .rtf. Желательно использовать шрифт Times New Roman, кегль 14 и интервал 1,5 строки. Расстановка переносов вручную не допускается. Запрещается использовать двойные пробелы в тексте, а также выполнять отступы (красная строка), используя пробелы.

2) Формулы набираются сочетанием основного шрифта и шрифта Symbol (исключение для дробей, сумм, квадратного корня) в Microsoft Equation 3.0 (Редактор формул в Microsoft Word) или Math Type 6. Латинские знаки в формулах и обозначениях (как в тексте, так и на рисунках) набираются курсивом. Формулы нумеруются в круглых скобках. Нумеровать следует только те формулы и уравнения, на которые есть ссылка в последующем изложении.

3) Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

4) Рисунки могут быть представлены в растровом или векторном формате с разрешением не ниже 300 dpi. Они должны допускать редактирование текста и возможность изменения размеров. Все графические данные помещаются в текст статьи, а также высылаются дополнительно в виде отдельных файлов. Разнохарактерные иллюстрации необходимо приводить к единому стилю графического исполнения, соблюдая единообразие их оформления. Графики, схемы и диаграммы необходимо оформлять в Microsoft Excel.

При подаче статьи в редакцию автор соглашается с положениями прилагаемого лицензионного договора.

Важным этапом в процессе отбора статьи является рецензирование. В журнале «Инженерные технологии и системы» принято «двойное слепое» (рецензент и автор не знают имен друг друга) рецензирование статей. Рецензент на основании анализа статьи принимает решение о рекомендации ее к публикации или о ее отклонении. В случае несогласия автора статьи с замечаниями рецензента его мотивированное заявление рассматривается редакционной коллегией.

Политика редакционной коллегии журнала базируется на современных юридических требованиях в отношении клеветы, авторского права, законности и плагиата, поддерживает Кодекс этики научных публикаций, сформулированный Комитетом по этике научных публикаций, и строится с учетом этических норм работы редакторов и издателей, закрепленных в Кодексе поведения и руководящих принципах наилучшей практики для редактора журнала и Кодексе поведения для издателя журнала, разработанных Комитетом по публикационной этике (COPE).

«Инженерные технологии и системы» – журнал открытого доступа, то есть все содержание находится в свободном доступе бесплатно для пользователя в соответствии с определением ВОАИ открытого доступа. Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная.

Журнал распространяется по подписке, заявкам высших учебных заведений, учреждений образования и отдельных лиц. Подписной индекс – 70539.

Сенин Петр Васильевич – главный редактор. Тел.: +7 (8342) 23-32-60.

Левцев Алексей Павлович – заместитель главного редактора. Тел.: +7 (8342) 25-41-01.

Гордина Светлана Викторовна – ответственный секретарь. Тел.: +7 (8342) 48-14-24.

Information for authors and readers of the journal

Engineering Technologies and Systems journal accepts unpublished earlier original research results promoting the development of science in the field of engineering systems and technologies.

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Technologies, Machinery and Equipment for Agro-Industries

Electrotechnics, Electrical Equipment and Power Supply in Agro-Industries

It is not allowed to submit papers that have already been published or sent for publication to other journals. **In the case of multiple submission of a manuscript, the published article will be retracted.** Monitoring of unauthorized citation is implemented by means of Antiplagiat and CrossCheck systems.

The journal gives preference to the articles with potentially high impact factor and/or containing materials about significant achievements in the specified areas of science. Special attention should be paid to the quality of the translation. Preferably it should be made by a native English speaker.

To submit an article in the journal *Engineering Technologies and Systems* you should know:

1. It is necessary to indicate the **Universal Decimal Classification (UDC)** code.

2. **The title of the article** should accurately reflect the content of the article, the subject matter and the results of the research conducted.

The title should be written in Russian and English.

3. **The abstract** (200–250 words) serves as an enhanced title of the article and briefly presents its content. The abstract consists of the following components:

1) Introduction;

2) Materials and Methods;

3) Results;

4) Discussion and Conclusion.

The abstract should be written in Russian and English.

4. **Keywords** (5–10) make the search profile of the scientific article. In this regard, they should reflect the main provisions, achievements, results and terminology of the scientific research.

Keywords should be written in Russian and English.

5. **Acknowledgements.** In this section the author may mention the people who helped them to prepare the article or the organizations that provided financial support. It is considered good style to express gratitude to anonymous reviewers.

Acknowledgements should be written in Russian and English.

6. **The main body** of the article should be written in Russian or in English.

1) **Introduction.** It contains formulation of the scientific problem, its relevance, connection with the most important tasks to be solved, the importance for the development of a particular area of science or practical activities.

2) **Literature Review.** It is necessary to describe the main (recent) pieces of research and publications relied upon by the author, modern views on the problem, difficulties in solving the problem as well as to highlight the unresolved issues within the general problem of the article.

3) **Materials and Methods.** This section describes the process of designing the experiment, the methods and equipment used; it gives detailed information about the subject and sequence of the research, justifies the choice of the methods used (observation, survey, testing, experiment, etc.).

4) **Results.** This is the main section, the purpose of which is to prove the working hypothesis (hypotheses) by analyzing, generalizing and explaining the data. The results should be brief, but they should provide sufficient information to evaluate the conclusions drawn. It should also be justified why the particular data were chosen for the analysis.

5) **Discussion and Conclusion.** In conclusion, the results of understanding the topic should be summarized; conclusions, generalizations and recommendations arising from the work should be made, their practical significance should be emphasized and the main directions for further research in the studied area should be determined.

7. **References** should be given in accordance with the requirements of the *GOST R 7.0.5–2008* standard. The original sources from scientific journals included in the global citation indices should be cited first of all. It is desirable to refer to 30–40 sources. Of these, at least 20 sources should be those published over the past 3 years and at least 15 foreign ones. DOI or the URL of the source should be indicated.

References should be written in Russian and English.

8. Information **about the author(s)** includes: the author's first name and last name, the name of the institution and its address (it is required to specify all the institutions where the author works and where the research was conducted (permanent place of work, the place where the project was done, etc.)). The author's position and academic title, ORCID, Researcher ID, e-mail, phone number, postal address for sending a personal copy of the journal issue.

Information about the authors should be written in Russian and English.

9. **Contribution of the authors.** At the end of the manuscript, the authors should include notes that explain the actual contribution of each co-author to the work performed.

Contribution of the authors should be written in Russian and English.

10. **Manuscript Format Guidelines.**

1) The manuscript should be typed in the Microsoft Word text processing program for Windows (.doc, .docx, .rtf): sheet size – A4, Times New Roman font, font size – 14, line spacing – 1.5. Manual hyphenation is not allowed. It is forbidden to use double spaces in the text, as well as to indent (red line) using spaces.

2) Formulas are typed by combining the main font and the Symbol font (exception for fractions, sums, square root) in Microsoft Equation 3.0 (Formula Editor in Microsoft Word) or Math Type 6. Latin symbols in formulas and notation (both in the text and in the figures) typed in italics. Formulas are numbered in parentheses. Only those formulas and equations referenced in the following presentation should be numbered.

3) All titles, signatures and structural elements of graphs, tables, charts, etc., are to be provided in Russian and English.

4) Figures can be presented in raster or vector format with a resolution of at least 300 dpi. They should allow text editing and resizability. All graphic data are placed in the text of the article, as well as sent additionally as separate files. Diverse illustrations should be brought to a single style of graphic performance, while respecting the uniformity of their design. Graphs, charts and diagrams must be drawn up in Microsoft Excel.

When submitting an article to the journal, the author agrees with the provisions of the attached license agreement.

As part of the submission, the journal will peer review your article before deciding whether to publish it. *Engineering Technologies and Systems* journal uses double-blind review, which means that both the reviewer and author identities are concealed from the reviewers, and vice versa. On the basis of the analysis of the article, the reviewer makes a decision whether to recommend the article for publication or reject it. If the author disagrees with the reviewer's comments, their reasoned statement shall be considered by the Editorial Board.

Editorial staff's policy is based on modern legal requirements concerning libel, copyright, legitimacy, plagiarism, ethical principles, kept in community of leading scientific issues publishers. Journal's editorial policy is based upon traditional ethical principles of Russian academic periodicals; it supports Academic Periodicals Ethical Codex, stated by Committee on Publication Ethics (Russia, Moscow) and it is formed in account of standards of ethics of editors' and publishers' work confirmed by Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors and Code of Conduct for Journal Publishers, developed by Committee on Publication Ethics (COPE).

Engineering Technologies and Systems is an open access journal, which means that all content is freely available without charge to the user or his/her institution. Users are allowed to read, download, copy, distribute, print, search, or link to the full texts of the articles, or use them for any other lawful purpose, without asking prior permission from the publisher or the author in accordance with the BOAI definition of open access. All the materials of the journal are made available under a Creative Commons "Attribution" 4.0 license.

The journal is distributed on the basis of a subscription, requests of higher education institutions, educational institutions and individuals. The subscription index is 70539.

Petr V. Senin – Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 233260.

Alexey P. Levitsev – Deputy Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 254101.

Svetlana V. Gordina – Executive Editor. Tel.: +7 (8342) 481424.

Редактор – *А. Д. Карпов*
Перевод *С. В. Голованова, Н. Н. Плеханковой*
Компьютерная верстка *Е. П. Гординой*
Информационная поддержка *Р. В. Карасева*

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Подписано в печать 14.12.2021 г. Дата выхода в свет 30.12.2021 г.

Формат $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 11,38.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 250 экз. Заказ № 1978. Свободная цена.

Адрес типографии: 430005, Российская Федерация, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Советская, д. 24
(Издательство федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва»)



Editor *A. D. Karpov*
Translation *S. V. Golovanov, N. N. Plekhankova*
Desktop publishing *E. P. Gordina*
Informational support *R. V. Karasev*

Distributed in Russian Federation and foreign countries.

Signed to print 14.12.2021. Date of publishing 30.12.2021.

Sheet size $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Conventional printed sheets 11.38.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 250 copies. Order no. 1978. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)