

DOI: 10.15507/0236-2910.028.201803 ISSN 0236-2910 (Print), 2313-0636 (Online)

Том 28, № 3. 2018

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



Vol. 28, no. 3. 2018

SCIENTIFIC JOURNAL
Founded in January 1990
Issued quarterly

16+

ВЕСТНИК МОРДОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА MORDOVIA UNIVERSITY BULLETIN

DOI: 10.15507/0236-2910

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

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

E-mail: vestnik_mrsu@mail.ru; <http://vestnik.mrsu.ru>

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, SHERPA/ReMEO и ResearchBib

Является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ),
Комитета по этике научных публикаций,

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и CrossRef

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор),
свидетельство ПИ № ФС77-65881 от 27.05.2016 г.

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

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

Founder, Publisher and Editorial House address:
68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005,
Republic of Mordovia, Russia
Phone, fax: +7 (8342) 48-14-24

© ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», 2018

Научный журнал «Вестник Мордовского университета»

принимает не опубликованные ранее научные статьи и дискуссионные материалы научного характера кандидатов и докторов наук, преподавателей, аспирантов и студентов старших курсов (в соавторстве).

Наименование и содержание рубрик журнала соответствуют отраслям науки и группам специальностей научных работников, согласно Номенклатуре специальностей научных работников:

01.04.00 Физика

05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление

05.20.00 Процессы и машины агроинженерных систем

Журнал осуществляет научное рецензирование (двустороннее слепое) всех поступающих в редакцию материалов с целью экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в издательстве и редакции в течение 5 лет.

Редакция журнала направляет авторам представленных материалов копии рецензий или мотивированный отказ.

Редакция журнала направляет копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении соответствующего запроса. 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).

Журнал индексируется и архивируется в базах данных:

Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

EBSCO

ResearchBib

SHERPA/RoMEO

Журнал является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ),

Комитета по этике научных публикаций,

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и Cross Ref

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





“Mordovia University Bulletin” journal

accepts scholarly articles and debatable academic materials not published before from holders of the following degrees: Ph.D., D.Sc., lecturer, postgraduate student and senior student (co-authored).

The titles and contents of the journal sections correspond to fields of science and specialty groups of scientists, according to the Nomenclature of scientific specialties:

01.04.00 Physics

05.13.00 Computer Science, Computer Engineering and Management

05.20.00 Processes and Machines of Argoengineering Systems

All reviewers are acknowledged experts in the areas they are responsible for. Reviews are stored in the publishing house and publishing office during 5 years.

Editorial staff sends to the authors of the received materials copies of reviews or a substantiated refusal.

Editorial staff of the journal forwards copies of reviews in Ministry of Education and Science of the Russian Federation by request.

The journal is included in the “List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, where should be published the main results of dissertations for the degrees of Doctor and Candidate of sciences” (list of VAK).

The journal is indexed and archived by databases:

Russian Index of Scientific Citations

EBSCO

ResearchBib

SHERPA/RoMEO

The journal is a member of Directory of Open Access Journals (DOAJ),

Cross Ref and ASEP

All the materials of the “Mordovia University Bulletin” journal are available under Creative Commons “Attribution” 4.0 license



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

Маргулис Виктор Александрович – *главный научный редактор*, заведующий кафедрой теоретической физики, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор физико-математических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-6281-9714, margulisva@mrsu.ru (Саранск, Россия)

Гордина Светлана Викторовна – *ответственный секретарь*, кандидат педагогических наук, ORCID: 0000-0003-2265-418X, vestnik_mrsu@mail.ru (Саранск, Россия)

Аллахвердиев Сурхай Рагим оглы – академик Российской Академии Естествознания, профессор кафедры лесной индустрии, Бартынский государственный университет, профессор кафедры экологии и природопользования, ФГБОУ ВО «Московский педагогический государственный университет», доктор биологических наук, профессор (Бартын, Турция)

Булгаков Алексей Григорьевич – профессор Института строительного дела, Дрезденский технический университет, доктор технических наук, профессор (Дрезден, Германия)

Дианов Евгений Михайлович – академик Российской академии наук, директор ФГБУН «Научный центр волоконной оптики Российской академии наук», доктор физико-математических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-5017-2287 (Москва, Россия)

Димитров Валерий Петрович – декан факультета приборостроения и технического регулирования, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-1439-1674 (Ростов-на-Дону, Россия)

Ерофеев Владимир Трофимович – академик Российской академии архитектуры и строительных наук, декан архитектурно-строительного факультета, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор технических наук, профессор (Саранск, Россия)

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

Игумнов Леонид Александрович – директор Научно-исследовательского института механики, заведующий кафедрой теоретической, компьютерной и экспериментальной механики, ФГАОУ ВО «Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского», доктор физико-математических наук, профессор (Нижний Новгород, Россия)

Калашников Владимир Иванович – заведующий кафедрой технологии строительных материалов и деревообработки, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-1979-4678 (Пенза, Россия)

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

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

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

Микаева Светлана Анатольевна – профессор кафедры ПР-4 «Электротехника и электроника», ФГБОУ ВО «Московский технологический университет», доктор технических наук, профессор (Москва, Россия)

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

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

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

Салем Абдель-Бахед Мохамед – руководитель Исследовательских лабораторий в области искусственного интеллекта и знаний, профессор факультета компьютерных и информационных наук, университет «Ain Shams», доктор наук в области компьютерных технологий, заслуженный профессор (Каир, Египет)

Скрябин Владимир Александрович – профессор кафедры технологии машиностроения, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», доктор технических наук, ORCID: 0000-0001-7156-9198 (Пенза, Россия)

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

Шишелова Тамара Ильинична – профессор кафедры физики, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», доктор технических наук, профессор (Иркутск, Россия)

Ямашкин Анатолий Александрович – заведующий кафедрой землеустройства и ландшафтного планирования, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор географических наук, профессор (Саранск, Россия)



EDITORIAL BOARD

- Sergey M. Vdovin** – *Editor in Chief*, Rector of National Research Mordovia State University, Ph.D. (Economics), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-7363-1389, rector@mrsu.ru (Saransk, Russia)
- Petr V. Senin** – *Deputy Editor in Chief*, Vice Rector for Science and Research, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-3400-7780, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru (Saransk, Russia)
- Viktor A. Margulis** – *Science Editor in Chief*, Head of Theoretical Physics Chair, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, ORCID: 0000-0001-6281-9714, margulisva@mrsu.ru (Saransk, Russia)
- Svetlana V. Gordina** – *Executive Editor*, Ph.D. (Pedagogy), ORCID: 0000-0003-2265-418X, vestnik_mrsu@mail.ru (Saransk, Russia)
- Surhay Allahverdi** – Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Head of Forest Industry Chair, Bartin University, Professor of Ecology and Nature Management Chair, Moscow Pedagogical State University, D.Sc. (Biology), Professor (Bartın, Turkey)
- Aleksey G. Bulgakov** – Professor of Faculty of Architecture, Dresden University of Technology, D.Sc. (Engineering), Professor (Dresden, Germany)
- Ivan I. Chuchayev** – Dean of Mathematics and Information Technology Faculty, National Research Mordovia State University, Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor (Saransk, Russia)
- Yevgeniy M. Dianov** – Academician of the Russian Academy of Sciences, Director of Fiber Optics Research Center, Russian Academy of Sciences, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, ORCID: 0000-0002-5017-2287 (Moscow, Russia)
- Valeriy V. Dimitrov** – Dean of Device Manufacturing and Technical Regulation Faculty, Don State Technical University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-1439-1674 (Russia, Rostov-on-Don)
- Leonid A. Igumnov** – Director of Research Institute of Mechanics, Head of Numerical Simulation of Theoretical, Computer and Experimental Mechanics Chair, Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor (Nizhniy Novgorod, Russia)
- Vladimir I. Kalashnikov** – Head of Construction Material Technology and Woodwork Chair, Penza State University of Architecture and Construction, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0002-1979-4678 (Penza, Russia)
- Vladimir N. Kechemaykin** – Director of Ruzayevka Campus, National Research Mordovia State University, Ph.D. (Economy) (Saransk, Russia)
- Aleksandr V. Kotin** – Director of Institute of Mechanics and Energy, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-0078-1866 (Saransk, Russia)
- Fedor V. Kusmartsev** – Dean of Institute of Physics, Loughborough University, Ph.D. (Phys.-Math.) (Loughborough, Great Britain)
- Svetlana A. Mikayeva** – Professor of Electrotechnics and Electronics Chair, Moscow Engineering University, D.Sc. (Engineering), Professor (Moscow, Russia)
- Konstantin N. Nishchev** – Director of Institute of Physics and Chemistry, National Research Mordovia State University, Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-7905-3700 (Saransk, Russia)
- Yuriy N. Prytkov** – Director of Institute of Agriculture, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Agriculture), Professor (Saransk, Russia)
- Polina A. Ryabochkina** – Professor of Chair of General Physics, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Phys.-Math.), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-8503-8486 (Saransk, Russia)
- Abdel-Badeeh M. Salem** – Head of Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Research Labs, Professor of Faculty of Computer and Information Sciences, Ain Shams University, D.Sc. (Computer Science), Emeritus Professor (Cairo, Egypt)
- Tamara I. Shishelova** – Professor of Physics Chair, Irkutsk National Research Technical University, D.Sc. (Engineering), Scopus ID: 6507978465 (Irkutsk, Russia)
- Vladimir A. Skryabin** – Professor of Machine Engineering Technology Chair, Penza State University, D.Sc. (Engineering), ORCID: 0000-0001-7156-9198 (Penza, Russia)
- Anatoliy A. Yamashkin** – Head of Land Utilization and Landscape Design Chair, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Geography), Professor (Saransk, Russia)
- Vladimir T. Yerofeyev** – Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Dean of Architectural And Civil Engineering Faculty, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Engineering), Professor (Saransk, Russia)
- Olga Ye. Zheleznikova** – Director of Institute of Electronics and Light Engineering, National Research Mordovia State University, Ph.D. (Engineering), Associate Professor (Saransk, Russia)



СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Верхогуров А. Д., Иванов В. И., Дорохов А. С., Коневцов Л. А., Величко С. А.** Влияние природы электродных материалов на эрозию и свойства легированного слоя. Критерии оценки эффективности электроискрового легирования.....302
- Шаманаев П. А., Язовцева О. С.** Исследование устойчивости положения равновесия системы динамики биоценоза в условиях межвидового взаимодействия.....321

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- Харин А. А., Харина О. С., Родионов А. В., Петрова Е. С.** Перспективная модель инновационной структуры, охватывающей университет, исследовательский центр и предприятие.....333
- Липасов П. П., Щенников В. Н.** Устойчивость относительно части переменных при постоянно действующих возмущениях «частичного» положения равновесия нелинейных систем дифференциальных уравнений.....344
- Ямашкин С. А., Ямашкин А. А.** Повышение эффективности процесса интерпретации данных дистанционного зондирования Земли за счет анализа дескрипторов окрестности.....352

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

- Антибас И. Р., Дьяченко А. Г.** Моделирование, изучение и изготовление стойки культиватора из композитных материалов.....366
- Овчинников В. А., Чаткин М. Н., Овчинникова А. В.** Оптимизация параметров и режимов работы дискового высевающего аппарата по критерию равномерности высева.....379
- Галкин А. В., Фадеев Д. Г., Ушаповский И. В.** Исследование качественных характеристик льноволокна в зависимости от конструкции очесывающего аппарата.....390
- Купряшкин В. Ф., Уланов А. С., Наумкин Н. И.** Обоснование конструкции динамометрического модуля для исследования лемешно-отвального плуга мотоблока и его практическая апробация с использованием технологий реверс-инжиниринга.....400



ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Мокрушин С. А., Хорошавин В. С., Охапкин С. И., Зотов А. В., Грудинин В. С. Анализ управляемости и устойчивости приближенной модели теплопереноса в автоклаве.....	416
Гайдар С. М., Низамов Р. К., Голубев М. И., Голубев И. Г. Защитная эффективность водорастворимых ингибиторов коррозии.....	429
Плотников С. А., Бузиков Ш. В., Товстыка В. С., Черемисинов П. Н. Определение эксплуатационных показателей трактора «Беларус-922» при работе на смесевом топливе.....	445
<i>Информация для авторов и читателей (на рус. яз.)</i>	460
<i>Информация для авторов и читателей (на англ. яз.)</i>	462

Материалы журнала Вестник Мордовского университета
доступны на официальном сайте: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/ru/>

Вестник Мордовского университета
научный журнал

[ГЛАВНАЯ](#) [РЕДАККОЛЛЕГИЯ](#) [ЭКСПЕРТНЫЙ СОВЕТ](#) [РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА](#)





 ISSN 2313-0636 (Online)
 ISSN 0236-2910 (Print)
 Основан в 1990 году
 Свидетельство о регистрации
 ПИ № ФС77-65881
 от 6 июня 2016 г.

Вы здесь: Главная

СВЕЖИЙ НОМЕР

МОРДОВСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ВЕСТНИК
научный журнал



Том 28 № 3 2018
ISSN 0236-2910
ISSN 2313-0636

СКАЧАТЬ

Вестник Мордовского университета

Печать

Научный журнал

Основан в 1990 году.
Журнал создан в соответствии с решением Госкомиздата РСФСР от 28.09.89 № 05-1832-1516/83 об издании «Вестника Мордовского университета».
Рецензируемый научный журнал «Вестник Мордовского университета» публикует материалы, способствующие развитию российской науки и внедрению ее достижений в учебный процесс по подготовке высококвалифицированных кадров на территории Российской Федерации, ближнего и дальнего зарубежья. Журнал осуществляет научное рецензирование (двустороннее слепое) всех поступающих в редакцию материалов с целью экспертной оценки по следующим отраслям и группам специальностей:

Emerging Sources Citation Index (ESCI)

Clarivate
Analytics

WEB OF SCIENCE[®]
THOMSON REUTERS



ПЕРЕЧЕНЬ
ВАК

НАУЧНАЯ
БИБЛИОТЕКА
LIBRARY.RU

ULRICHSWEB[®]
GLOBAL SERIALS DIRECTORY



CONTENTS

PHYSICS AND MATHEMATICS

- Verkhoturov A. D., Ivanov V. I., Dorokhov A. S., Konevtsov L. A., Velichko S. A.** Effect of the Nature of Electrode Materials on Erosion and Properties of Doped Layers. The Criteria for Evaluating the Effectiveness of Electrospark Alloying.....302
- Shamanaev P. A., Yazovtseva O. S.** Studying the Equilibrium State Stability of the Biocenosis Dynamics System under the Conditions of Interspecies Interaction.....321

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

- Kharin A. A., Kharina O. S., Rodyukov A. V., Petrova E. S.** A Perspective Model of Innovative Integrated Structure Comprising University, Research Facility and Enterprise.....333
- Lipasov P. P., Shchennikov V. N.** Stability with Respect to a Part of Variables under Constant Perturbations of the Partial Equilibrium Position of Differential Equation Nonlinear Systems.....344
- Yamashkin S. A., Yamashkin A. A.** Improving the Efficiency of Remote Sensing Data Interpretation by Analyzing Neighborhood Descriptors.....352

TECHNOLOGIES AND MEANS OF AGRICULTURAL MECHANIZATION

- Antypas I. R., Dyachenko A. G.** Modeling, Studying and Manufacturing a Cultivator Rack from Composite Materials.....366
- Ovchinnikov V. A., Chatkin M. N., Ovchinnikova A. V.** Optimization of Parameters and Operating Modes of Disc Sowing Device According to Seeding Uniformity Criterion.....379
- Galkin A. V., Fadeev D. G., Uschapovsky I. V.** Studying Quality Characteristics of Flax Fiber Depending on Deseeding Device Design.....390
- Kupryashkin V. F., Ulanov A. S., Naumkin N. I.** Design of a Dynamometric Module for Studying a Motoblock Share-Moldboard Plow and Its Practical Testing by Using Reverse Engineering.....400



TECHNOLOGIES AND MEANS OF MAINTENANCE IN AGRICULTURE

Mokrushin S. A., Khoroshavin V. S., Ohapkin S. I., Zotov A. V., Grudinin V. S. The Analysis of Controllability and Stability of an Approximate Model of Heat Transfer in an Autoclave.....	416
Gaidar S. M., Nizamov R. K., Golubev M. I., Golubev I. G. Protective Efficiency of Water-Soluble Corrosion Inhibitors.....	429
Plotnikov S. A., Buzikov S. V., Taustyka V. S., Cheremisinov P. N. Determination of Operational Parameters for Belarus 922 Tractor Running on Mixed Fuel.....	445
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in Russian)</i>	460
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in English)</i>	462

The content of the Mordovia University Bulletin
is available on the official website: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/>

**Вестник Мордовского
университета**
научный журнал

HOME
EDITORIAL BOARD
EXPERT BOARD
EDITORIAL POLICY

ISSN 2313-0636 (Online)
ISSN 0236-2910 (Print)
Founded in 1990
Certificate of registration:
PI № F577-65881
of June 6 2016.

You are here: Home

LATEST ISSUE



Mordovia University Bulletin

Scholarly journal

Founded in 1990.

The journal is created in accordance with resolution of Russian Federation State Committee on Higher Education of RSFSR of 28.09.89 no. 05-1832-1516/83 on publishing of "Mordovia University Bulletin". The periodical has a multidisciplinary focus and publishes materials, promoting the development of Russian science and implementation of its advances into process of training of highly qualified specialists in Russia and abroad.

"Mordovia University Bulletin" journal accepts scholarly articles and debatable academic materials not published before from holders of the following degrees: Ph.D., D.Sc., lecturer, postgraduate student and senior student (co-authored). The journal covers the following specialities:



Emerging Sources Citation Index (ESCI)



ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ / PHYSICS AND MATHEMATICS

УДК 621.9.078.4

DOI: 10.15507/0236-2910.028.201803.302-320



Влияние природы электродных материалов на эрозию и свойства легированного слоя. Критерии оценки эффективности электроискрового легирования

**А. Д. Верхотуров¹, В. И. Иванов², А. С. Дорохов²,
Л. А. Коневцов³, С. А. Величко^{4*}**

¹ИВЭП ДВО РАН (г. Хабаровск, Россия)

²ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (г. Москва, Россия)

³ИМ ХНЦ ДВО РАН (г. Хабаровск, Россия)

⁴ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)

*velichko2005@yandex.ru

Введение. Достоинства метода электроискрового легирования металлических поверхностей, предложенного Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко, заключаются в возможности нанесения на обрабатываемую поверхность изделия из любых токопроводящих материалов упрочненного легированного слоя материала с целью обеспечения высокой твердости, жаростойкости, износостойкости и других свойств исполнительных поверхностей деталей. В работе показана возможность формулировки критериев, устанавливающих эффективность процесса электроискрового легирования и свойства легированного слоя в зависимости от свойств d -элементов, определяемых их положением в таблице Менделеева и числом $(s+d)$ -электронов электродных материалов. Аналогичный подход выявления критериев эффективности может быть рекомендован и для других высокоэнергетических процессов воздействия на материалы.

Материалы и методы. В качестве материала подложки использовалась сталь 45, в качестве анодных материалов для формирования легированного слоя – тугоплавкие d -металлы IV–VI групп: Ti, V, Cr, Zr, Nb, Vо, Hf, Ta, W; а также d -металлы: Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pd, Ag, Cd, Re, Os, Ir, Pt, Au и p -металлы: Al, Bi, Sb, Sn, Pb. Установки, применяемые для электроискрового легирования: ЭФИ-10М, ЭФИ-46А, ЭФИ-25М, ЭФИ-66, Электром-10, ЭЛФА-541, Элитрон-22, ИМЭИ-01-2А; Корона-1101; микроскопы МИИ-4, МИМ-10, БИОЛАМ-М, ЭМА-100, Axiosplan-2; профилограф П-201 «Калибр»; микротвердомеры PMT-3М, DUH-W201 Shimadzu. При исследовании эрозии использовали установку «Atomic absorption spectrophotometer, Varian AA-4»; для лазерной обработки – генератор ГОС-30М и установку СЛС-10-1.

Результаты исследования. Проведено обобщение схем процесса электроискрового легирования при единичном и многократном воздействии модельными анодными материалами. На катоде возникает лунка с различной степенью заполненности материалом катода или представляющая зону взаимной кристаллизации материала анода и катода. При воздействии искрового разряда в газовой среде наблюдаются различия в формировании лунок в связи с более интенсивным

© Верхотуров А. Д., Иванов В. И., Дорохов А. С., Коневцов Л. А., Величко С. А., 2018



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.



переносом эродированного материала на противоположный электрод, особенно на катод. Получены и представлены зависимости некоторых свойств (микротвердость, температура плавления, модуль упругости) тугоплавких d -металлов от их расположения в IV–VI периодах таблицы Менделеева. Например, установлены их размерные и объемные связи при электроискровом легировании. Получены зависимости свойств модельных электродных материалов от статистического веса атомных стабильных конфигураций, а также зависимость эрозии анода из переходных металлов от числа $(s+d)$ -электронов и межэлектродной среды. Представлены закономерности эрозии d -металлов при электроискровом легировании и других видах высокоэнергетического воздействия на поверхность.

Обсуждение и заключения. Для улучшения свойств покрытий и увеличения эффективности электроискрового легирования необходимо отдавать предпочтение анодным материалам с максимальным статистическим весом атомных стабильных конфигураций. Можно утверждать наличие связи свойств материалов электродов с величиной их эрозии и параметрами эффективности формирования легированного слоя при электроискровом легировании, которые для конкретных условий определяются методом подбора соотношений и сравнения с количественными экспериментальными данными ранее установленных зависимостей. Возможен общий подход к формулировке критериев достижения новых свойств материалов в результате высокоэнергетического воздействия на них. Сформулирована гипотеза об определении сходных зависимостей изменения физических и эксплуатационных свойств d -элементов для различных методов локального высокоэнергетического воздействия.

Ключевые слова: электроискровое легирование, электрод, материал, эрозия, электродный материал, легирование

Для цитирования: Влияние природы электродных материалов на эрозию и свойства легированного слоя. Критерии оценки эффективности электроискрового легирования / А. Д. Верхотуров [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 302–320. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.302-320>

Благодарности: Исследование проведено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (госзадание, направление – развитие компетенций, проект № 11.3416.2017/4.6) «Разработка технологий и средств повышения долговечности деталей, узлов, агрегатов машин и оборудования путем создания наноструктурированных покрытий источниками концентрированной энергии».

Effect of the Nature of Electrode Materials on Erosion and Properties of Doped Layers. The Criteria for Evaluating the Effectiveness of Electrospark Alloying

**A. D. Verkhoturov¹, V. I. Ivanov², A. S. Dorokhov²,
L. A. Konevtsov³, S. A. Velichko^{4*}**

¹*Institute of Water and Environmental Problems of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences (Khabarovsk, Russia)*

²*Federal Agricultural Research Centre of National Institute of Engineering (Moscow, Russia)*

³*Institute of Materials Science of the Khabarovsk Scientific Center of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences (Khabarovsk, Russia)*

⁴*National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)*

*velichko2005@yandex.ru

Introduction. The method of electrospark alloying of metal surfaces was proposed by the Russian scientists B. R. Lazarenko and N. I. Lazarenko. It is possible to apply this process to the surface of the workpiece from any conductive materials of a hardened alloyed layer of material to ensure high hardness, heat resistance, wear resistance and other properties of the executive surfaces of the parts. The paper shows the possibility of formulating criteria for determining the efficiency of the electrospark alloying process and the properties of the doped layer, depending on the properties of *d*-elements determined by their position in the periodic table and a number of (*s+d*)-electrons of electrode materials. A similar approach to determining performance criteria can be recommended for other high-energy materials exposure processes.

Materials and Methods. The authors used steel 45 as the material of the rim sections and refractory *d*-metals of IV-VI groups: Ti, V, Cr, Zr, Nb, V, Hf, Ta, W, *d*-metals: Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pd, Ag, Cd, Re, Os, Ir, Pt, Au and *p*-metals: Al, Bi, Sb, Sn, Pb as anode materials for creating doped layers. The installations used for electric-spark alloying: EFI-10M, EFI-46A, EFI-25M, EFI-66, Electrom-10, ELFA-541, Elitron-22, IMEI-01-2A; Corona-1101; microscope MII-4, MIM-10, BIOLAM-M, EMA-100, Axiosplan-2; Profiler P-201 "Caliber"; microthermometry PMT-3M, DUH-W201, Shimadzu. In the study of erosion there we used the installation of "Atovic absorption spectrophotometer, Varian AA-4". The generator GOS-30M and installation SLS-10-1 were used for laser processing.

Results. The generalization of the schemes of the process of electric-spark alloying in single and repeated exposure of the model anode material was made. At the cathode there is a hole with a different degree of filling of the cathode material or representing the zone of mutual crystallization of the anode material and the cathode. When exposed to spark discharge in a gaseous medium, there are differences in the formation of holes due to the more intense transfer of eroded material to the opposite electrode, especially to the cathode. Dependences of some properties (microhardness, melting point, elastic modulus) of refractory *d*-metals on their location in the IV–VI periods of the periodic table are obtained and presented. Dimensional and volumetric relations of *d*-elements in electrospark alloying were established, depending on their location in the periodic table. Dependences of the properties of model electrode materials on the statistical weight of atomic stable configurations, as well as the dependence of the erosion of the anode of transition metals on the number (*s+d*)-electrons and the interelectrode medium. The patterns of *d*-metals erosion under electrospark alloying and other types of high-energy impact to the surface have been found.

Conclusions. Based on the results of this research, it can be stated that in order to achieve higher coating properties and greater efficiency of electrospark alloying, it is necessary to give preference to anodic materials having the maximum statistical weight of atomic stable configurations. It can be said that the properties of the electrode materials relate to their erosion amount and the parameters of the efficiency for forming the doped layer dur-



ing electrospark alloying, which for specific conditions are determined by the method of selection of ratios and comparison with quantitative experimental data of previously established dependencies. A common approach to the formulation of criteria for imparting new properties to materials by high-energy impacting on them is possible. There is formulated a hypothesis for determining similar change dependences of the physical and operational properties of *d*-elements on their location in the periodic Table and the statistical weight of atomic stable configuration for various methods of local high-energy impact.

Keywords: electrospark alloying, electrodes, materials, erosion, properties

For citation: Verkhoturov A. D., Ivanov V. I., Dorokhov A. S., Konevtsov L. A., Velichko S. A. Effect of the Nature of Electrode Materials on Erosion and Properties of Doped Layers. The Criteria for Evaluating the Effectiveness of Electrospark Alloying. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):302–320. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.302-320>

Acknowledgements: The study was conducted with the financial support from the Ministry of Education of Russia (state assignment, direction: competency development, project No. 11.3416.2017/4.6) “Development of technologies and means of enhancing durability of parts, components, assemblies of machinery and equipment by creating nanostructured coatings by concentrated energy sources”.

Введение

К настоящему времени за более чем 70-летний период в России и за рубежом накоплен значительный опыт практического применения электроискровой обработки токопроводящих материалов и электроискрового метода нанесения покрытий – электроискрового легирования. Началом этого процесса послужила разработка в 1943 г. Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко нового способа обработки металлов, сплавов и других токопроводящих материалов, основанного на использовании электрической искры в качестве технологического инструмента и электрической эрозии металлов под воздействием электрических разрядов. В промышленном производстве большее распространение получила электроискровая обработка, особенно при изготовлении сложнопрофильных деталей [1]. В свою очередь, метод электроискрового легирования металлических поверхностей¹ открыл новые возможности для повышения надежности, долговечности и работоспособности ряда деталей машин, инструментов и оборудования.

Главное достоинство метода электроискрового легирования заключается в возможности нанесения на обрабатываемую поверхность изделия из любых токопроводящих материалов легированного слоя материала с целью обеспечения высокой твердости, жаростойкости, износостойкости и других полезных свойств исполнительных поверхностей деталей. При этом технологический процесс электроискрового легирования отличается простотой и низкой энергоемкостью.

Данный метод позволяет решать следующие основные задачи.

1. Совершенствовать физико-химические свойства исполнительных поверхностей деталей машин и инструментов из широко используемых конструкционных, инструментальных материалов на основе железа, титана, твердых сплавов и других токопроводящих материалов путем нанесения на поверхность тугоплавких материалов.

2. Расширять область применения тугоплавких металлов и соединений посредством создания на их основе износостойких, антикоррозионных и высокотемпературных покрытий.

¹ А. с. 89933 СССР / Лазаренко Б. Р. Способ нанесения металлических покрытий // Б. и. 1951, № 12.

3. Изменять в заданном направлении химический состав и физические свойства исполнительных поверхностей деталей (электросопротивление, работа выхода электронов, теплофизические свойства, предотвращение схватывания).

4. Использовать электроискровое легирование для текущего ремонта как в стационарных, так и в полевых условиях (например, на речных и морских судах) за счет малой энергоемкости и мобильности установок.

Обзор литературы

На базе российских и зарубежных предприятий создан ряд подобных установок с различными параметрами. В силу неадекватности процесса электроискрового легирования, а также многообразия внешних факторов воздействия и природы материала электродов, выбор оптимальных режимов обработки сопряжен со значительными трудностями. В связи с этим нами предложен новый подход к оценке процесса формирования легированного слоя и его свойств, учитывающий ряд параметров и критериев [2].

Классические методы определения эрозии (Б. Н. Золотых с сотрудниками, К. К. Намитоков² и др.) применялись к эрозии электродов при искровой обработке материалов преимущественно в жидкой среде. В данной работе обобщены и дополнены результаты исследований А. Д. Верхотурова, В. И. Иванова и др., начатых в ЦНИЛЭлектромех и продолженных в ИПФ АН МССР, ИМ ХНЦ ДВО РАН, ГОСНИТИ, МГУ им. Н. П. Огарёва. Данные исследования посвящены эрозии в зависимости от физико-химических свойств электродов различных материалов в различных средах, на разных режимах и установках электроискрового легирования [3–4]. Элементы исследований этой проблемы присутствуют также в зарубежных работах, по-

священных, в частности, принципам и применению электроискрового легирования [5], получению электроискровых эпитаксиальных покрытий [6], а также использованию при электроискровом легировании графитовых электродных материалов [7].

Целью работы является исследование зависимости эрозии материалов электродов от физико-химических свойств анодных материалов при электроискровом легировании на различных установках, режимах обработки, в различных межэлектродных средах, а также выявление зависимостей, которые можно использовать в качестве основы для определения критериев эффективности данного метода [8]. Эта работа развивает направление исследований, результаты которых касаются эрозии анода из чистых металлов при единичных импульсах и при многоимпульсной обработке [9].

Материалы и методы

В качестве материала подложки использовалась сталь 45, имеющая широкое применение в машиностроении. В качестве анодных материалов для формирования легированного слоя использовались тугоплавкие *d*-металлы IV–VI групп: *Ti, V, Cr, Zr, Nb, Vо, Hf, Ta, W*; а также *d*-металлы: *Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pd, Ag, Cd, Re, Os, Ir, Pt, Au* и *p*-металлы: *Al, Bi, Sb, Sn, Pb*. При электроискровом легировании одноименными материалами в качестве катода использовались, соответственно, материалы из ряда выбранных анодных. Для определения влияния физико-химических свойств электродных материалов на эрозию данных материалов и оценку критериев формообразования и эффективности применения электроискрового легирования использовался методологический подход (рис. 1).

Для электроискрового легирования применялись следующие установки: ЭФИ-10М, ЭФИ-46А, ЭФИ-25М,

² Намитоков К. К. Электроэрозионные явления. М.: Энергия, 1978. 456 с.



Р и с. 1. Методологическая схема установления возможности формулировки критериев, определяющих эффективность электроискрового легирования и свойства легированного слоя в зависимости от природы материала

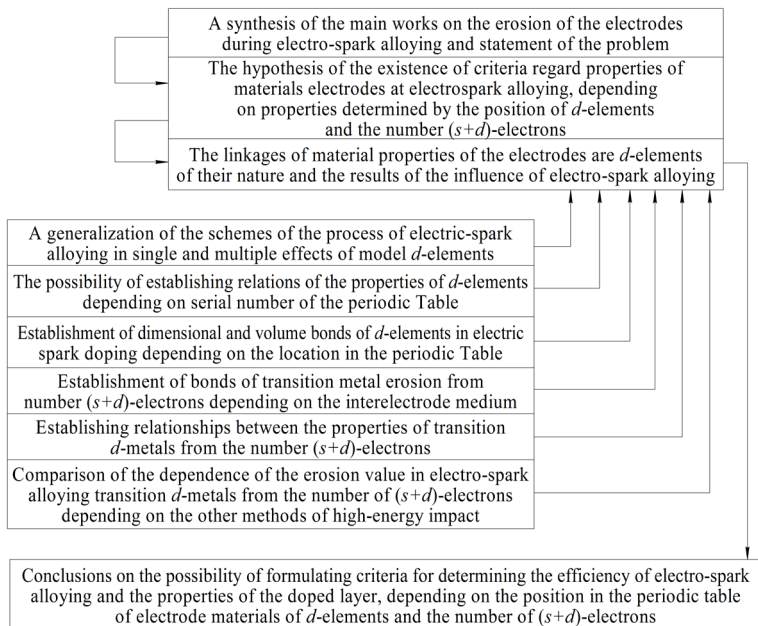


Fig. 1. Methodological framework for determining the feasibility of formulating criteria, determining the efficiency of electro-spark alloying and the properties of the doped layer, depending on the nature of the material

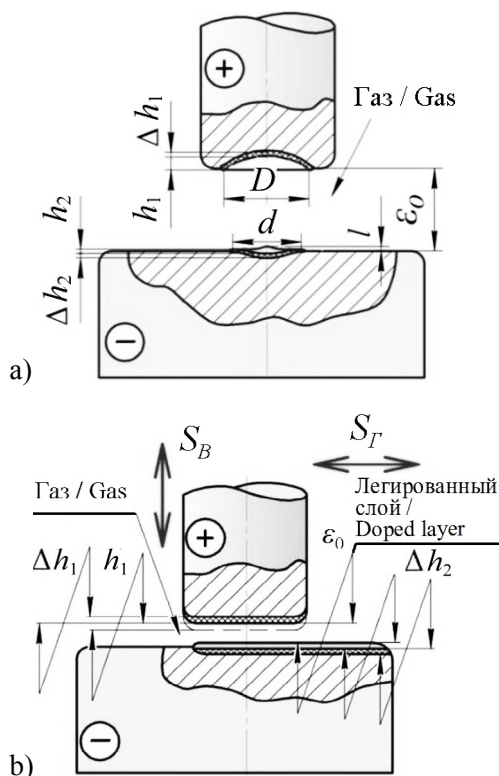
ЭФИ-66, Электром-10, ЭЛФА-541, Элитрон-22, ИМЭИ-01-2А; Корона-1101; микроскопы МИИ-4, МИМ-10, БИОЛАМ-М, ЭМА-100, Axiosplan-2; профилограф П-201 «Калибр»; микротвердомеры PMT-3М, DUN-W201 Shimadzu; для исследования эрозии – «Atovic absorption spectrophotometer, Varian AA-4» и методика, предложенная А. В. Верхотуровым, В. И. Ивановым и Л. А. Коневцовым [10]; для лазерной обработки – генератор ГОС-30М (импульс излучения 1 мс, $F = 250$ мм, плотность мощности $6 \cdot 10^7$ Вт/см²) и установка СЛС-10-1 (плотность мощности $1,3 \cdot 10^6$ Вт/см², длительность импульса 1,5 мс, $F = 37$ мм). Электроннолучевую обработку осуществляли в ИЭС им. Е. О. Патона на установке с ускоряющим напряжением 50, 65, 72 кВ; длительностью импульса 40, 200 мкс; частотой следования 300, 280 Гц; силой тока 1,0, 5,25, 5,0 мА; скоростью перемещения 1,25, 11,4 мм/с; временем обработки 9 мин; разрядным рабочем камере $2,6 \cdot 10^{-3}$ Па.

Результаты исследования

Обобщение схем процесса электроискрового легирования при единичном и многократном воздействии модельными анодными материалами

Проведенные исследования и обобщения положений основных работ по эрозии материалов в результате действия одно- и многократных электрических импульсов привели к созданию следующей схемы процесса электроискрового легирования (рис. 2), показывающей образование лунок на аноде и катоде. В общем случае на катоде возникает лунка с различной степенью заполненности материалом катода или представляющая зону взаимной кристаллизации материала анода и катода. При воздействии искрового разряда в газовой среде наблюдаются различия в формировании лунок в связи с более интенсивным переносом эродированного материала на противоположный электрод, особенно на катод. На като-

де возникает лунка с различной степенью заполненности образовавшимся материалом в результате взаимодействия перенесенных материалов анода, катода и межэлектродной среды. Анализ показал, что размеры лунок при воздействии искрового разряда в газовой среде меньше, чем при обработке в жидкой диэлектрической среде.



Р и с. 2. Общая схема процесса электроискрового легирования:
а) единичный разряд; б) многократное воздействие искровых разрядов

Fig. 2. General scheme of the electro-spark alloying process:
a) single discharge; b) repeated exposure to spark discharges

Примечание: ε_0 – межэлектродный промежуток; d, h, D – геометрические параметры эрозии анода и катода (1 и 2 соответственно); s – движение подачи (s_b – вертикальное; s_r – горизонтальное) / Note: ε_0 – interelectrode gap; d, h, D – geometric parameters of erosion anode and cathode (1 and 2 respectively); s – flow movement (s_b – vertical; s_r – horizontal).



При одиночном разряде можно отметить образование легированного слоя на катоде толщиной Δh_2 и на аноде толщиной Δh_1 , а также слой измененной поверхностной структуры, прилегающий к Δh_1 , Δh_2 электродов (рис. 2, а).

Размер лунок уменьшается (D , h) с повышением степени ковалентности межатомной связи обрабатываемого материала; наименьший объем наблюдается у наиболее тугоплавких металлов. На аноде область эрозии отдельным каналом искры значительно больше, чем на катоде. Это согласуется с данными исследований электроэрозии электродов в жидкости Б. Н. Золотых с сотрудниками, М. К. Мицкевича; Н. Б. Савицкого и Б. И. Ставицкого, исследовавших формы и размеры эрозионных лунок, образованных на различных материалах искровыми разрядами; Л. С. Палатника и А. А. Левченко, изучавших характер электрической эрозии на монокристаллах, а также работой И. А. Грикита и В. П. Геращенко, связанной с исследованиями электрической эрозии переходных металлов в спектральных источниках света. Перенос эродированного материала на противоположный электрод и образование «вторичной структуры» затрудняет измерение геометрических параметров лунок.

На аноде давление спадает значительно медленнее, чем на катоде. В связи с этим на первый план выступает плавление материала, а эффект «откола» играет второстепенную роль. Лунки на аноде четко очерчены зоной оплавления; вокруг них нет выплеснутого расплавленного металла. Профиль лунки на аноде представляет собой либо гладкую поверхность, либо поверхность с конусообразными возвышениями, выступающими над металлом, не тронутым разрядом. Эти конусообразные выступы в лунках представляют собой сконденсировавшийся металл электродов.

Для всех исследованных анодных d -металлов (Ag , Al , Bi , Cd , Cr , Cu , Fe , Mg , Zn , Mo , W , Pb , Sb , Sn) при различных режимах электроискрового легирования на катоде наблюдаются резко очерченные лунки, образовавшиеся в результате механического разрушения поверхности. Профиль катодной лунки состоит из обрывистых террасообразных спусков вследствие «откола» частиц металла по плоскостям слоистости. Катодная лунка не имеет следов явного оплавления, но, как правило, ее края окаймлены венчиком оплавленного металла. Подтверждается различный характер формирования лунок на аноде и катоде при действии единичных искровых разрядов на воздухе. Это связано с резким падением давления на катоде вследствие расширения, а затем охлаждения и частичной конденсации паров. Характер деформации на поверхности катода соответствует деформации, возникающей под действием резко спадающего давления во время импульса. На аноде, как отмечено выше, давление спадает медленнее, чем на катоде, в связи с чем преобладает плавление материала, а эффект «откола» играет второстепенную роль. На аноде имеются также следы пластической деформации, оплавленной и примыкающей к ней зоны. Другими словами, причиной различных явлений на аноде и катоде является выделение на порядок большей энергии искрового разряда на аноде, чем на катоде, что приводит к образованию лунки больших размеров и к снижению влияния термомеханических факторов. При воздействии на тугоплавкие d -металлы одноименных материалов (анод-катод) единичными разрядами различных энергий закономерности изменения параметров лунок аналогичны и с увеличением энергии импульсов проявляются более четко.

Сравнение полученных характеристик, особенно объема лунок, с тепло-

физическими константами материала электродов, а также проверка их соответствия критериям эрозионной стойкости не выявили удовлетворительной корреляции, поскольку, очевидно, между ними нет однозначной зависимости. Это объясняется изменениями в процессе даже одного электроискрового разряда условиями прохождения тока между анодом и катодом, обусловленными как природой материалов электродов и межэлектродного промежутка, так и режимами, длительностью, многофакторностью разряда, которые в итоге приводят к неаддитивности процесса электроискрового легирования. Тем не менее совокупность влияния условий и систематически доминирующих и постоянно действующих факторов при искровом разряде остается предпосылкой количественной оценки параметров эрозии и формирования легированного слоя, а также основанием формулировки критериев эффективности процесса электроискрового легирования.

Зависимости некоторых свойств тугоплавких d-металлов от их расположения в IV–VI периодах таблицы Менделеева

Учитывая данные параметры оценки взаимодействия элементов, выбранных в качестве электродных материалов при электроискровом легировании, в работах А. Д. Верхотурова³ [11], а также А. Мэттьюсом и А. Лейландом [12] было предложено считать модуль упругости E_y важнейшей характеристикой эксплуатационных свойств тугоплавких вольфрамсодержащих сверхтвердых сплавов. Вследствие этого представляет интерес использование критерия А. Д. Верхотурова «В» (термостойкости):

$$B = H_\mu \cdot T_{\text{пл}} / E_y, \quad (1)$$

Можно заметить закономерность изменения значений H_μ , $T_{\text{пл}}$, E_y от воз-

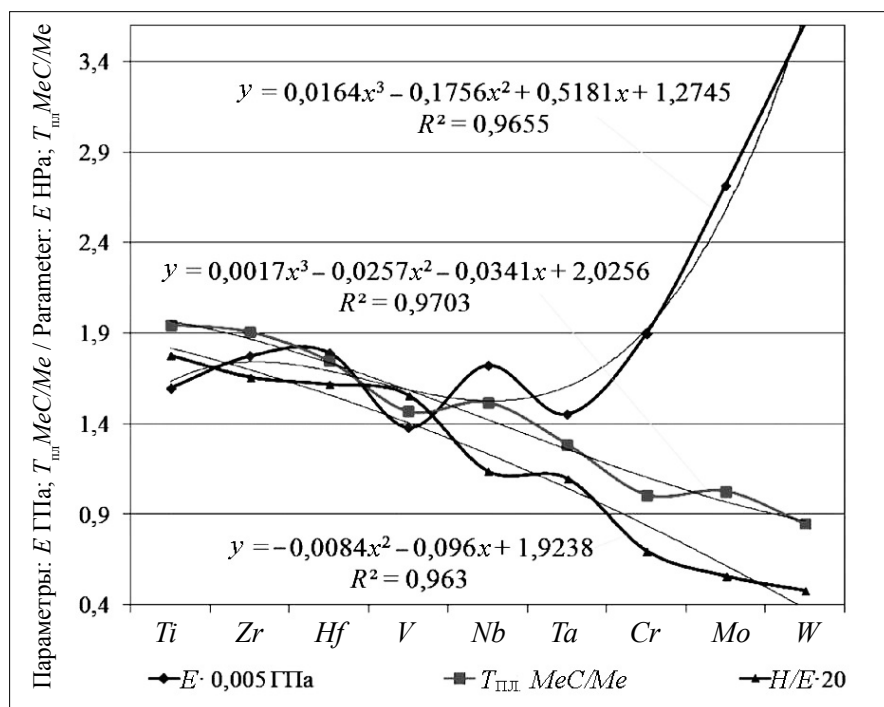
растания периода и номера элемента на примере выбранных модельных тугоплавких металлов IV–VI групп (рис. 3), т. е. от природы материала.

Наблюдается изменение свойств тугоплавких электродных материалов IV–VI групп, которые можно описать приведенными полиномиальными уравнениями (рис. 3) с достоверностью аппроксимации, близкой к единице: $R^2 \geq 0,96$. Другими словами, показано существование связи свойств d-металлов в зависимости от их порядкового номера в таблице Менделеева. Отметим также возрастание модуля упругости E_y в 2,3 раза в зависимости от порядкового номера d-элемента и периода в таблице Менделеева: от $n = 22$ (Ti) до $n = 74$ (W); снижение значения отношения микротвердости к модулю упругости H_μ / E_y в 3,7 раза, а также отношения $(T_{\text{пл}}^{\text{MeC}}) / (T_{\text{пл}}^{\text{Me}})$ температуры плавления карбида металла к температуре плавления металла в 2,3 раза.

Таким образом, показаны закономерности изменения связи свойств материалов (микротвердость, температура плавления, модуль упругости) тугоплавких d-металлов в зависимости от их порядкового номера в таблице Менделеева. Можно утверждать наличие связи свойств материалов электродов с количественными параметрами их эрозии и параметрами критериев эффективности формирования легированного слоя при электроискровом легировании, которые для определенных условий устанавливаются путем подбора соотношений и сравнения с полученными количественными экспериментальными показателями этих свойств.

Установление размерных и объемных связей d-элементов при электроискровом легировании в зависимости от их расположения в таблице Менделеева

³ Электроискровое легирование металлических поверхностей / Г. В. Самсонов [и др.]. Киев : Наукова думка, 1976. 220 с.



Р и с. 3. Изменение некоторых свойств (E_γ , $T_{пл}$, H_μ/E_γ) тугоплавких d -металлов IV–VI групп в зависимости от их расположения в IV–VI периодах

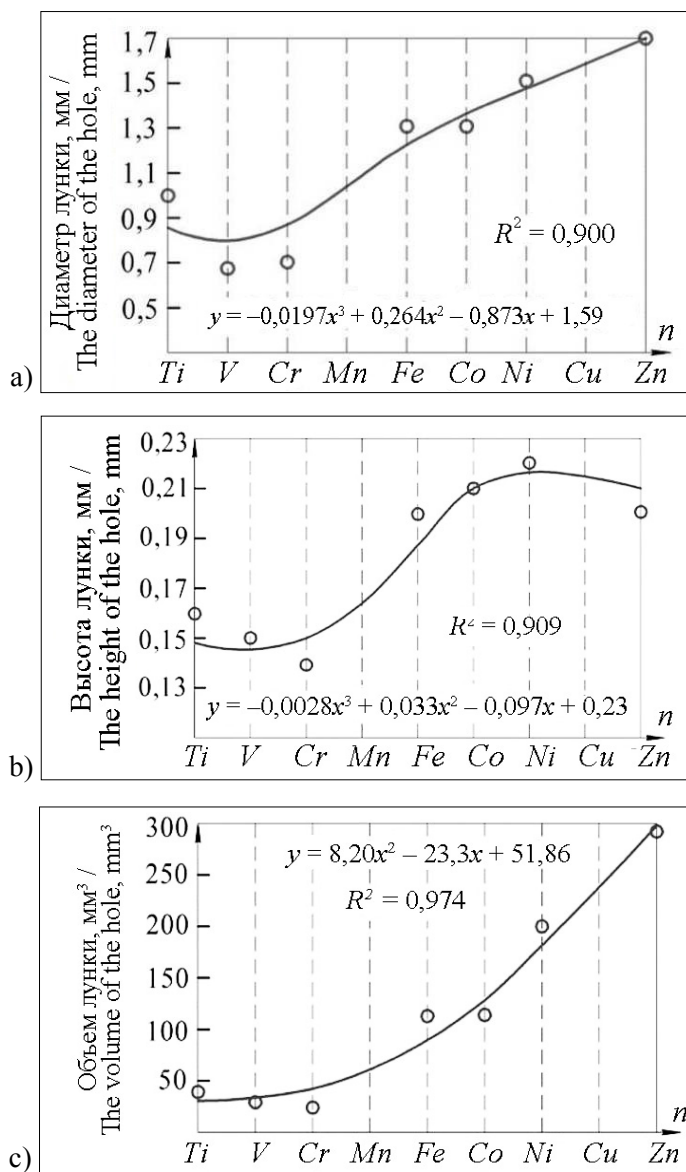
F i g. 3. Change some properties of the (E_γ , $T_{пл}$, H_μ/E_γ) refractory d -metals of IV–VI groups, depending on their location in the IV–VI periods

Выявлены соотношения изменения диаметра, высоты и объема кратеров металлов при электроискровом воздействии модельными материалами (d -элементами) с порядковым номером (природы материала). Так, для IV периода для d -элементов ($Ti \rightarrow Zn$) наблюдается зависимость изменения трех параметров лунок (диаметра, высоты, объема): при единичном разряде и режимах электроискрового легирования $I_{кз} = 100$ А; $V = 46$ В; $C = 1\ 100$ мкФ. Данные изменения можно описать приведенными полиномиальными уравнениями (рис. 4) с достоверностью аппроксимации $R^2 \geq 0,9$.

При этом для тугоплавких элементов IV–VI групп данные параметры уменьшаются (рис. 4–5) для IV–VI периодов, а для d -элементов VIII группы, наоборот, увеличиваются (рис. 4, а–с).

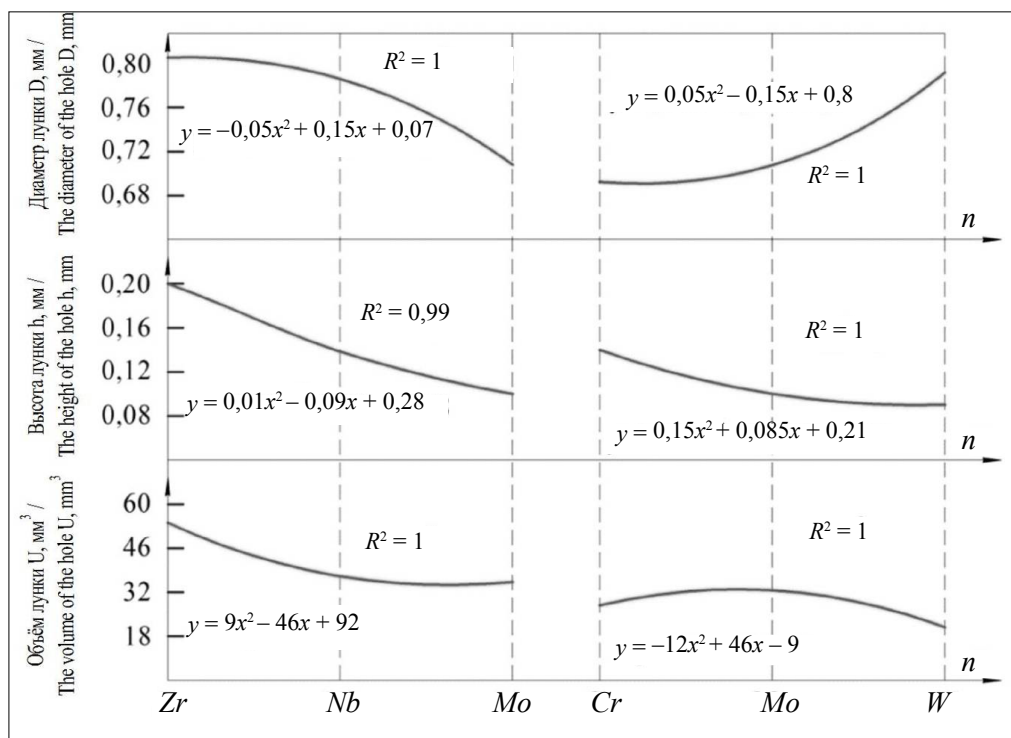
Параметр «высота лунки» d -элементов к концу IV-го периода (рис. 4, б) стабилизируется и несколько уменьшается. Таким образом, очевидно существование зависимости при электроискровом легировании свойств материала электродов d -элементов от их положения в таблице Менделеева.

Зависимость уменьшения диаметра, высоты и объема лунок при единичном электроискровом легировании наблюдается также для всех тугоплавких d -элементов IV–VI групп (рис. 5). Однако с возрастанием периода d -элементов для одной и той же группы данная зависимость исчезает. Например, для VI группы (рис. 5) с возрастанием порядкового номера n наблюдается увеличение диаметра лунки, уменьшение ее высоты и экстремум по объему (V_{max}) для молибдена.



Р и с. 4. Изменение размерных (а-б) и объемных (с) параметров лунки на поверхности катода при единичных разрядах одноименных электродных *d*-материалов (элементов IV группы) в зависимости от порядкового номера в периоде

F i g. 4. Change of dimensional (a-b) and volume (c) parameters of the hole on the cathode surface at single discharges of electrode *d*-materials of the same name (elements of group IV) depending on the sequence number in the period



Р и с. 5. Изменение размерных и объемных параметров лунки на поверхности катода при единичных разрядах одноименных электродных d -материалов (элементов V периода IV–VI групп: $Zr \rightarrow Mo$ и VI группы IV–VI периодов: $Cr \rightarrow W$) в зависимости от порядкового номера в таблице Менделеева

Fig. 5. Change of dimension and volume parameters of the hole on the cathode surface at single discharges of electrode d -materials of the same name (elements V of period IV–VI of groups: $Zr \rightarrow Mo$ and VI of group IV–VI of periods: $Cr \rightarrow W$) depending on the sequence number in the periodic Table

Для всех режимов обработки и межэлектродных сред (воздух, аргон, азот, вода, керосин) лунки имеют вид правильных окружностей с плоским дном и гладкой вогнутой поверхностью профиля. Лунки, полученные на воздухе, отличаются большей площадью, более плоским дном, наличием широкого валика с неровными краями и меньшей, чем при обработке в жидкости, глубиной.

Таким образом, учитывая установленные связи размерных и объемных свойств электродных материалов, сделаем вывод о возможности формулировки критериев оценки и коли-

чественной связи между экспериментально установленными параметрами эрозии при электроискровом легировании электродными d -материалами (d -элементами IV–VI групп) в зависимости как от режимов и условий обработки, так и от их порядкового номера и расположения в периодах и группах таблицы Менделеева.

Зависимости свойств модельных электродных материалов от статистического веса атомных стабильных конфигураций (СВАСК)

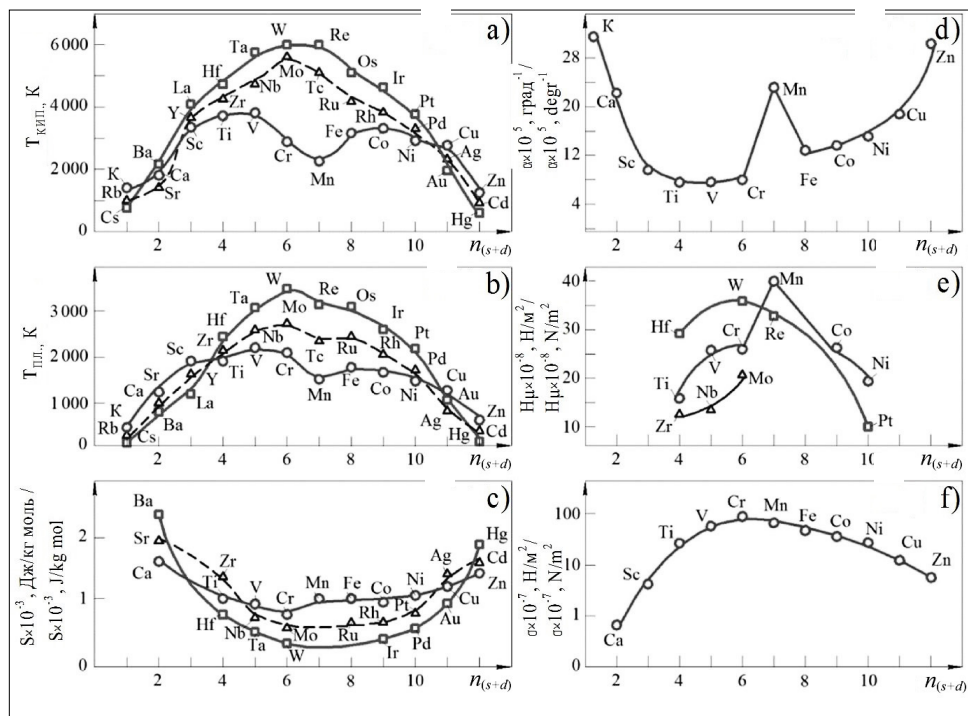
Ход расчетных кривых стабильности s - и d -состояний для атомов d -элементов⁴ четко указывает на рост ста-

⁴ Там же.

бильности электронных конфигураций от d^1 к d^5 до максимально возможной степени. Аналогично во втором полупериоде стабильность конфигураций повышается в направлении $d^5 \rightarrow d^{10}$. Максимальная стабильность полужаполненных d^5 и полностью заполненных d^{10} конфигураций объясняется обменной стабилизацией системы электронов. Как показали результаты расчета СВАСК (рис. 6), она влияет на многие физико-химические свойства тех элементов, в спектре которых преобладают указанные стабильные конфигурации.

Видно повышение атомной стабильности от электронных конфигураций d^1 к конфигурациям d^5 и далее

в ряду $d^6 \rightarrow d^{10}$, где наиболее стабильными являются d^5 . При этом, как видно на рис. 6, необходимы дальнейшие исследования по уточнению связи свойств (термического расширения α , твердости H_μ) в ряду d -элементов IV периода марганца (Mn), проявляющего аномалию некоторых свойств (α , H_μ), анализ которой составляет важную область использования конфигурационной модели. В работе Г. В. Самсонова и соавт.⁵ показано, что критерий заполняемости d -уровня у переходных металлов качественно отражает увеличение атомной стабильности электронных конфигураций в направлении $d^1 \rightarrow d^5$ и $d^6 \rightarrow d^{10}$. В данном исследовании также предложен получивший распространение кри-



Р и с. 6. Зависимость температуры кипения (а), температуры плавления (б), коэффициента сжимаемости (с), коэффициента термического расширения (д), твердости (е), предела прочности (ф) переходных металлов от числа валентных электронов ($s+d$)

Fig. 6. Dependence of boiling point (a), melting point (b), compressibility factor (c), coefficient of thermal expansion (d), hardness (e), tensile strength (f) of transition metals on the number of valence electrons ($s+d$)

⁵ Там же.



терий оценки относительной стабильности d^n -конфигураций в сравнении со стабильностью конфигураций d^0 , d^5 , d^{10} . Указанные закономерности (рис. 6) можно объяснить с позиций конфигурационной модели вещества, в которой предложен критерий заполнения электронной подболочки изолированного атома d -, s -, и p -элементов. Данный критерий во многих случаях позволяет не только объяснить, но и предсказать свойства d -металлов, а также сплавов на их основе. Согласно конфигурационной модели вещества, свойства материалов определяются СВАСК. В предельных случаях $n_d = 0, 5, 10$, когда наиболее существенны эффекты стабильности, значения СВАСК дают правильную количественную оценку этого параметра.

Таким образом, можно полагать, что одним из важнейших критериев оценки эрозии и формообразования функционального легированного слоя при электроискровом легировании является критерий, учитывающий эффекты стабильности материала полученного функционального покрытия, предполагаемые значения СВАСК. Например, при выборе электродного материала для электроискрового ле-

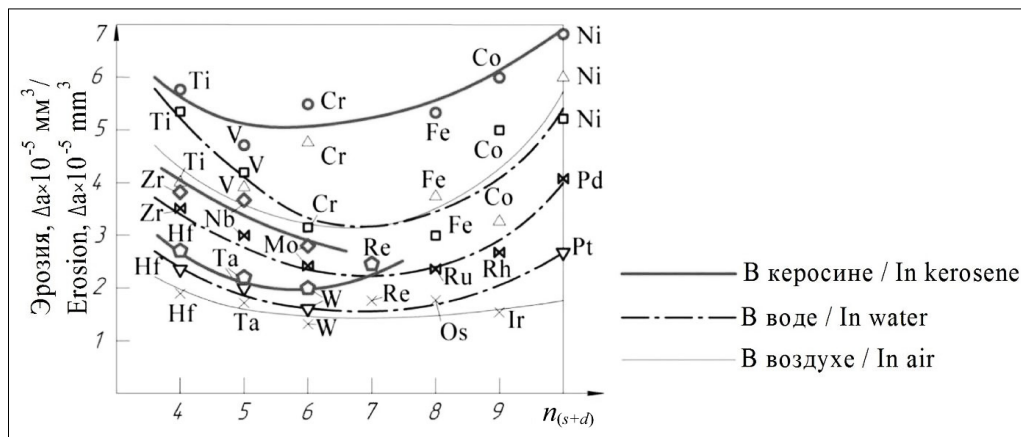
гирования с целью достижения легированного слоя высоких значений твердости и износостойкости, следует отдавать предпочтение тугоплавким анодным материалам (и их соединениям), содержащим максимальное количество устойчивых конфигураций типа sp^3 , s^2p^6 , d^5 [13–14].

Зависимость эрозии анода из переходных металлов от числа $(s+d)$ -электронов и межэлектродной среды

Следы воздействия разрядов, полученных в воздухе, характеризуются несколько большим, чем в жидкости, диаметром лунок. Объем лунок как на аноде, так и на катоде при электроискровом легировании в воздухе, как правило, меньше, чем при обработке в жидкости (рис. 7).

В свою очередь, в случае использования керосина размеры лунок больше, чем при использовании воды. Диаметр, глубина и объем лунок для одинаковых сред уменьшаются в ряду металлов при переходе от Ti к Cr , от Zr к Mo , от Hf к W , а затем увеличиваются соответственно от Cr к Ni , от Mo к Pd , от W к Pt , закономерно уменьшаясь по группам металлов сверху вниз.

Исследования показали, что объем лунок (их эрозия) соответствует степе-



Р и с. 7. Зависимость эрозии переходных металлов от числа $(s+d)$ -электронов (катод – Cu)

F i g. 7. The dependence of the erosion of the transition metals of the number of $(s+d)$ -electrons (cathode – Cu)

ни локализации, выражаемой СВАСК металла, ее стабильными d^5 -конфигурациями. С увеличением степени локализации при переходе от металлов IV группы к металлам V и VI групп объем лунок (эрозия) уменьшается, а с увеличением степени локализации для металлов VIII группы – увеличивается. К аналогичным выводам пришли А. Мэттьюс и А. Лейланд [12], изучая эрозию металлов в спектральных источниках света.

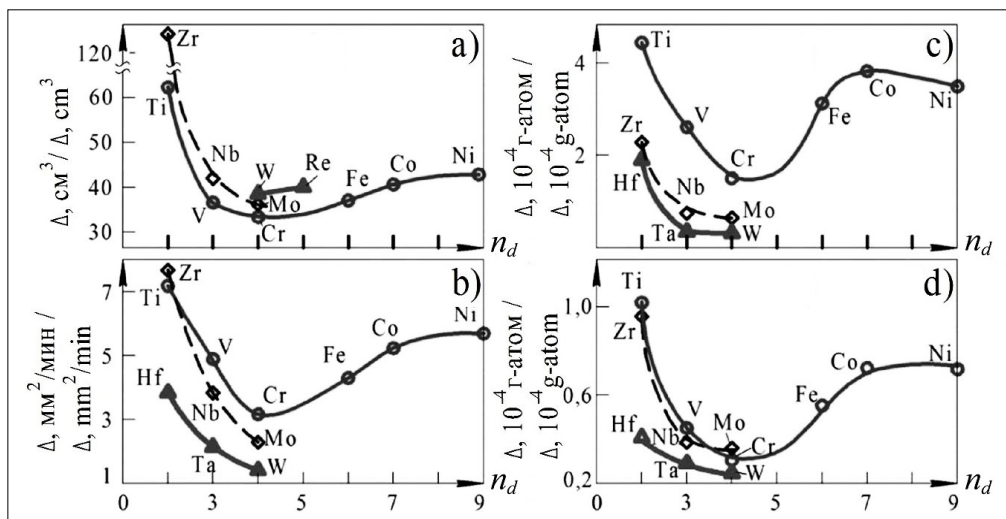
Таким образом, при определении параметров эрозии катода и критериев формообразования легированного слоя, с целью достижения более высоких свойств покрытия и большей эффективности электроискрового легирования, при выборе необходимо отдавать предпочтение анодным материалам, содержащим максимальные величины СВАСК устойчивых конфигураций. Кроме того, необходимо учитывать не только свойства электродных материалов, режимы обработки, но и материал межэлектродной среды,

оказывающий значительное влияние на эффективность электроискрового легирования.

Закономерности эрозии d-металлов при электроискровом легировании и других видах высокоэнергетического воздействия на поверхность

Были получены данные по эрозионной устойчивости d -элементов при воздействии на них различными высокоэнергетическими процессами (рис. 8): электромеханической обработкой, электроискровой, электронно-лучевой, лазерной.

Каждый из них показывает свою специфику механизмов эрозии, но они имеют общую корреляцию зависимостей, свидетельствующую о влиянии прочности межатомной связи на устойчивость элементов для каждого вида воздействия. Эрозия тугоплавких d -металлов IV–VI групп для всех видов высокоэнергетического воздействия уменьшается с повышением СВАСК металлов IV–VI периодов. Для IV периода эрозия возрастает с повышением



Р и с. 8. Зависимость эрозии переходных d -металлов от числа валентных ($s+d$)-электронов (природы материала) и вида высокоэнергетического воздействия: а) электромеханического; б) электроискрового; с) электронно-лучевого; д) лазерного

F i g. 8. Dependences of erosion of transition d -metals on the number of valence ($s+d$)-electrons (the nature of the material) and the type of high-energy action: а) electromechanical; б) electro-spark; с) electron beam; д) laser



от устойчивой конфигурации d^5 (Cr) к менее устойчивым конфигурациям d^6 – d^8 (Fe, Co, Ni соответственно), от которых при использовании, например, в качестве анодных материалов следует ожидать большего электромассопереноса.

Таким образом, замеченные зависимости свойств d -элементов от порядка их расположения в таблице Менделеева и статистического веса атомных стабильных конфигураций свидетельствуют о возможности формулировки гипотезы, предполагающей определение зависимостей изменения физических и эксплуатационных свойств материалов от воздействия на них различными методами локального высокоэнергетического воздействия, в т. ч. при получении легированного слоя методом электроискрового легирования.

Также возможен общий подход к формулировке критериев достижения новых свойств материалов в результате высокоэнергетического воздействия. Например, определение критериев формирования легированного слоя в процессе электроискрового легирования электродными d -материалами (и их соединениями) от их природы и ранее установленных зависимостей может быть аналогичным определению критериев эффективности для электродугового, плазменного или других видов высокоэнергетического воздействия.

Обсуждение и заключения

1. Неаддитивность процесса электроискрового легирования обусловлена совокупным действием изменяющихся и систематически доминирующих условий, случайно и постоянно действующих факторов в процессе искрового разряда. Совокупность этих факторов является предпосылкой количественной оценки параметров эрозии и формирования легированного слоя, а также основанием формулировки критериев эффективности процесса электроискрового легирования.

2. Показаны закономерности связи свойств материалов (микротвердость,

температура плавления, модуль упругости) тугоплавких d -металлов и их соединений с порядковым номером в таблице Менделеева.

3. Одним из важнейших для оценки эрозии и формообразования легированного слоя при электроискровом легировании является критерий, учитывающий эффекты стабильности материала полученного функционального покрытия, предполагаемые значения СВАСК, в т. ч. при выборе электродного материала для электроискрового легирования с целью достижения высокой твердости, износо- и жаростойкости легированного слоя.

4. Для улучшения свойств покрытий и достижения большей эффективности электроискрового легирования необходимо отдавать предпочтение анодным материалам, имеющим максимальное значение СВАСК, и учитывать при этом как свойства электродных материалов и режимы обработки, так и состав межэлектродной среды.

5. Справедлив вывод о наличии связи свойств материалов электродов с величиной их эрозии и параметрами эффективности формирования легированного слоя при электроискровом легировании, которые для конкретных условий определяются методом подбора соотношений и сравнения с количественными экспериментальными данными ранее установленных зависимостей.

6. Возможен общий подход к формулировке критериев достижения новых свойств материалов в результате высокоэнергетического воздействия на них. Закономерности изменения свойств d -элементов от порядка их расположения в таблице Менделеева и СВАСК свидетельствуют о возможности формулировки гипотезы, предполагающей определение сходных зависимостей изменения их физических и эксплуатационных свойств для различных методов локального высокоэнергетического воздействия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Ставицкий Б. И.** Из истории электроискровой обработки материалов // Электронная обработка материалов. 2010. Т. 1, № 261. С. 97–109. URL: <https://www.twirpx.com/file/1544619>
2. **Верхотуров А. Д., Иванов В. И., Коневцов Л. А.** Критерии оценки эффективности процесса электроискрового легирования // Труды ГОСНИТИ. 2011. Т. 107, № 2. С. 131–137. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22563734>
3. Formation of thick layer electro-spark coatings for restoring worn-out parts of power hydraulic cylinders / S. A. Velichko [et al.] // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2017. Vol. 53, no. 2. P. 116–123. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375517020119>
4. Analysis of electric pulsed processes in electrospark treatment of metallic surfaces in a gas medium / V. I. Ivanov [et al.] // Welding International. 2017. Vol. 31, no. 4. P. 312–319. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1257244>
5. **Johnson R. N.** Electrospark deposition: principle and application // Society of Vacuum Coaters 45th Annual Technical Conference, Lake Buena Vista. 2002. P. 87–92. URL: https://www.researchgate.net/publication/236399429_Principles_and_applications_of_electro-spark_deposition
6. **Xie Y. J., Wang M. C.** Epitaxial MCrAlY coating on a Ni-base superalloy produced by electro-spark deposition // Surface and Coatings Technology. 2006. Vol. 201, no. 6. P. 3564–3570. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.08.107>
7. Electro-spark alloying using graphite electrode on titanium alloy surface for biomedical applications / T. Chang-bin [et al.] // Applied Surface Science. 2011. Vol. 257, no. 15. P. 6364–6371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.01.120>
8. **Бурмукулов Ф. Х., Леякин В. П., Пушкин И. А.** Электроискровая обработка металлов – универсальный способ восстановления изношенных деталей // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2001. № 4. С. 23–28. URL: http://foliant.ru/catalog/psulibr?BOOK_UP+00087B+0DF291+-1+-1
9. **Верхотуров А. Д., Иванов В. И., Коневцов Л. А.** О влиянии физико-химических свойств чистых металлов на их эрозию при электроискровом легировании // Труды ГОСНИТИ. 2016. Т. 125. С. 202–215. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27657652>
10. **Верхотуров А. Д., Иванов В. И., Коневцов Л. А.** Оценка эффективности формирования легированного слоя при ЭИЛ карбидами вольфрамосодержащих твердых тел // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т. 127. С. 190–203. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29326693>
11. **Верхотуров А. Д., Иванов В. И., Коневцов Л. А.** О влиянии физико-химических свойств тугоплавких соединений и твердых сплавов на их эрозию при электроискровом легировании // Электронная обработка материалов. 2017. Т. 53, № 6. С. 8–17. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1051286>
12. **Matthews A., Leyland A.** Developments in vapour deposited ceramic coatings for tribological applications // Key Engineering Materials. 2002. Vol. 206–213. P. 459–466. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.206-213.459>
13. The properties of nanocomposite coatings formed on a steel 20H surface by means of electro-spark processing using rod-shaped electrodes of steels 65 G and Sv 08. / F. Kh. Burumkulov [et al.] // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2009. Vol. 45, no. 6. P. 455–460. DOI: <https://doi.org/10.4028/10.3103/S1068375509060039>
14. Formation of the surface layer on a low-carbon steel in electrospark treatment / V. I. Ivanov [et al.] // Welding International. 2013. Vol. 27, no. 11. P. 903–906. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2013.796643>

Поступила 11.04.2018; принята к публикации 18.05.2018; опубликована онлайн 20.09.2018

Об авторах:

Верхотуров Анатолий Демьянович, главный научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем ДВО РАН (680000, Россия г. Хабаровск, ул. Дикопольцева, д. 56), доктор технических наук, умер в апреле 2017 г.



Иванов Валерий Игоревич, заведующий лабораторией «Электроискровые технологии», ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат технических наук, Researcher ID: H-4076-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4568-8553>, techninvest-vip@mail.ru

Дорохов Алексей Семенович, профессор РАН, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научно-организационной работе, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), доктор технических наук, Researcher ID: H-4089-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3058-5903>, vim@vim.ru

Коневцов Леонид Алексеевич, научный сотрудник, Институт материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН (680042, Россия г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, д. 153), кандидат технических наук, Researcher ID: H-4087-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7212-3953>, konevts@narod.ru

Величко Сергей Анатольевич, профессор кафедры технического сервиса машин, Институт механики и энергетики, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68/1), доктор технических наук, доцент, Researcher ID: G-9021-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6254-5733>, velichko2005@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. Д. Верхотуров – разработка концепции и плана статьи, экспериментальные исследования и анализ результатов; В. И. Иванов – экспериментальные исследования и анализ результатов, написание статьи; А. С. Дорохов – методическое руководство; Л. А. Коневцов – экспериментальные исследования и анализ результатов, написание статьи; С. А. Величко – экспериментальные исследования и анализ результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Stavitskiy B. I. From the history of electrospark processing of materials. *Electronnaya obrabotka materialov* = Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2010; 1(261):97–109. Available at: <https://www.twirpx.com/file/1544619/> (In Russ.)
2. Verkhoturov A. D., Ivanov V. I., Konevtsov L. A. Evaluation criteria of efficiency of process of electric-spark alloying. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2011; 107(2):131–137. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22563734> (In Russ.)
3. Velichko S. A., Senin P. V., Ivanov V. I., Martynov A. V., Chumakov P. V. Formation of thick layer electro-spark coatings for restoring worn-out parts of power hydraulic cylinders. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2017; 53(2):116–123. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375517020119>
4. Ivanov V. I., Solovev S. A., Velichko S. A., Ignatkov D. A. Analysis of electric pulsed processes in electrospark treatment of metallic surfaces in a gas medium. *Welding International*. 2017; 31(4):312–319. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1257244>
5. Johnson R. N. Electrospark deposition: Principle and application. Society of Vacuum Coaters 45th Annual Technical Conference, Lake Buena Vista. 2002; 87–92. Available at: https://www.researchgate.net/publication/236399429_Principles_and_applications_of_electro-spark_deposition
6. Xie Y. J., Wang M. C. Epitaxial MCrAlY coating on a Ni-base superalloy produced by electrospark deposition. *Surface and Coatings Technology*. 2006; 201(6):3564–3570. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.08.107>
7. Chang-bin T., Dao-xin L., Zhan W., Yang G. Electro-spark alloying using graphite electrode on titanium alloy surface for biomedical applications. *Applied Surface Science*. 2011; 257(15):6364–6371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.01.120>
8. Burumkulov F. Kh., Lyalyakin V. P., Pushkin I. A. Electric-Spark treatment of metals – universal method of restoring worn parts. *Mechanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva* = Mechanization Physics and mathematics

and Electrification of Agriculture. 2001; 4:23–28. Available at: http://foliant.ru/catalog/psulibr?BOOK_UP+00087B+0DF291+-1+-1 (In Russ.)

9. Verkhoturov A. D., Ivanov V. I., Konevtsov L. A. On the influence of physico-chemical properties of pure metals on soil erosion in electrospark alloying. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2016; 125:202–215. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27657652> (In Russ.)

10. Verkhoturov A. D., Ivanov V. I., Konevtsov L. A. Estimation of the efficiency of formation of the doped layer electro-spark alloying carbides containing tungsten solids. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2017; 127:190–203. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29326693> (In Russ.)

11. Verkhoturov A. D., Ivanov V. I., Konevtsov L. A. On the influence of physico-chemical properties of refractory compounds and hard alloys on their erosion in electrospark alloying. *Electronnaya obrabotka materialov* = Electronic Material Processing. 2017; 53(6):8–17. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1051286> (In Russ.)

12. Matthews A., Leyland A. Developments in vapour deposited ceramic coatings for tribological applications. *Key Engineering Materials*. 2002; 206-213:459–466. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.206-213.459>

13. Burumkulov F. Kh., Senin P. V., Velichko S. A., Ivanov V. I., Ionov P. A., Okin M. A. The properties of nanocomposite coatings formed on a steel 20H surface by means of electrospark processing using rod-shaped electrodes of steels 65 G and Sv 08. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2009; 45(6):455–460. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375509060039>

14. Ivanov V. I., Burumkulov F. Kh., Verkhoturov A. D., Gordiyenko P. S., Panin Ye. S., Konevtsov L. A. Formation of the surface layer on a low-carbon steel in electrospark treatment. *Welding International*. 2013; 27(11):903–906. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2013.796643>

Received 11.04.2018, revised 18.05.2018, published online 20.09.2018

About authors:

Anatoliy D. Verkhoturov, Chief Researcher, Institute of Water and Environmental Problems of the Far East, Russian Academy of Sciences (56 Dikopoltseva St., Khabarovsk 680000, Russia), D.Sc. (Engineering), died in April 2017.

Valeriy I. Ivanov, Head, Laboratory of Electric Technology, Federal Research Center of Agricultural Engineering VIM (5 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: H-4076-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4568-8553>, tehnoinvest-vip@mail.ru

Aleksey S. Dorokhov, Professor, Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of RAS, Deputy Director, Federal Research Center of Agricultural Engineering VIM (5 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: H-4089-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3058-5903>, vim@vim.ru

Leonid A. Konevtsov, Researcher, Institute of Material Science, Khabarovsk Scientific Center of RAS (153 Tikhoookeanskaya St., Khabarovsk 680042, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: H-4087-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7212-3953>, konevts@narod.ru

Sergey A. Velichko, Professor, Chair of Technical Service of Machines, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: G-9021-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6254-5733>, Velichko2005@yandex.ru

Authors' contribution:

A. D. Verkhoturov – development of the concept and plan of the article, experimental research and analysis of the results; **V. I. Ivanov** – experimental research and analysis of the results, writing the article; **A. S. Dorokhov** – methodological guidance; **L. A. Konevtsov** – experimental research and analysis of the results, writing the article; **S. A. Velichko** – experimental research and analysis of the results.

All authors have read and approved the final version of the paper.



Исследование устойчивости положения равновесия системы динамики биоценоза в условиях межвидового взаимодействия

П. А. Шаманаев*, О. С. Язовцева

ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)

*korspa@yandex.ru

Введение. В статье рассмотрена задача об устойчивости по части переменных нулевого положения равновесия математической модели, описывающая динамику биоценоза в условиях межвидового взаимодействия типа «хищник-жертва», представляющую собой нелинейную систему обыкновенных дифференциальных уравнений с возмущениями в виде векторных полиномов. Исследуемая система рассмотрена при условии, что рождаемость биологических видов не превышает смертности.

Материалы и методы. Получены достаточные условия устойчивости и асимптотической устойчивости по части переменных нулевого положения равновесия системы. Доказательство основано на построении операторного уравнения в банаховом пространстве, связывающего решение исследуемой системы и ее линейного приближения. На основе принципа Шаудера о неподвижной точке доказано существование решения операторного уравнения. Для завершения доказательства показано, что между решениями исследуемой системы и ее линейного приближения существует локальная асимптотическая эквивалентность по Брауэру, причем разности между компонентами решений исследуемой системы и ее линейного приближения стремятся к нулю равномерно по начальным значениям.

Результаты исследования. В качестве примера рассмотрена модель типа «хищник-жертва» в случае, когда два вида питаются третьим. Приведены условия устойчивости и асимптотической устойчивости по части переменных тривиального положения равновесия системы динамики численности двух популяций «хищников» и одной популяции «жертв» при различных коэффициентах рождаемости биологических видов. Построены графики численности популяций при различных значениях разности между рождаемостью и смертностью соответствующих видов.

Обсуждение и заключения. В зависимости от разности между рождаемостью и смертностью биологических видов проведен анализ динамики численности двух популяций «хищников» и одной популяции «жертв» с течением времени.

Ключевые слова: модель «хищник-жертва», устойчивость по части переменных, нелинейные обыкновенные дифференциальные уравнения, локальная асимптотическая эквивалентность по Брауэру, принцип Шаудера о неподвижной точке

Для цитирования: Шаманаев П. А., Язовцева О. С. Исследование устойчивости положения равновесия системы динамики биоценоза в условиях межвидового взаимодействия // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 321–332. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.321-332>



Studying the Equilibrium State Stability of the Biocenosis Dynamics System under the Conditions of Interspecies Interaction

P. A. Shamanaev*, O. S. Yazovtseva

National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

*korspa@yandex.ru

Introduction. The article considers the problem of stability of the mathematical model of the trivial equilibrium. The model describes the biocenosis dynamics with the predator-prey type interspecific interaction, which is a nonlinear system of ordinary differential equations with perturbations in the form of vector polynoms. The examined system is considered provided that the birth rate of biological species does not exceed mortality rate.

Materials and Methods. The article states the sufficient conditions for asymptomatic stability. The proof is based on the construction of an operator equation in a Banach space, which connects the solution of the nonlinear system and its linear approximation. The existence of the operator equation solution is proved through using the Schauder fixed point principle. It is shown that there is Brauer local asymptotic equivalence between the solutions of the investigated system and its linear approximation and the differences between the components of the solutions of the nonlinear system and its linear approximation tends to zero evenly with respect to the initial values.

Results. As a case in point, the authors consider the model of the predator-prey type in the case when two species feed on the third one. The conditions for stability and asymptotic stability for a part of the variables of the trivial equilibrium of the abundance dynamics of two predator populations and one prey population under different fertility rates of biological species are given. The graphs of a number of populations with different values of the difference between the birth rate and the mortality rate of particular species are constructed.

Conclusions. Depending on the difference between fertility and mortality of biological species, the population dynamics of two populations of “predators” and one population of “preys” is analyzed over time.

Keywords: predator-prey model, stability in the respect to a part of variables, nonlinear ordinary differential equations, local asymptotic equivalence by Brauer, Schauder fixed point principle

For citation: Shamanaev P. A., Yazovtseva O. S. Studying the Equilibrium State Stability of the Biocenosis Dynamics System under the Conditions of Interspecies Interaction. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):321–332. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.321-332>

Введение

Математическое моделирование динамики численности популяций является одной из основных проблем математической экологии. Ввиду многофакторности биотических и абиотических воздействий на биоценоз разработка модели представляет собой нетривиальную задачу.

Важнейшей характеристикой математических моделей, описывающих динамику численности биологических популяций, является наличие устойчивого или неустойчивого положения равновесия.

Одна из широко известных биологических моделей – модель динамики биоценоза в условиях межвидового взаимодействия, известная как модель «хищник-жертва»¹:

¹ Bailey J. O. E., Ollis D. F. [Biochemical engineering fundamentals](#). – 2nd ed. New York : McGraw-Hill International Edition. 1986, 984 p.



$$\begin{cases} \frac{dv_i}{dt} = v_i \left(a_i - \sum_{j=1}^M a_{ij} w_j \right), i = \overline{1, N}, \\ \frac{dw_k}{dt} = w_k \left(-b_k + \sum_{j=1}^N b_{kj} v_j \right), k = \overline{1, M}, \end{cases} \quad (1)$$

где $v_i, i = \overline{1, N}$ – численность популяции i -ого вида жертв; $w_k(t), k = \overline{1, M}$ – численность популяции k -ого вида хищников; a_i и b_k – разность между рождаемостью и смертностью i -ого вида жертв и k -ого вида хищников соответственно в предположении, что он не испытывает влияния внешних факторов; a_{ij} – коэффициент, характеризующий уменьшение i -ого вида жертв за счет j -ого вида хищников, $a_{ij} > 0$; b_{kj} – коэффициент, характеризующий увеличение k -ого вида хищников за счет j -ого вида жертв, $b_{kj} > 0$.

Учитывая, что численность популяции является неотрицательной величиной, рассмотрим систему (1) при условии, что $v_i \geq 0, i = \overline{1, N}, w_k \geq 0, k = \overline{1, M}$.

Поскольку фазовые переменные данной системы отвечают численности различных видов популяций, вывод о динамике численности каждой из популяций можно сделать на основании исследования устойчивости положения равновесия системы по соответствующим переменным.

В статье рассматривается вопрос об устойчивости по части переменных нулевого положения равновесия системы (1) при условии, что рождаемость биологических видов не превышает

смертности. Это условие может быть записано в виде:

$$a_i \leq 0, i = \overline{1, N}; b_k \geq 0, k = \overline{1, M}.$$

Заметим, что в случае, когда $a_i = 0, i = \overline{1, N}$ или $b_k = 0, k = \overline{1, M}$, матрица линейного приближения системы (1) имеет нулевые собственные значения, что соответствует критическому случаю². В связи с этим вопрос об устойчивости нулевого положения равновесия по первому приближению остается открытым.

Для решения поставленной задачи применяется подход³⁻⁵ [1–2], основанный на установлении локальной асимптотической эквивалентности между решениями исследуемой системы и ее линейным приближением.

Обзор литературы

Основы математического подхода в экологии заложены в книге Т. Р. Мальтуса⁶. В этой работе впервые приведена постановка задачи о численности популяции в строгих математических формулировках, впоследствии получившая название модели Мальтуса; показано, что при отсутствии ограничивающих факторов численность может увеличиваться в геометрической прогрессии. Дальнейшее развитие математических моделей популяций было реализовано в работе П. Ф. Ферхюльста [3], где приведен анализ динамики численности популяции одного вида в условиях естественных ограничений – конкуренции за ресурсы. Исследование предложенных моделей было продолжено в трудах Р. Перла⁷ [4].

² Малкин И. Г. [Теория устойчивости движения](#). М. : Наука, 1966. 533 с.

³ Воскресенский Е. В. Методы сравнения в нелинейном анализе. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1990. 224 с.

⁴ Воскресенский Е. В. [Асимптотические методы: теория и приложения](#). Саранск : СВМО, 2000. 300 с.

⁵ Шаманаев П. А., Язовцева О. С. Применение локальной покомпонентной асимптотической эквивалентности к исследованию устойчивости по части переменных решений динамических систем // Аналитические и численные методы моделирования естественно-научных и социальных проблем : мат-лы XII Междунар. науч.-техн. конф. Пенза : Пензенский государственный университет, 2017.

⁶ Malthus T. R. [An essay of the principle of population](#). London : St. Paul's Church-Yard, 1798. 126 p.

⁷ Pearl R. The biology of population growth. New York, 1930. 260 p.

Позднее был осуществлен переход от рассмотрения моделей, описывающих один вид, к системам, моделирующим динамику популяций в условиях межвидового взаимодействия⁸⁻⁹ [5]. Подобные модели получили название «хищник-жертва». Основой для составления систем послужили кинетические уравнения Лотки, описывающие гипотетическую химическую реакцию. Вольтерра предложил модификацию модели, учитывающую периодические колебания численности популяций при их взаимодействии.

Основные положения современного этапа развития математических моделей динамики численности популяций содержатся в различных исследованиях¹⁰⁻¹³ [1; 6].

Вопросы устойчивости математических моделей, описывающих динамику биологических популяций в условиях межвидового взаимодействия, изложены в многочисленных работах¹⁴⁻¹⁵ [7–11].

В книге Ю. А. Пыха на основе прямого метода Ляпунова развита общая теория исследования устойчивости равновесных режимов для широкого класса экологических и генетических моделей¹⁶.

Работа Ю. М. Свирижева и Д. О. Логофета посвящена исследованию устойчивости обобщенных моделей типа «хищник-жертва»¹⁷.

Другими учеными проведен анализ положений равновесия модели Лотки-Вольтерра на примере динамики популяций рыб, получен критерий бифуркации Хопфа для данной модели [7].

К исследованию математической модели для трех видов индийскими и арабскими учеными применены теория устойчивости и теория бифуркаций. Получены условия, при которых система теряет устойчивость и в ней возникают колебания предельного цикла [8].

Исследователи З. Ма, С. Вонг и др. описывают математическую модель динамики биоценоза с функциональным откликом. В работе приведены результаты анализа поведения решений системы, показано влияние функционального отклика на динамику системы [9].

Итальянскими учеными проанализировано поведение решений модели Лотки-Вольтерра на длительном промежутке времени. Получены условия устойчивости для положений равновесия, имеющих биологический смысл [10].

В статье китайского исследователя рассмотрена модель «хищник-жертва» с функциональным откликом, для которой определены условия существования единственного положительного решения, исследованы его локальная и глобальная асимптотическая устойчивость [11].

В работах других авторов содержится обзор исследований в области

⁸ Lotka A. J. *Elements of physical biology*. Baltimore : Williams and Wilkins, 1925. 460 p.

⁹ Lotka A. J. *Elements of mathematical biology*. New York, 1956. 465 p.

¹⁰ Bailey J. O. E., Ollis D. F. *Biochemical engineering fundamentals*. – 2nd ed. New York : McGraw-Hill International Edition. 1986, 984 p.

¹¹ Базыкин А. Д. *Нелинейная динамика взаимодействующих популяций*. М.-Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2003. 368 с.

¹² Базыкин А. Д. *Математическая биофизика взаимодействующих популяций*. М., 1985. 181 с.

¹³ Ризниченко Г. Ю. *Математические модели в биофизике и экологии*. М. – Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2003. 184 с.

¹⁴ Пых Ю. А. *Равновесие и устойчивость в моделях популяционной динамики*. М. : Наука, 1983. 182 с.

¹⁵ Свирижев Ю. М., Логофет Д. О. *Устойчивость биологических сообществ*. М. : Наука, 1978. 352 с.

¹⁶ Пых Ю. А. *Равновесие и устойчивость в моделях популяционной динамики*. М. : Наука, 1983. 182 с.

¹⁷ Свирижев Ю. М., Логофет Д. О. *Устойчивость биологических сообществ*. М. : Наука, 1978. 352 с.



устойчивости по части переменных решений дифференциальных уравнений, приведены многочисленные приложения, в т. ч. из популяционной динамики^{18–19}.

П. Руш, П. Абете и М. Лалуа на основании прямого метода Ляпунова исследуют устойчивость по части переменных положений равновесия математической модели динамики биогенеза в условиях межвидового взаимодействия для трех видов, два из которых питаются третьим²⁰.

Другими учеными изложены задачи об устойчивости по части переменных крупномасштабных (сложных) систем дифференциальных уравнений и экологических систем Лотки-Вольтерры [12–13].

Материалы и методы

В работах авторов получены достаточные условия устойчивости по части переменных нулевого положения равновесия нелинейных систем обыкновенных дифференциальных уравнений с возмущениями в виде векторных полиномов на основе локальной покомпонентной асимптотической эквивалентности²¹ [2]. Система (1) относится к указанному классу систем и может быть представлена в виде:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + P(x), \quad (2)$$

где $x \in R^n$; $x = \text{colon}(v, w)$; $v = \text{colon}(v_1, \dots, v_N)$; $w = \text{colon}(w_1, \dots, w_M)$; A – диагональная $(n \times n)$ -матрица вида

$$A = \text{diag}(a_1, \dots, a_N, -b_1, \dots, -b_M),$$

$$P(x) = \text{colon}(P_1(x), \dots, P_n(x)),$$

$$P_i(x) = -\sum_{j=1}^M a_{ij} v_i w_j, \quad i = \overline{1, N},$$

$$P_{N+k}(x) = \sum_{j=1}^N b_{kj} w_k v_j, \quad k = \overline{1, M}.$$

Вместе с тем для систем вида (2) условия устойчивости нулевого положения равновесия могут быть ослаблены.

Сформулируем достаточные условия локальной асимптотической эквивалентности системы (2) и ее линейного приближения

$$\frac{dy}{dt} = Ay \quad (3)$$

и на основании этих условий исследуем вопрос об устойчивости по части переменных нулевого положения равновесия системы (2).

Теорема

Пусть выполняются условия

$$a_i < 0 \quad (i = \overline{1, N}), \quad b_k \geq 0 \quad (k = \overline{1, M}) \quad (4)$$

или

$$a_i = 0 \quad (i = \overline{1, N}), \quad b_k > 0 \quad (k = \overline{1, M}). \quad (5)$$

Тогда системы (2) и (3) являются локально асимптотически эквивалентными по Брауеру, а нулевое решение системы (2) обладает следующими свойствами:

1) в случае выполнения (4) асимптотически устойчиво по компонентам $v_i, i = \overline{1, N}$, асимптотически устойчиво

¹⁸ Воротников В. И., Румянцев В. В. Основы теории частичной устойчивости и управления: учеб. пособие. Нижний Тагил : НТИ УрФ, 2014. 304 с.

¹⁹ Воротников В. И., Румянцев В. В. Устойчивость и управление по части координат фазового вектора динамических систем: теория, методы и приложения. М. : Научный мир, 2001. 320 с.

²⁰ Руш П., Абете П., Лалуа М. Прямой метод Ляпунова в теории устойчивости. М. : Мир, 1980. 300 с.

²¹ Шаманаев П. А., Язовцева О. С. Применение локальной покомпонентной асимптотической эквивалентности к исследованию устойчивости по части переменных решений динамических систем // Аналитические и численные методы моделирования естественно-научных и социальных проблем : мат-лы XII Междунар. науч.-техн. конф. Пенза : Пензенский государственный университет, 2017.

по тем компонентам w_k , для которых $b_k > 0$; устойчиво по тем компонентам w_k , для которых $b_k = 0$, причем по этим компонентам w_k система имеет локальное асимптотическое равновесие, $k = \overline{1, M}$;

2) в случае выполнения (5) устойчиво по компонентам $v_i, i = \overline{1, N}$ и асимптотически устойчиво по компонентам $w_k, k = \overline{1, M}$, причем по компонентам v_i система имеет локальное асимптотическое равновесие.

Доказательство

Построим банахово пространство

$$\Omega = \{x : x \in C([T, +\infty), R^n),$$

$$|v_i(t)| \leq ce^{\beta_i t}, |w_k(t)| \leq ce^{\beta_{N+k} t},$$

$$t \geq 0, c \in R_+, i = \overline{1, N}, k = \overline{1, M}\}$$

с нормой

$$\|x\|_{\Omega} = \max_{\substack{i=\overline{1, N} \\ k=\overline{1, M}}} \sup \{|v_i(t)|ce^{-\beta_i t}, |w_k(t)|ce^{-\beta_{N+k} t}\},$$

где при справедливости условия (4) полагаем

$$\beta_i = a_i + \varepsilon, i = \overline{1, N};$$

$$\beta_{N+k} = \begin{cases} 0, b_k = 0 \\ -b_k, b_k > 0 \end{cases}, k = \overline{1, M};$$

а при справедливости условия (5) –

$$\beta_i = 0, i = \overline{1, N}; \beta_{N+k} = -b_k + \varepsilon, k = \overline{1, M}.$$

Здесь ε – достаточно малое положительное число, которое выбирается таким образом, что $a_i + \varepsilon < 0$ при условии (4) и $-b_{N+k} + \varepsilon < 0$ при условии (5).

В банаховом пространстве Ω рассмотрим операторное уравнение

$$x = Lx, \quad (6)$$

где $L = colon((Lx)_1, \dots, (Lx)_n)$, причем при выполнении условия (4) компоненты оператора L имеют вид:

$$(Lx)_i = e^{a_i t} y_i^{(0)} -$$

$$- \sum_{j=1}^M a_{ij} \int_0^t e^{a_i(t-s)} v_j(s) w_j(s) ds, i = \overline{1, N},$$

$$(Lx)_{N+k} = e^{-b_k t} y_{N+k}^{(0)} -$$

$$- \sum_{j=1}^N b_{kj} \int_t^{+\infty} e^{-b_k(t-s)} w_k(s) v_j(s) ds, k = \overline{1, M}.$$

а при выполнении условия (5) –

$$(Lx)_i = e^{a_i t} y_i^{(0)} +$$

$$+ \sum_{j=1}^M a_{ij} \int_t^{+\infty} e^{a_i(t-s)} v_j(s) w_j(s) ds, i = \overline{1, N},$$

$$(Lx)_{N+k} = e^{-b_k t} y_{N+k}^{(0)} +$$

$$+ \sum_{j=1}^N b_{kj} \int_0^t e^{-b_k(t-s)} w_k(s) v_j(s) ds, k = \overline{1, M}.$$

Из построения оператора L следует, что решение $x(t)$ операторного уравнения (6) является также решением системы (2), причем начальные данные решений систем (2) и (3) при условии (4) связаны соотношениями

$$x_i^{(0)} = y_i^{(0)}, i = \overline{1, N},$$

$$x_{N+k}^{(0)} = y_{N+k}^{(0)} - \sum_{j=1}^N b_{kj} \int_0^{+\infty} w_k(s) v_j(s) ds, \\ k = \overline{1, M}, \quad (7)$$

а при выполнении (5) –

$$x_i^{(0)} = y_i^{(0)} + \sum_{j=1}^M a_{ij} \int_0^{+\infty} v_j(s) w_j(s) ds, i = \overline{1, N},$$

$$x_{N+k}^{(0)} = y_{N+k}^{(0)}, k = \overline{1, M}. \quad (8)$$

Покажем, что $L : \Omega_0 \rightarrow \Omega_0$, где $\Omega_0 = \{x : \|x\|_{\Omega} \leq c_0, c_0 \in R_+\}$ для некоторого достаточно малого c_0 .



Пусть $\|x\|_{\Omega} \leq c_0$. Тогда для компонент оператора L в случае выполнения условия (4) справедливы оценки

$$\begin{aligned} |(Lx)_i| &\leq e^{(a_i+\varepsilon)t} \left[|y_i^{(0)}| + c_0^2 \sum_{j=1}^M a_{ij} d_j \right], \quad i = \overline{1, N}; \\ |(Lx)_{N+k}| &\leq e^{-b_k t} \left[|y_{N+k}^{(0)}| + c_0^2 \sum_{j=1}^N \frac{e^{(a_j+\varepsilon)t}}{(a_j+\varepsilon)} b_{kj} \right], \\ &\quad k = \overline{1, M}, \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$d_j = \begin{cases} \frac{1}{\varepsilon}, & \text{если } b_j = 0, \\ \frac{1}{b_j - \varepsilon}, & \text{если } b_j > 0. \end{cases}$$

В случае выполнения условия (5) получим:

$$\begin{aligned} |(Lx)_i| &\leq |y_i^{(0)}| + c_0^2 \sum_{j=1}^M \frac{e^{-b_j t}}{b_j} a_{ij}, \quad i = \overline{1, N}; \\ |(Lx)_{N+k}| &\leq e^{(-b_k+\varepsilon)t} \left[|y_{N+k}^{(0)}| + \frac{c_0^2}{\varepsilon} \sum_{j=1}^N b_{kj} \right], \\ &\quad k = \overline{1, M}. \end{aligned} \quad (10)$$

В случае выполнения (4) выберем c_0 такое, что справедливы следующие оценки:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= c_0 \max_{i=1, N} \left\{ \sum_{j=1}^M a_{ij} d_j \right\} < 1, \\ \theta_2 &= c_0 \max_{k=1, M} \left\{ \sum_{j=1}^N \frac{b_{kj}}{(a_j + \varepsilon)} \right\} < 1. \end{aligned} \quad (11)$$

Если выполняется (5), то выберем c_0 такое, что верны следующие оценки:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= c_0 \max_{i=1, N} \left\{ \sum_{j=1}^M \frac{a_{ij}}{b_j} \right\} < 1, \\ \theta_2 &= \frac{c_0}{\varepsilon} \max_{k=1, M} \left\{ \sum_{j=1}^N b_{kj} \right\} < 1. \end{aligned} \quad (12)$$

Выберем $y_i^{(0)}$ и $y_{N+k}^{(0)}$ такие, что

$$\begin{aligned} |y_i^{(0)}| &\leq (1 - \theta_1) c_0, \quad i = \overline{1, N}, \\ |y_{N+k}^{(0)}| &\leq (1 - \theta_2) c_0, \quad k = \overline{1, M}. \end{aligned} \quad (13)$$

Тогда при выполнении условия (4) из оценок (9) и (13) следует:

$$\begin{aligned} |(Lx)_i| &\leq c_0 e^{(a_i+\varepsilon)t}, \quad i = \overline{1, N}; \\ |(Lx)_{N+k}| &\leq c_0 e^{\beta_{N+k} t}, \quad k = \overline{1, M}. \end{aligned}$$

Если выполняется условие (5), то из оценок (9) и (13) получим:

$$\begin{aligned} |(Lx)_i| &\leq c_0, \quad i = \overline{1, N}; \\ |(Lx)_{N+k}| &\leq c_0 e^{(-b_k+\varepsilon)t}, \quad k = \overline{1, M}. \end{aligned}$$

Следовательно, $\|Lx\|_{\Omega} \leq c_0$ при всех $x \in \Omega_0$.

Аналогично работе Е. В. Воскресенского²² доказывается, что оператор L является вполне непрерывным на Ω_0 и, следовательно, удовлетворяет всем условиям принципа Шаудера²³ о существовании неподвижной точки для уравнения (6).

Учитывая оценки (9) и (12), в случае справедливости условия (4) и $b_k = 0$ при всех $t \geq 0$, получим

²² Воскресенский Е. В. [Асимптотические методы: теория и приложения](#). Саранск : СВМО, 2000. 300 с.

²³ Треногин В. А. [Функциональный анализ](#). М. : Наука, 1980. 496 с.

$$\left| x_i(t; 0, x^{(0)}) - y_i(t; 0, y^{(0)}) \right| \leq \theta_1 c_0 e^{(a_i + \varepsilon)t},$$

$$i = \overline{1, N};$$

$$\left| x_{N+k}(t; 0, x^{(0)}) - y_{N+k}(t; 0, y^{(0)}) \right| \leq$$

$$\leq \theta_2 c_0 e^{(a_0 + \varepsilon)t}, k = \overline{1, M},$$

где $a_0 = \max_{i=\overline{1, N}} a_i$; при $b_k > 0$ при всех $t \geq 0$ имеем

$$\left| x_i(t; 0, x^{(0)}) - y_i(t; 0, y^{(0)}) \right| \leq \theta_1 c_0 e^{a_i t},$$

$$i = \overline{1, N};$$

$$\left| x_{N+k}(t; 0, x^{(0)}) - y_{N+k}(t; 0, y^{(0)}) \right| \leq$$

$$\leq \theta_2 c_0 e^{-b_k t}, k = \overline{1, M}.$$

Если же выполняются условия (5), то при всех $t \geq 0$

$$\left| x_i(t; 0, x^{(0)}) - y_i(t; 0, y^{(0)}) \right| \leq$$

$$\leq \theta_1 c_0 e^{-b_0 t}, i = \overline{1, N};$$

$$\left| x_{N+k}(t; 0, x^{(0)}) - y_{N+k}(t; 0, y^{(0)}) \right| \leq$$

$$\leq \theta_2 c_0 e^{(-b_k + \varepsilon)t}, k = \overline{1, M}.$$

где $b_0 = \min_{k=\overline{1, M}} b_k$.

Поскольку $a_i + \varepsilon < 0$, $i = \overline{1, N}$, $-b_k + \varepsilon < 0$, $k = \overline{1, M}$, то

$$\left\| x(t; 0, x^{(0)}) - y(t; 0, y^{(0)}) \right\| \rightarrow 0$$

при $t \rightarrow +\infty$,

равномерно по $x^{(0)}$ и $y^{(0)}$.

Поскольку системы (2) и (3) являются локально асимптотически эквивалентными по Брауеру и выполняются условия теоремы 1.1 из работы [6], то свойство устойчивости и асимптотической устойчивости компонент решений системы (2) полностью определяются поведением соответствующих компонент решений системы (3). Отсюда

следует, что нулевое решение системы (2) обладает свойствами 1–2, приведенными в формулировке теоремы.

Доказательство завершено

Результаты исследования

В качестве примера рассмотрим модель вида (1) в случае, когда два вида питаются третьим [7]:

$$\begin{cases} \frac{dv_1}{dt} = a_1 v_1 - a_{11} v_1 w_1 - a_{12} v_1 w_2, \\ \frac{dw_1}{dt} = -b_1 w_1 + b_{11} w_1 v_1, \\ \frac{dw_2}{dt} = -b_2 w_2 + b_{21} w_2 v_1, \end{cases} \quad (14)$$

где a_1, b_1, b_2 удовлетворяют условиям (4) и (5); $a_{11}, a_{12}, b_{11}, b_{21}$ – положительные.

В этом случае у системы (14) существует только нулевое положение равновесия. Исследуем его на устойчивость по части переменных.

Из выполнения условий теоремы можно сделать следующие выводы об устойчивости по части переменных нулевого положения равновесия нелинейной системы (14):

1) при $a_1 < 0$, $b_1 > 0$, $b_2 = 0$ асимптотически устойчиво по переменным v_1 , w_1 и устойчиво по переменной w_2 , причем по переменной w_2 имеется локальное асимптотическое равновесие;

2) при $a_1 < 0$, $b_1 = 0$, $b_2 > 0$ асимптотически устойчиво по переменным v_1 , w_2 и устойчиво по переменной w_1 , причем по переменной w_1 имеется локальное асимптотическое равновесие;

3) при $a_1 < 0$, $b_1 = 0$, $b_2 = 0$ асимптотически устойчиво по переменной v_1 и устойчиво по переменным w_1 , w_2 , причем по переменным w_1 и w_2 имеется локальное асимптотическое равновесие;

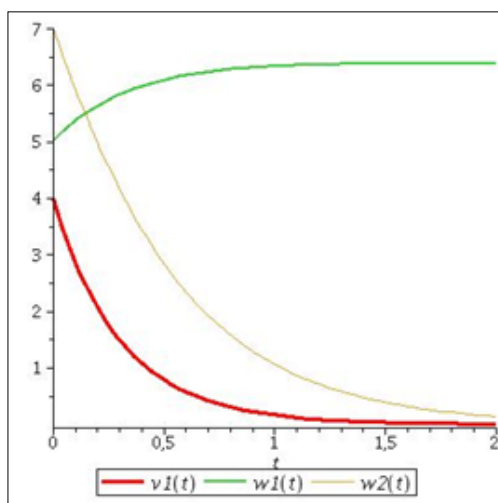
4) при $a_1 = 0$, $b_1 > 0$, $b_2 > 0$ устойчиво по переменной v_1 и асимптотически устойчиво по переменным w_1 , w_2 , причем по переменной v_1 имеется локальное асимптотическое равновесие.



Для проведения численного моделирования выбраны три группы коэффициентов рождаемости и смертности a_1, b_1, b_2 (см. рис. 1–3), соответствующие условиям 2)–4). Графики решений для случая 1) соответствуют случаю 2), если переменные w_1 и w_2 в системе (14) поменять местами. В качестве значений параметров

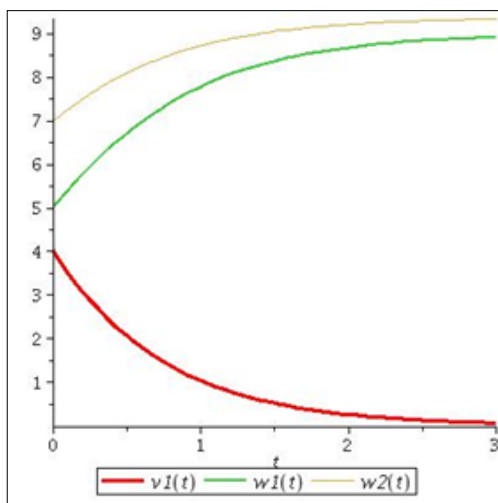
a_{ij}, b_{ij} были выбраны следующие: $a_{11} = 0,03; a_{12} = 0,02; b_{11} = 0,2; b_{21} = 0,1$. Начальные значения численностей популяций «жертв» и «хищников» определены следующим образом: $v_1(0) = 4, w_1(0) = 5, w_2(0) = 7$.

Приведем графики, отражающие динамику численности популяций в исследуемой модели.



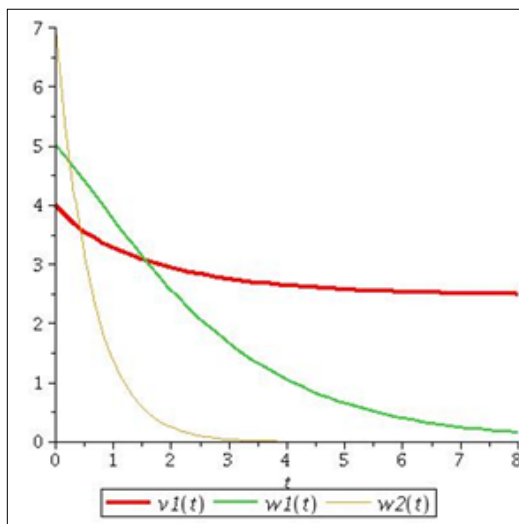
Р и с. 1. Графики компонент решений системы (14) при $a_1 = -3, b_1 = 0, b_2 = 2$

F i g. 1. Graphs of solution components of system (14) at $a_1 = -3, b_1 = 0, b_2 = 2$



Р и с. 2. Графики компонент решений системы (14) при $a_1 = -1, b_1 = 0, b_2 = 0$

F i g. 2. Graphs of solution components of system (14) at $a_1 = -1, b_1 = 0, b_2 = 0$



Р и с. 3. Графики компонент решений системы (14) при $a_1 = 0, b_1 = 1, b_2 = 2$

F i g. 3. Graphs of solution components of system (14) at $a_1 = 0, b_1 = 1, b_2 = 2$

Обсуждение и заключения

Как видно из рис. 1, численности популяций второго вида «хищников» и «жертв» убывают, а численность первого вида «хищников» увеличивается до определенного предела, что подтверждается полученными аналитическими результатами. Таким образом, если рождаемость и смертность одного вида «хищников» равны, а у второго вида «хищников» и «жертв» смертность превышает рождаемость, то независимо от значений остальных параметров произойдет стабилизация численности первой популяции и вымирание двух других.

На рис. 2 численность «жертв» стремится к нулевому значению, а численность популяций «хищников» с те-

чением времени приходит к постоянному значению. Действительно, если коэффициент смертности больше коэффициента рождаемости для «жертв», но при этом рождаемость и смертность «хищников» равны, то происходит вымирание «жертв» и стабилизация численности «хищников».

Из рис. 3 следует, что если смертность двух популяций, истребляющих третью, превышает рождаемость, а рождаемость и смертность третьей популяции равны, то независимо от значений остальных параметров, численность популяции «жертв» и первой популяции «хищников» с течением времени убывают, а численность другой популяции «хищников» стабилизируется.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Язовцева О. С. Локальная покомпонентная асимптотическая эквивалентность и ее применение к исследованию устойчивости по части переменных [Электронный ресурс] // Огарёв-online. 2017. № 13. URL: <http://journal.mrsu.ru/arts/lokalnaya-pokomponentnaya-asimptoticheskaya-ekvivalentnost-i-ee-primeneniye-k-issledovaniyu-ustojchivosti-po-chasti-peremennyh>
2. Шаманаев П. А., Язовцева О. С. Достаточные условия локальной покомпонентной асимптотической эквивалентности нелинейных систем обыкновенных дифференциальных уравнений и ее приложение к устойчивости по части переменных // Журнал Средневолжского математического общества. 2017. Т. 19, № 1. С. 102–115. URL: <http://www.svmo.ru/journal/archive/article?id=1541>



3. **Verhulst P. F.** Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement // *Corr. Math. et Phys.* 1838. Vol. 10. P. 113–121.
4. **Pearl R.** The growth of populations // *Quart. Rev. Biol.* 1927. Vol. 2. P. 532–548. URL: <https://www.jstor.org/stable/2808218>
5. **Volterra V.** Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi // *Mem. Accad. Naz. Lincei. (Ser. 6).* 1926. Vol. 2. P. 31–113. URL: https://www.liberliber.it/mediateca/libri/v/volterra/variazioni_e_fluttuazioni/pdf/volterra_variazioni_e_fluttuazioni.pdf
6. **Базыкин А. Д., Березовская Ф. С., Бурнев Т. И.** Динамика системы хищник-жертва с учетом насыщения и конкуренции // *Факторы разнообразия в математической экологии и популяционной генетике* : сб. науч. тр. 1980. С. 6–33.
7. **Manna D., Maiti A., Samanta G. P.** Analysis of a predator-prey model for exploited fish populations with schooling behavior // *Applied Mathematics and Computation.* Vol. 317. P. 35–48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2017.08.052>
8. Stability and bifurcation analysis of a three-species food chain model with fear / P. Panday [et al.] // *International Journal of Bifurcation and Chaos.* 2018. Vol. 28, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218127418500098>
9. Stability analysis of prey-predator system with holling type functional response and prey refuge / Z. Ma [et al.] // *Advances in Difference Equations.* 2017. Vol. 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13662-017-1301-4>
10. On the dynamics of an intraguild predator-prey model / F. Capone [et al.] // *Mathematics and Computers in Simulation.* 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2018.01.004>
11. **Yunfeng J.** Analysis on dynamics of a population model with predator-prey-dependent functional response // *Applied Mathematics Letters.* 2018. Vol. 80. P. 64–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aml.2018.01.006>
12. **Fergola P., Tenneriello C.** Lotka-Volterra models: partial stability and partial ultimate boundedness // *Biomath. and Related Comput. Prob. Proc. Workshop.* 1988. P. 283–294.
13. **Игнатьев А. О.** О глобальной асимптотической устойчивости положения равновесия уравнений Лотки-Вольтерры в изменяющейся среде // *Дифференциальные уравнения.* 2014. Т. 50, № 3. С. 290–295. URL: http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jmid=ivm&paperid=9223&option_lang=rus

Поступила 14.05.2018; принята к публикации 29.06.2018; опубликована онлайн 20.09.2018

Об авторах:

Шаманаев Павел Анатольевич, доцент кафедры прикладной математики, дифференциальных уравнений и теоретической механики, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68/1), кандидат физико-математических наук, доцент, Researcher ID: J-6591-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0135-317X>, korspa@yandex.ru

Язовцева Ольга Сергеевна, аспирант кафедры прикладной математики, дифференциальных уравнений и теоретической механики, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарева» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68/1), Researcher ID: J-6507-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8075-4491>, kurinaos@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

П. А. Шаманаев – формулировка и постановка задачи, доказательство теоремы; О. С. Язовцева – обзор литературы, изложение и анализ результатов исследования.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Yazovtseva O. S. [Local component-wise asymptotic equivalence and its application to investigate stability with respect to a part of variables]. *Ogarev-online.* 2017; 13. Available at: http://journal.mrsu.ru/Physics_and_mathematics

arts/lokalnaya-pokomponentnaya-asimptoticheskaya-ekvivalentnost-i-ee-primenenie-k-issledovaniyu-ustojchivosti-po-chasti-peremennyx (In Russ.)

2. Shamanaev P. A., Yazovtseva O. S. [The sufficient conditions of local asymptotic equivalence of nonlinear systems of ordinary differential equations and its application for investigation of stability respect to part of variables]. *Zhurnal Srednevolzhskogo matematicheskogo obshchestva* = Journal of Middle Volga Mathematical Society. 2017; 19(1):102–115. Available at: <http://www.svmo.ru/journal/archive/article?id=1541> (In Russ.)

3. Verhulst P. F. Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement. *Corr. Math. et Phys.* 1838; 10:113–121.

4. Pearl R. The growth of populations. *Quart. Rev. Biol.* 1927; 2:532–548. Available at: <https://www.jstor.org/stable/2808218>

5. Volterra V. Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi. *Mem. Accad. Naz. Lincei. (Ser. 6).* 1926; 2:31–113. Available at: https://www.liberliber.it/mediateca/libri/v/volterra/variazioni_e_fluttuazioni/pdf/volterra_variazioni_e_fluttuazioni.pdf

6. Bazykin A. D., Berezovskaya F. S., Buriev T. I. [Dynamics of the predator-prey system taking into account saturation and competition]. *Fakty raznoobraziya v matematicheskoy ekologii i populatsionnoy genetike: sb. nauch. tr.* = Factors of Diversity in Mathematical Ecology and Population Genetics: Proceedings. Pushchino; 1980. P. 6–33.

7. Manna D., Maiti A., Samanta G. P. Analysis of a predator-prey model for exploited fish populations with schooling behavior. *Applied Mathematics and Computation.* 2018; 317:35–48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2017.08.052>

8. Panday P., Pal N. Samanta S., Chattopadhyay J. Stability and bifurcation analysis of a three-species food chain model with fear. *International Journal of Bifurcation and Chaos.* 2018; 28(1). DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218127418500098>

9. Ma Z., Wang S., Wang T., Tang H. Stability analysis of prey-predator system with holling type functional response and prey refuge. *Advances in Difference Equations.* 2017; 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13662-017-1301-4>

10. Capone F., Carfora M. F., De Luca R., Torricollo I. On the dynamics of an intraguild predator-prey model. *Mathematics and Computers in Simulation.* 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2018.01.004>

11. Yunfeng J. Analysis on dynamics of a population model with predator-prey-dependent functional response. *Applied Mathematics Letters.* 2018; 80:64–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aml.2018.01.006>

12. Fergola P., Tenneriello C. Lotka-Volterra models: partial stability and partial ultimate boundedness. *Biomath. and Related Comput. Prob. Proc. Workshop.* 1988. P. 283–294.

13. Ignatov A. O. On global asymptotic stability of the equilibrium of “predator–prey” system in varying environment. *Russian Mathematics.* 2017; 61(4):5–10. Available at: <https://link.springer.com/article/10.3103%2FS1066369X17040028>

Received 14.05.2018; revised 29.06.2018; published online 20.09.2018

About authors:

Pavel A. Shamanaev, Associate Professor, Chair of Applied Mathematics, Differential Equations and Theoretical Mechanics, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Physics and Mathematics), Researcher ID: J-6591-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0135-317X>, korspa@yandex.ru

Olga S. Yazovtseva, Postgraduate Student, Chair of Applied Mathematics, Differential Equations and Theoretical Mechanics, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Researcher ID: J-6507-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8075-4491>, kurinaos@gmail.com

Authors' contribution:

P. A. Shamanaev – formulating the problem, proving the theorem; O. S. Yazovtseva – reviewing the relevant literature, presenting and analysis of the research results.

All authors have read and approved the final version of the paper.



ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ / COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

УДК 378.1

DOI: 10.15507/0236-2910.028.201803.333-343



A Perspective Model of Innovative Integrated Structure Comprising University, Research Facility and Enterprise

**A. A. Kharin^{1*}, O. S. Kharina¹, A. V. Rodyukov²,
E. S. Petrova³**

*¹Moscow State Technological University “STANKIN”
(Moscow, Russia)*

²Moscow Institute of Physics and Technology (Moscow, Russia)

³National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

**aah@live.ru*

Introduction. The problem of mathematical modeling in innovative technologies is the lack of a developed general model of innovation processes. The existing approaches allow simulating innovations from any one part: political, economic (in various aspects) or describe the general structure of innovative activity. For example, innovations can be estimated such indicator as sales volume of an innovative product. However, it does not mean that there are no other indicators or they are not important.

Materials and Methods. The models by L. Leydesdorf and S. Kauffman, including NK model originally used for the analysis of development of biological populations, were chosen for research of the model choice problems of the innovative integrated structure between university, the enterprise and research laboratory.

Results. Modeling the innovative integrated structure between participants of process is carried out based on expert assessment of the innovative landscape for a case of the maximum interdependence.

Conclusions. A brief description of modeling methods in innovative technologies is presented in this article. The general description of the problem sphere is given. The current state of researches of this problem is specified. The imitation of innovative networks development options based on the NK model at the independent strategy of participants is constructed. The case of the maximum complexity of network when all participants of an innovation are interconnected and also local and global optimum in a landscape of projects payback is considered.

Keywords: imitation model, network structure, innovative landscape, NK, innovative integrated structure

© Kharin A. A., Kharina O. S., Rodyukov A. V., Petrova E. S., 2018



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

For citation: Kharin A. A., Kharina O. S., Rodyukov A. V., Petrova E. S. A Perspective Model of Innovative Integrated Structure Comprising University, Research Facility and Enterprise. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):333–343. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.333-343>

Перспективная модель инновационной структуры, охватывающей университет, исследовательский центр и предприятие

А. А. Харин^{1*}, О. С. Харина¹, А. В. Родюков², Е. С. Петрова³

¹ ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (Москва, Россия)

² ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (государственный университет)» (Москва, Россия)

³ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский государственный университет им. Н. П. Огарёва» (Саранск, Россия)

*aah@live.ru

Введение. Проблема математического моделирования в инноватике состоит в том, что общей модели инновационных процессов до настоящего времени не разработано, а существующие подходы позволяют смоделировать инновации с какой-либо одной стороны: политической, экономической (в различных аспектах) или описывают общую структуру инновационной деятельности. Например, инновации можно оценивать с помощью такого показателя, как объем продаж инновационного продукта, однако это не означает, что других индикаторов не существует или они менее значимы.

Материалы и методы. Для исследования проблем выбора модели инновационной интегрированной структуры между университетом, предприятием и научной лабораторией были выбраны модели Л. Лейдесдорфа и С. Кауфмана, а также модель НК, первоначально использованная для анализа развития биологических популяций.

Результаты исследования. В статье приведены результаты моделирования инновационной интегрированной структуры между участниками процесса. На основании экспертной оценки составлен инновационный ландшафт для случая их максимальной взаимозависимости.

Обсуждение и заключения. В статье представлено краткое описание методов моделирования в инноватике; дано общее описание проблемной сферы; изложено современное состояние исследований данной проблемы. Построена имитация вариантов развития инновационных сетей на основе модели НК при независимых стратегиях участников. Рассмотрен случай максимальной сложности сети, когда все участники инновации взаимосвязаны, а также локальные и глобальные оптимумы в ландшафте окупаемости проектов.

Ключевые слова: имитационная модель, сетевая структура, инновационный ландшафт, НК, инновационная интеграционная структура

Для цитирования: Перспективная модель инновационной структуры, охватывающей университет, исследовательский центр и предприятие / А. А. Харин [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 333–343. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.333-343>

Introduction

Objectively tendencies of economic development in many countries cause development of integration between education, science and industry, including use of work management organization methods in the scientific organizations specific to corporate sector of economy. In many

countries universities started radical transformations, seeking to adapt to the new calls arising in the conditions of the worldwide competition.

Developed countries move in the direction of the innovative integrated structures creation, often with active participation of the state. For effective man-



agement any control system has to possess object management model. The modeling purpose of this work consists in the availability to build forecasts using available data of subjects of the innovative system (universities, research facilities and the enterprises) activity to understand possible consequences of innovative system internal dynamics. The current article differs in principle from the other articles of the same topic by applying L. Leidesdorff's and S. Kauffman's models, including NK model which is originally used for the analysis of development of biological populations, to the research of the innovative integrated structure choice problems model between university, enterprise and research facility.

It is possible to use L. Leidesdorff and S. Kauffman's models which reproduce behavior of the network introducing new technologies and gaining additional income both from production and from expansion of a network as an example. Such models are called imitating as they allow to reproduce possible behavior of system under certain conditions. They are created on the basis of the assumption and subsequently generated data which can be analyzed on purpose as "indirect" proof of the put-forward prerequisites.

In L. Leidesdorff's model the market of two competing technologies (innovations) is imitated, and there're three sources of variations: innovation, market, state. The network structure gives the chance of the company to get advantage of a complementarity. It is expressed that system effectiveness rises with growth of consumers number.

The model includes two technologies and two subjects using these technologies. The choice of technology by subjects is defined by their compliance to the purposes of subjects, and also network effect which depends on number of the subjects who chose a certain technology. Thus, at a network expansion, some technologies are forced out, thereby reducing a variety of future development. Return

to balanced position is possible only if technology market is big enough. Continuous formation of exclusive technologies for each market slows down development of innovative system in general because prevalence in the market of one technology: first, inefficiently; secondly, corresponds to a local optimum; thirdly, reduces probability of a radical innovation that slows down rates of technological development; and, fourthly, demands active state intervention.

Other model applicable for object research, were created in 1993 for biological processes studying and received the name "NK model". The NK model – the mathematical model described by its main inventor Stewart Kauffman as "reliably adjusted" adapted landscape. The adjusted durability allows change in the full size of a landscape and the number of its local "hills and valleys" through modifications of his two N and K parameters. The NK model has found application in a big variety of areas, including a theoretical research of evolutionary biology, immunology, optimization, technological evolution and complex systems. The model has been also accepted in the organizational theory where it is used to describe a way which the organization can look for a suitable landscape, operating the various features. For example, hills and valleys of the organization represent profit (or its changes), and the movement on a landscape requires organizational solutions (such as addition of production lines or change of organizational structure) which tend to interact with each other and the profit of influence in the difficult way.

It considers uncertainty of system subjects actions along with distinction of regularities of their development and the purposes and represents a heuristic method of interrelations studying in innovative systems. The model received the most obvious application for search of economic network optimum structure consisting of three independent participants: producer, consumer and state.

Literature Review

Scientific and educational-methodical literature, articles in the Russian and foreign periodicals concerning a problem of mathematical modeling in innovatics have been used in this article.

The works by H. Etzkowitz¹, E. Weinberger [1], L. Leydesdorf [2, 3, 4], S. Kauffman²⁻³ [1] became the main sources opening theoretical bases of innovative processes mathematical modeling. In these articles the methodology, the principles and approaches to imitating model creation which reproduces behavior of network after introduction of new technologies are considered in the detail; the heuristic method of interrelations studying in innovative systems which has found the application in search of economic network optimum structure is presented.

In works of K. Frenken [5], I. K. Musayelyan [6–7], G. V. Serebryakova [6], A. A. Kharin⁴ [8], S. N. Grigorev [9], Yu. Ya. Eleneva [9,10,11], V. N. Andreyev⁵ [11] the basic concepts, the principles, approaches to innovatics, subjects of innovative system, the prospect of development and integration of innovative mechanisms in various fields of activity are considered. Besides, in works by A. A. Kharin and O. S. Kharina⁶ [8] domestic experience of mathematical model development in imitating modeling of innovative processes between institutions of education and representatives of a business environment is presented. In the considered works it is proved that despite existence of innovations imitating modeling techniques in a narrow segment of

activity, there is now no general approach to creation of innovative processes model which would allow to predict scenarios of the innovative integrated structure of education, science and business development.

Materials and Methods

Let's construct a threefold spiral of communications. Let the innovative network consist of a combination of binary variables:

- producers (enterprises) $X = (0, 1)$: differ through designated technology which is by 0 and 1: for example, traditional and innovative;

- universities $Y = (0, 1)$: for example, technical and classical;

- research laboratories (RL) $Z = (0, 1)$: for example, defensive or civil.

As a result possible combinations of three variables make $8 = 2^3$ combinations which in this system of designations form space of variables: 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111.

Let's consider development option when each subject acts irrespective of the others, and the number of communications is equal to 0. In fig. 1 and in table 1 “landscape” for all options – combinations of the producer, university and research laboratory – is illustrated.

According to table 1 it is visible that communications between participants of process are weak. When communications between participants do not exist, the optimal variant of communications corresponds to that option in which the maximum values of innovations emergence frequencies for all participants are combined.

¹ Etzkowitz H. [The triple helix: university-industry-government innovation in action](#). London: Routledge; 2008. 180 p.

² Kauffman S. A. The evolution of economic webs. In: Anderson P. W., Arrow K. J., Pines D., editors. The economy as an evolving complex system. Addison-Wesley; 1988. P. 125–146.

³ Kauffman S. A. [The origins of order: Self-organization and selection in evolution](#). New York, Oxford; 1993. 734 p.

⁴ Kharin A. A., Kharina O. S., Yeleneva J. Y., Andreev V. N. Innovative infrastructure as basic element of national innovative system // 2nd International Conference on Business, Economics and Management (BEM 2017). 2017; 7:3–7.

⁵ Ibid.

⁶ Ibid.

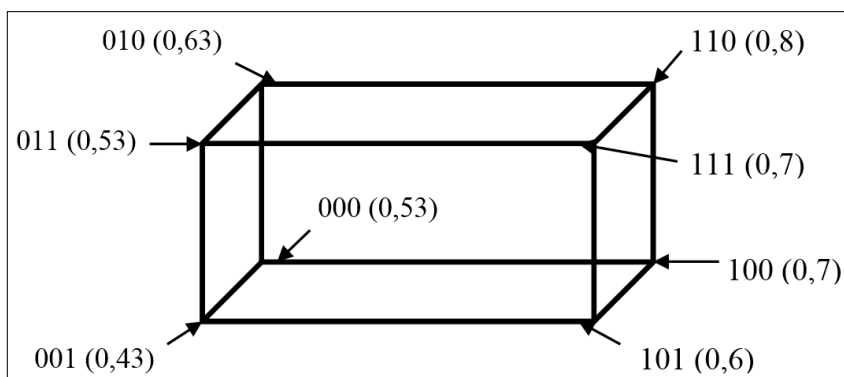


Fig. 1. Innovative "landscape" for independent strategies of network participants
Р и с. 1. Инновационный «ландшафт» для независимых стратегий участников сети

Table 1
Таблица 1

**Imitation of innovative networks options development on the basis of the NK model
at independent strategies of participants**

**Имитация развития вариантов инновационных сетей на основе модели НК
при независимых стратегиях участников**

Network symbol / Сетевой символ	Frequency of innovations at enterprise $x - f_x$ / Частота инноваций на предприятии $x - f_x$	Frequency of innovations at university $y - f_y$ / Частота инноваций в университете $y - f_y$	Frequency of innovations at research laboratory $z - f_z$ / Частота инноваций в исследовательской лаборатории $z - f_z$	Frequency of innovations, average on line (the characteristic of "compliance" of a network) – f_{xyz} / Частота инноваций, средняя по строке (характеристика «соответствия» сети) – f_{xyz}
000	0,2	0,6	0,8	0,53
001	0,2	0,6	0,5	0,43
010	0,2	0,9	0,8	0,63
011	0,2	0,9	0,5	0,53
100	0,7	0,6	0,8	0,70
101	0,7	0,6	0,5	0,60
110	0,7	0,9	0,8	0,80
111	0,7	0,9	0,5	0,70

According to table 1 it is obvious that the maximum value of compliance is the only one and it is provided with a combination 110 with value equal 0,8. It allows to assume that any other option can be improved by replacement of one participant because two of three participants of a network can agree and replace technology, a market segment or the country of

residence. This property of a network can be considered due to the need of continuous search of the best options of the organization of innovative process. It is visible from graphic display of an innovative landscape in fig. 2.

The maximum complexity of a network arises when all participants of an innovation are interconnected. In this

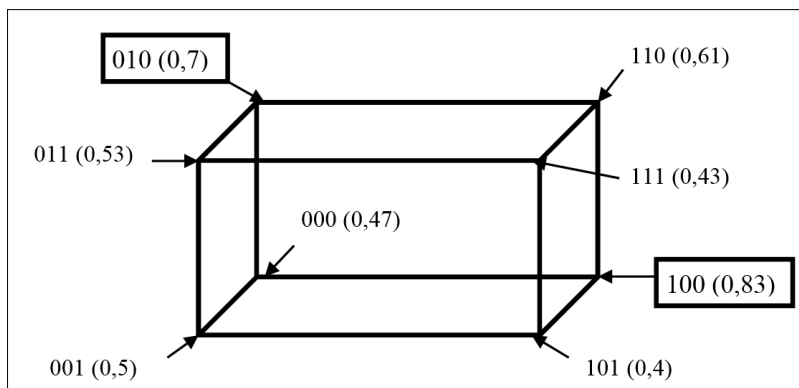


Fig. 2. Local and global optimum in an innovative landscape

Р и с. 2. Локальный и глобальный оптимум в инновационном ландшафте

case compliance between participants is defined for each combination separately because efficiency of actions of one participant depends on what partners he will choose. The conditional example of such network is given in table 2.

Change of complexity of a network led to efficiency change. It is expressed that quality of work of any participant of an innovation becomes dependent on with

what partners this work is performed. It should be noted that such representation, certainly, more corresponds to modern realities. In this case “partial discrepancy” of one transaction participant can be compensated with interest of high compliance level of two others. Therefore in innovative activity representation there is a possibility of several optimum as it is shown in fig. 2.

Table 2

Т а б л и ц а 2

Landscape at the maximum dependence of strategy of participants

Ландшафт при максимальной зависимости стратегии участников

Network symbol / Сетевой символ	Frequency of innovations at enterprise $x-f_x$ / Частота инноваций на предприятии $x-f_x$	Frequency of innovations at university $y-f_y$ / Частота инноваций в университете $y-f_y$	Frequency of innovations at research laboratory $z-f_z$ / Частота инноваций в исследовательской лаборатории $z-f_z$	Frequency of innovations, average on line (the characteristic of “compliance” of a network) – f_{xyz} / Частота инноваций, средняя по строке (характеристика «соответствия» сети) – f_{xyz}
000	0,6	0,3	0,5	0,47
001	0,1	0,5	0,9	0,50
010	0,7	0,9	0,5	0,70
011	0,3	0,5	0,8	0,53
100	0,9	0,9	0,7	0,83
101	0,7	0,2	0,3	0,40
110	0,6	0,7	0,6	0,63
111	0,4	0,8	0,1	0,43



Results

According to the above-mentioned theoretical approaches confirmed with the corresponding imitating models, the main factors are ensuring the maximum variety and effective selection. We will review an example: two enterprises (X_0, X_1) at the moment have a production base for commercialization of two similar technologies which are developed at two universities (Y_0, Y_1) and researched at two scientific laboratories (Z_0, Z_1). At the same time it is necessary to consider the following facts.

1. The X_0 enterprise has higher level of production capacities, than the X_1 enterprise.

2. The X_1 enterprise has proved in the market and has more extensive client base, than the X_0 enterprise.

3. The Y_0 university has a large number of highly qualified specialists, for involvement in the project, at the same size of financing of the project, as higher education institution of Y_1 .

4. The Y_1 university has more success in R&D, than Y_0 university, and possesses a quantity of own production equipment.

5. By results of research the product of scientific laboratory Z_0 has potential to borrow narrower segment of the market, than technology of scientific laboratory Z_1 , however at the predicted price of a product Z_1 exceeds planned by 10 %.

6. Research and development shows the technology of scientific laboratory Z_1 costs cheaper, but according to forecasts will occupy more market share (for 0,08 %) then product of scientific laboratory Z_0 .

We will consider as evaluation criteria an indicator of payback of the project in N years. In the view of above-mentioned conditions by an expert assessment we will make an innovative landscape at the maximum dependence of participants (table 3 and fig. 3).

Analyzing all options of participants interaction we come to a conclusion that the projects realized in combinations of $X_0Y_0Z_1$ and $X_1Y_1Z_1$ however for each subject the best scenario may be defined separately from interests of other parties. If we take into account additional criteria of subjects activity during cooperation the picture may significantly change.

Table 3
Таблица 3

Landscape of projects paybacks at the maximum dependence of participants strategy
Ландшафт окупаемости проектов при максимальной зависимости стратегии участников

Network symbol / Сетевой символ	Payback of the project in N years for enterprise $x - f_x$ / Окупаемость проекта за N лет для предприятия $x - f_x$	Payback of the project in N years for university $y - f_y$ / Окупаемость проекта за N лет для университета $y - f_y$	Payback of the project in N years for research laboratory $z - f_z$ / Окупаемость проекта за N лет для исследовательской лаборатории $z - f_z$	Payback of the project, average on line, in N years – f_{xyz} / Средняя окупаемость проекта за N лет – f_{xyz}
000	0,70	0,60	0,71	0,67
001	0,80	0,74	0,80	0,78
010	0,65	0,72	0,70	0,69
011	0,70	0,70	0,73	0,71
100	0,55	0,60	0,65	0,60
101	0,67	0,70	0,73	0,70
110	0,75	0,77	0,70	0,74
111	0,78	0,72	0,81	0,77

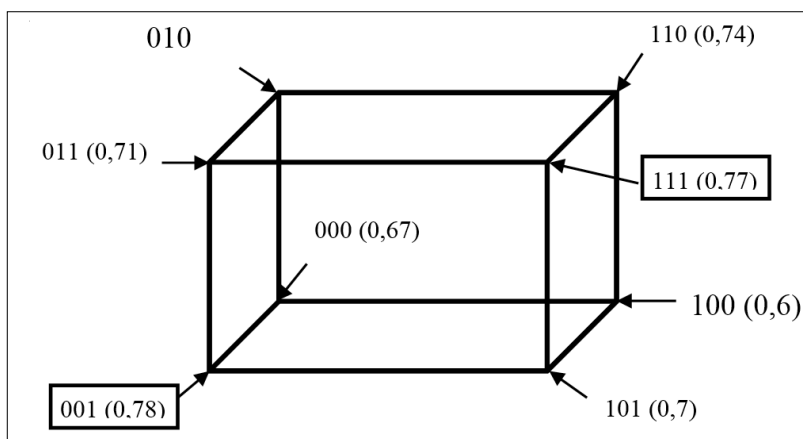


Fig. 3. Local and global optimum in a landscape of projects payback

Р и с. 3. Локальный и глобальный оптимум в ландшафте окупаемости проектов

Conclusions

The NK model which is originally used for the analysis of biological populations development is called so on number of the interacting elements (N) and complexity (K) which is understood as number of the elements in a network influencing each participant, i.e. coherence of elements of a spiral. Number of agents in model of a threefold spiral, by definition, in system from three subjects equally we rub. Producers are classified by the used technol-

ogy, universities – in the main directions of educational activity, research laboratories – in the main directions of conducting scientific researches. Each combination of the producer (i. e. technologies, the corresponding innovation), university and research laboratory forms a network or a spiral. The market (consumer) provides the choice of the most successful combinations, and success of an innovative network is defined by the frequency of creation of product innovations.

REFERENCES

1. Kauffman S., Weinberger E. The NK Model of rugged fitness landscapes and its application to the maturation of the immune response. *Journal of Theoretical Biology*. 1989; 141(2):211–245. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-5193\(89\)80019-0](https://doi.org/10.1016/S0022-5193(89)80019-0)
2. Leydesdorff L. The triple helix: an evolutionary model of innovations. *Research Policy*. 2000; 29(2): 243–255. Available at: <http://pdfs.semanticscholar.org/35a0/046a6c2823098c75615d734f88675dbcb3ac.pdf>
3. Leydesdorff L., Meyer M. The scientometrics of a triple helix of university-industry-government relations (Introduction to the topical issue). *Scientometrics*. 2007; 70(2):207–222. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-007-0200-y>
4. Leydesdorff L. The triple helix, quadruple helix, and an N-tuple of helices: Explanatory models for analyzing the knowledge-based economy? *Journal of Knowledge Economy*. 2012; 3(1):25–35. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13132-011-0049-4>
5. Frenken K. A complexity approach to innovation networks. The case of the aircraft industry (1909–1997). *Research Policy*. 2000; 29(2):257–272. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(99\)00064-5](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(99)00064-5)
6. Musayelyan I. K., Serebryakova G. V. Conceptual features of value management of socio-economic systems. *International Journal of Environmental & Science Education*. 2016; 11(11): 4133–4145.



7. Musaelyan I. K. The potential of corporate culture in the system of interactions between companies. *Life Science Journal*. 2014; 12(12s):895–852. Available at: http://www.lifesciencesite.com/ljsj/life1112s/184_26609life1112s14_850_852.pdf
8. Karpov A., Kharin A., Kharina O. Educational environment forming on the basis of the human capital development // International Conference “Education Environment for the Information Age”. 2016; 29, 2 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/shsconf/20162902019>
9. Grigorev S. N., Eleneva Yu. Ya., Andreev V. N. Technological capital: a criterion of innovative development and an object of transfer in the modern economy. *Procedia CIRP*. 2014; 20:56–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.144>
10. Yeleneva Yu. Ya., Prosvirina M. E., Yelenev K. S., Andreev V. N. Quality of enterprise management during Ramp-up preparation and launch: concept and evaluation method. *Procedia CIRP*. 2016; 51:13–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.015>
11. Yeleneva Yu., Prosvirina M., Golovenchenko A., Andreev V. Analysis and organizational model for monitoring of the training of workers and specialists with secondary vocational education for innovation-oriented enterprises of Russia. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2015; 214:779–787. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.11.717>
12. Pozdnev B., Busina F., Sutyagin M., Ovchinnikov P., Sosenushkin S., Obuhova E., Levchenko A., Sharovtsov V. Knowledge management and competency development based on personal e-portfolio. *ICERI2017 Proceedings*. 2017; 3928–3937. DOI: <https://doi.org/10.21125/iceri.2017.1050>
13. Pozdnev B., Sosenushkin S., Busina F., Ivannikov A., Sutyagin M., Ovchinnikov P., Popov D., Levchenko A. Combining hands-on and virtual experiments in computer networking courses. *ICERI2017 Proceedings*. 2017; 3956–3961. DOI: <https://doi.org/10.21125/iceri.2017.1054>
14. Levinthal D. A. Adaptation on rugged landscapes. *Management Science*. 1997. 43(7):934–950. DOI: <https://doi.org/10.1287/mnsc.43.7.934>

Received 26.02.2018, revised 12.04.2018, published online 20.09.2018

About authors:

Alexander A. Kharin, Professor, Chair of Economics and Enterprise Management, Moscow State Technological University «STANKIN» (1 Vadkovskiy Pereulok, Moscow 127055, Russia), D. Sc. (Economics), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6433-868X>, Researcher ID: C-6286-2015, aah@live.ru

Olga S. Kharina, Engineer, Moscow State Technological University «STANKIN» (1 Vadkovskiy Pereulok, Moscow 127055, Russia), Ph.D. (Economics), Researcher ID: O-6418-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3089-2666>, aah@live.ru

Alexander V. Rodyukov, Associate Professor, Chair of Corporate Information Systems, Moscow Institute of Physics and Technology (1A Kerchenskaya St., Moscow 141701, Russia), Ph.D. (Physics and Mathematics), Researcher ID: B-8197-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8815-1791>, alexander.rodyukov@gmail.com

Elena S. Petrova, Associate Professor, Chair of Statistics, Econometrics and Information Technologies in Management, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Economics), Researcher ID: D-2096-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6300-0740>, elspetrova@mail.ru

Authors' contribution:

A. A. Kharin – formulation of the problem, introduction, and conclusion; O. S. Kharina – data processing, reviewing the relevant literature; A. V. Rodyukov – data processing, landscape construction of interacting organizations, reviewing the relevant literature; E. S. Petrova – data processing, calculation and analysis of strategies, reviewing the relevant literature.

All authors have read and approved the final version of the paper.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Kauffman S., Weinberger E.** The NK Model of rugged fitness landscapes and its application to the maturation of the immune response // Journal of Theoretical Biology. 1989. Vol. 141, Issue 2. P. 211–245. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-5193\(89\)80019-0](https://doi.org/10.1016/S0022-5193(89)80019-0)
2. **Leydesdorff L.** The triple helix: an evolutionary model of innovations // Research Policy. 2000. Vol. 29, Issue 2. P. 243–255. URL: <http://pdfs.semanticscholar.org/35a0/046a6c2823098c75615d734f88675dbcb3ac.pdf>
3. **Leydesdorff L., Meyer M.** The scientometrics of a triple helix of university-industry-government relations (Introduction to the topical issue) // Scientometrics. 2007. Vol. 70, Issue 2. P. 207–222. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-007-0200-y>
4. **Leydesdorff L.** The triple helix, quadruple helix, and an N-tuple of helices: Explanatory models for analyzing the knowledge-based economy? // Journal of Knowledge Economy. 2012. Vol. 3, Issue 1. P. 25–35. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13132-011-0049-4>
5. **Frenken K.** A complexity approach to innovation networks. The case of the aircraft industry (1909–1997) // Research Policy. 2000. Vol. 29, Issue 2. P. 257–272. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(99\)00064-5](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(99)00064-5)
6. **Musayelyan I. K., Serebryakova G. V.** Conceptual features of value management of socio-economic systems // International Journal of Environmental & Science Education. 2016. Vol. 11, no. 11. P. 4133–4145.
7. **Musayelyan I. K.** The potential of corporate culture in the system of interactions between companies // Life Science Journal. 2014. Vol. 12, no. 12s. P. 895–852. URL: http://www.lifesciencesite.com/ljsj/life1112s/184_26609life1112s14_850_852.pdf
8. **Karpov A., Kharin A., Kharina O.** Educational environment forming on the basis of the human capital development. International Conference “Education Environment for the Information Age”. 2016. Vol. 29. 2 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/shsconf/20162902019>
9. **Grigorev S. N., Eleneva Yu. Ya., Andreev V. N.** Technological capital: a criterion of innovative development and an object of transfer in the modern economy // Procedia CIRP. 2014. Vol. 20. P. 56–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.144>
10. Quality of enterprise management during Ramp-up preparation and launch: concept and evaluation method / Yu. Ya. Yeleneva [et al.] // Procedia CIRP. 2016. Vol. 51. P. 13–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.015>
11. Analysis and organizational model for monitoring of the training of workers and specialists with secondary vocational education for innovation-oriented enterprises of Russia / Yu. Yeleneva [et al.] // Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2015. Vol. 214. P. 779–787. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.11.717>
12. Knowledge management and competency development based on personal e-portfolio / B. Pozdneeve [et al.] // ICERI2017 Proceedings. 2017. P. 3928–3937. DOI: <https://doi.org/10.21125/iceri.2017.1050>
13. Combining hands-on and virtual experiments in computer networking courses / B. Pozdneeve [et al.] // ICERI2017 Proceedings, 2017. P. 3956–3961. DOI: <https://doi.org/10.21125/iceri.2017.1054>
14. **Levinthal D. A.** Adaptation on rugged landscapes // Management Science. 1997. Vol. 43, no. 7. P. 934–950. DOI: <https://doi.org/10.1287/mnsc.43.7.934>

Поступила 26.02.2018, принята к публикации 02.04.2018, опубликована онлайн 20.09.2018

Об авторах:

Харин Александр Александрович, профессор кафедры экономики и управления предприятием, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»» (127994, Россия, г. Москва, Вадковский пер., д. 1), доктор экономических наук, Researcher ID: C-6286-2015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6433-868X>, aah@live.ru



Харина Ольга Сергеевна, инженер, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»» (127994, Россия, г. Москва, Вадковский пер., д. 1), кандидат экономических наук, Researcher ID: O-6418-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3089-2666>, aah@live.ru

Родюков Александр Витальевич, доцент кафедры корпоративных информационных систем, ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (государственный университет)» (141701, Россия, г. Москва, ул. Керченская, д. 1А, корп. 1), кандидат физико-химических наук, Researcher ID: B-8197-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8815-1791>, alexander.rodyukov@gmail.com

Петрова Елена Сергеевна, доцент кафедры статистики, эконометрики и информационных технологий в управлении, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский государственный университет им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), кандидат экономических наук, Researcher ID: D-2096-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6300-0740>, elspetrova@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. А. Харин – формулировка и постановка задачи, введение, заключение; О. С. Харина – подготовка данных, обзор литературы по зарубежным источникам; А. В. Родюков – подготовка данных, построение ландшафта взаимодействующих организаций, обзор литературы по зарубежным источникам; Е. С. Петрова – подготовка данных, осуществление расчетов и анализ стратегий, обзор литературы по зарубежным источникам.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Устойчивость относительно части переменных при постоянно действующих возмущениях «частичного» положения равновесия нелинейных систем дифференциальных уравнений

П. П. Липасов, В. Н. Щенников

ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)

*pashka0113@yandex.ru

Введение. В процессе математического моделирования динамических процессов не удастся учесть все действующие в них силы. Чтобы математическая модель наиболее точно описывала динамические процессы, в них включают слагаемые, соответствующие постоянно действующим возмущениям. Подобные меры необходимы, например, при решении прикладных задач. В данной статье рассматривается случай, когда система допускает «частичное» положение равновесия. Целью работы является доказательство теоремы об устойчивости «частичного» положения равновесия при постоянно действующих возмущениях, малых в каждый момент времени. **Материалы и методы.** Объектами исследования являются нелинейные системы дифференциальных уравнений, допускающие «частичное» положение равновесия. Теоремы об устойчивости при постоянно действующих возмущениях «частичного» положения равновесия, малых в каждый момент времени, доказываются с использованием второго метода Ляпунова.

Результаты исследования. С введением устойчивости относительно части переменных появилась потребность введения устойчивости при постоянно действующих возмущениях относительно части фазовых переменных. Первые теоремы об устойчивости при постоянно действующих возмущениях относительно части фазовых переменных были получены А. С. Озиранером. Следует отметить, что в настоящее время не сформулировано теорем об устойчивости при постоянно действующих возмущениях «частичного» положения равновесия, что свидетельствует об актуальности данной статьи.

Обсуждение и заключения. Доказанная в работе теорема 3 является развитием математической теории устойчивости. Полученные результаты применимы в механике управляемого движения.

Ключевые слова: постоянно действующее возмущение, устойчивость при постоянно действующих возмущениях, «частичное» положение равновесия, дифференциальное уравнение, нелинейная система

Для цитирования: Липасов П. П., Щенников В. Н. Устойчивость относительно части переменных при постоянно действующих возмущениях «частичного» положения равновесия нелинейных систем дифференциальных уравнений // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 344–351. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.344-351>

© Липасов П. П., Щенников В. Н., 2018



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.



Stability with Respect to a Part of Variables under Constant Perturbations of the Partial Equilibrium Position of Differential Equation Nonlinear Systems

P. P. Lipasov*, V. N. Shchennikov

National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

*pashka0113@yandex.ru

Introduction. It is impossible to take into account all the forces acting in the process of mathematical modeling of dynamic processes. In order that mathematical models the most accurately describe the dynamic processes, they must include the terms that correspond the constant perturbations. These problems arise in applied tasks. In this paper we consider the case when the system allows for the partial equilibrium position. The aim of this work is to prove the stability theorem for the partial equilibrium position at constant perturbations, which are small at every instant.

Materials and Methods. The research objects are nonlinear systems of differential equations that allow for a partial equilibrium position. Using the second Lyapunov method, there are proved the stability theorems for the constant perturbations of the partial equilibrium position, which are small at every instant.

Results. Together with the introduction of stability for a part of the variables, it has become necessary to introduce stability for the part of phase variables under constant perturbations. The first stability theorem of the part of phase variables under constant perturbations was obtained by A. S. Oziraner. In this work, we prove a theorem of the stability of the constant perturbations of the partial equilibrium position, small at every instant. It should be noted that there is no stability theorems of constant perturbations for the partial equilibrium position. Thus, the theorem proved in this work is of a pioneer nature.

Conclusions. The theorem 3 proved in the work is the development of the mathematical theory of stability. The results of this work are applicable in the mechanics of controlled motion, nonlinear system.

Keywords: constantly acting disturbances, stability at constantly acting disturbances, partial equilibrium position, differential equation

For citation: Lipasov P. P., Shchennikov V. N. Stability with Respect to a Part of Variables under Constant Perturbations of the Partial Equilibrium Position of Differential Equation Nonlinear Systems. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):344–351. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.344-351>

Введение

Во многих прикладных задачах присутствуют постоянно действующие возмущения. При этом часто известны только их наибольшее и наименьшее значения. Отметим, что задача об устойчивости при постоянно действующих возмущениях является классической задачей общей теории устойчивости. Ее решением занимались многие ученые (Г. Н. Дубошин [1], И. Г. Малкин [2], В. И. Зу-

бов¹, Н. Н. Красовский [3], А. А. Тихонов [4], С. И. Горшин [5], А. Струсс и А. Дж. Йорк [6], К. Кордуняну [7] и др.). Во всех указанных работах используются методы теории устойчивости Ляпунова.

В данной работе продолжают исследования устойчивости при постоянно действующих возмущениях. В отличие от ранее рассматриваемых систем дифференциальных уравнений, нами изучаются системы дифференци-

¹ Зубов В. И. [Математические методы исследования систем автоматического регулирования](#). – 2-е изд. Л.: Машиностроение, 1974. 336 с.

альных уравнений, допускающих «частичное» положение равновесия (см., например, работы [8–9]). Известно, что в настоящее время не сформулировано теорем об устойчивости «частичного» положения равновесия при постоянно действующих возмущениях, что свидетельствует об актуальности данной статьи.

Обзор литературы

Задача об устойчивости при постоянно действующих возмущениях является классической задачей теории устойчивости^{2–3}.

В настоящей статье исследуется вопрос устойчивости «частичного» положения равновесия нелинейных систем, доказываются теорема об устойчивости при постоянно действующих возмущениях, малых в каждый момент времени.

Достаточно полный обзор устойчивости при постоянно действующих возмущениях относительно всех фазовых переменных содержится в монографии⁴, а также, кроме отмеченных, в работах Р. Габасова [10], В. Е. Гермаидзе и Н. Н. Красовского [11], С. И. Горшина [12]. С введением устойчивости относительно части фазовых переменных появилась потребность в определении устойчивости при постоянно действующих возмущениях и доказательства соответствующих теорем. Первые теоремы об устойчивости при постоянно действующих возмущениях относительно части фазовых переменных были доказаны А. С. Озиранером⁵.

Следует отдельно упомянуть работу А. Я. Савченко [13], в которой до-

казана теорема об устойчивости при постоянно действующих возмущениях в предположении, что исходная система устойчива.

Материалы и методы

Для получения новых результатов по рассматриваемой тематике были использованы известные результаты теорем об устойчивости положения равновесия нелинейных систем при постоянно действующих возмущениях И. Г. Малкина⁶ и В. И. Зубова⁷. Следует отметить, что достаточно полный обзор по указанной тематике содержится в книге А. А. Мартынюка⁸.

Результаты исследования

С целью получения новых результатов приведем известную теорему об устойчивости положения равновесия нелинейной системы дифференциальных уравнений при постоянно действующих возмущениях.

Для этого рассмотрим нелинейную систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = f(t, x), f(t, 0) \equiv 0, \quad (1)$$

где

$$x \in R^n, f(t, x) = (f_1(t, x), \dots, f_n(t, x))^T.$$

Предположим, что правые части системы (1) определены в области

$$\Omega = \{t, x : t \geq t_0 \geq 0, x \in H, 0 < H = \text{const}\} \quad (2)$$

непрерывными по совокупности переменных и допускают единственность решения задачи Коши при начальных данных из области (2). Здесь и далее:

² Малкин И. Г. *Теория устойчивости движения*. М. : Наука, 1966. 530 с.

³ Зубов В. И. *Математические методы исследования систем автоматического регулирования*. – 2-е изд. Л. : Машиностроение, 1974. 336 с.

⁴ Мартынюк А. А., Гутowski Р. *Интегральные неравенства и устойчивость движения*. Киев : Наукова думка, 1979. 270 с.

⁵ Румянцев В. В., Озиранер А. С. *Устойчивость и стабилизация движения по отношению к части переменных*. М. : Наука, 1987. 256 с.

⁶ Малкин И. Г. *Теория устойчивости движения*. М. : Наука, 1966. 530 с.

⁷ Зубов В. И. *Математические методы исследования систем автоматического регулирования*. – 2-е изд. Л. : Машиностроение, 1974. 336 с.

⁸ Мартынюк А. А., Гутowski Р. *Интегральные неравенства и устойчивость движения*. Киев : Наукова думка, 1979. 270 с.



норма вектора – евклидова, верхний индекс T означает транспонирование.

Кроме системы (1), будем рассматривать также систему

$$\frac{d\tilde{x}}{dt} = f(t, \tilde{x}) + R(t, \tilde{x}), R(t, 0) \neq 0, (3)$$

где векторные функции $R(t, \tilde{x})$ являются постоянно действующими возмущениями. Постоянно действующие возмущения будем считать заданными в области (2) и удовлетворяющими тем же условиям, что и $f(t, x)$.

При постоянно действующих возмущениях $R(t, \tilde{x})$ точно неизвестны⁹. Как уже отмечено, $R(t, 0) \neq 0$. Будем считать их достаточно малыми, т. е. $\|R(t, x)\| \leq \gamma$, где $\gamma > 0$ является достаточно малой величиной.

Определение 1

Нулевое решение $x = 0$ системы (1) называется устойчивым при постоянно действующих возмущениях, если для произвольного $\varepsilon > 0$, $\varepsilon < H$ существуют числа $\gamma > 0$ и $\delta > 0$ такие, что при $\|R(t, \tilde{x})\| \leq \gamma$ для любых начальных данных $\|x_0\| < \delta$ выполняется неравенство $\|\tilde{x}(t, t_0, x_0)\| < \varepsilon$ при $t \geq t_0 \geq 0$. Здесь $\tilde{x}(t, t_0, x_0)$ – произвольное решение системы (3), $(t_0, \tilde{x}_0) \in \Omega$; величина $\varepsilon > 0$ может быть сколь угодно малой¹⁰.

Теорема 1

Пусть для системы (1) существует определенно-положительная функция $V(t, x)$, допускающая бесконечно малый высший предел, полная производная которой по времени t вдоль решений системы (1) есть определенно-отрицательная функция, и если в области (2) $\left\| \frac{\partial V}{\partial x} \right\| \leq N$, $0 < N = \text{const}$, то нулевое решение системы (1) является

устойчивым при постоянно действующих возмущениях, малых в каждый момент времени.

Данная теорема с доказательством содержится в монографиях И. Г. Малкина и В. И. Зубова^{11–12}.

Приведем далее определение устойчивости положения равновесия $x = 0$ системы (1) при постоянно действующих возмущениях относительно части фазовых переменных.

Введем обозначение $x = (y^T, z^T)^T$. Здесь $y = (x_1, \dots, x_k)^T$, $z = (x_{k+1}, \dots, x_n)^T$.

Определение 2

Нулевое решение системы (1) $x = 0$ у-устойчиво¹³ при постоянно действующих возмущениях, малых в каждый момент времени, если для любого $\varepsilon > 0$, $\varepsilon < H$ существуют $\delta > 0$ и $\gamma > 0$ такие, что всякое решение $\tilde{x}(t, t_0, \tilde{x}_0)$ и $\|\tilde{x}_0\| < \delta$ системы (3) удовлетворяет неравенству $\|\tilde{x}(t, t_0, \tilde{x}_0)\| < \varepsilon$ при любом $t \geq t_0$ и достаточно малом $\gamma > 0$, где $R(t, \tilde{x}) < \gamma$.

В этом определении речь идет об устойчивости при постоянно действующих возмущениях относительно переменных $y_1, \dots, y_k$.

Теорема 2

Пусть для системы (1) существует функция $V(t, x)$, удовлетворяющая условиям¹⁴:

$$a(\|y\|) \leq V(t, x) \leq b(\|x\|),$$

$$\left. \frac{dV(t, x)}{dt} \right|_{(1)} \leq -c(\|x\|),$$

где $a(\|y\|)$, $b(\|x\|)$ и $c(\|x\|)$ – непрерывные положительные возрастающие функции, причем $a(\|y\|) \rightarrow \infty$ при $\|y\| \rightarrow \infty$.

⁹ Малкин И. Г. *Теория устойчивости движения*. М.: Наука, 1966. 530 с.

¹⁰ Зубов В. И. *Математические методы исследования систем автоматического регулирования*. – 2-е изд. Л.: Машиностроение, 1974. С. 176–177.

¹¹ Малкин И. Г. *Теория устойчивости движения*. М.: Наука, 1966. С. 302.

¹² Зубов В. И. *Математические методы исследования систем автоматического регулирования*. – 2-е изд. Л.: Машиностроение, 1974. С. 176–177.

¹³ Румянцев В. В., Озиранер А. С. *Устойчивость и стабилизация движения по отношению к части переменных*. М.: Наука, 1987. С. 193.

¹⁴ Там же.

Предположим далее, что система (1) представима в виде

$$\frac{dy}{dt} = f_1(t, y), \quad (4_1)$$

$$\frac{dz}{dt} = f_2(t, y, z), \quad (4_2)$$

а система (3) в виде

$$\frac{d\tilde{y}}{dt} = f_1(t, \tilde{y}) + r_1(t, \tilde{y}, \tilde{z}), \quad (5_1)$$

$$\frac{d\tilde{z}}{dt} = f_2(t, \tilde{y}, \tilde{z}) + r_2(t, \tilde{y}, \tilde{z}), \quad (5_2)$$

Будем считать, что

$$f_1(t, 0) = 0, \quad r_1(t, 0, \tilde{z}) \neq 0,$$

$$r_1(t, \tilde{y}, \tilde{z}) \leq \tilde{\gamma}, \quad 0 < \tilde{\gamma} = \text{const}.$$

Введем обозначение

$$y = \left(y^{(1)T}, y^{(2)T} \right)^T,$$

$$y^{(1)} = (y_1, \dots, y_l), \quad y^{(2)} = (y_{l+1}, \dots, y_k).$$

Областью определения систем (4₁–4₂; 5₁–5₂) примем

$$\Omega_1 = \{t, y^{(1)}, y^{(2)}, z : t \geq t_0 \geq 0,$$

$$\|y^{(1)}\| \leq H, \|y^{(2)}\| < \infty, \|z\| < \infty\}.$$

При этом также предполагается, что в области Ω_1 правые части систем (4₁–4₂; 5₁–5₂) непрерывны и удовлетворяют условиям единственности решений задач Коши.

Далее в системе (4₁–4₂) будем считать, что $y = 0$ является «частичным» положением равновесия, т. е. $(0^T, z^T)^T$ – «частичное» положение равновесия системы (4₁–4₂) с наблюдаемой (контролируемой) частью начальных условий $y^{(1)}(t_0) = (y_1(t_0), \dots, y_l(t_0))^T$.

Докажем теорему об устойчивости при постоянно действующих возмущениях относительно части фазовых переменных $y^{(1)} = (y_1, \dots, y_l)^T$ или, короче, об $y^{(1)}$ -устойчивости при постоян-

но действующих возмущениях, малых в каждый момент времени, с наблюдаемой (контролируемой) частью начальных условий фазовых переменных $y^{(1)}(t_0) = (y_1(t_0), \dots, y_l(t_0))^T$.

Теорема 3

Предположим, что для системы (4₁–4₂) существует функция $v(t, y)$, удовлетворяющая условиям:

$$\bar{a}(\|y^{(1)}\|) \leq v(t, y) \leq \bar{b}(\|y^{(1)}\|), \quad (6)$$

$$\left. \frac{dv(t, y)}{dt} \right|_{(4_1)} \leq -\bar{c}(\|y^{(1)}\|), \quad (7)$$

$$\left\| \frac{\partial v}{\partial y} \right\| \leq \bar{N}, \quad 0 < \bar{N} < \infty, \quad (8)$$

где $\bar{a}(\|y^{(1)}\|)$, $\bar{b}(\|y^{(1)}\|)$ и $\bar{c}(\|y^{(1)}\|)$ – непрерывные положительные возрастающие функции, причем $\bar{a}(\|y^{(1)}\|) \rightarrow \infty$ при $\|y^{(1)}\| \rightarrow \infty$. Тогда нулевое решение систем (4₁–4₂) является $y^{(1)}$ -устойчивым при постоянно действующих возмущениях, малых в каждый момент времени, с наблюдаемой частью начальных условий $y_0^{(1)} = (y_1(t_0), \dots, y_l(t_0))$.

Доказательство

Найдем полную производную от функции $v(t, y)$ по времени t на решениях системы (5₁). В результате получим:

$$\left. \frac{dv}{dt} \right|_{(5_1)} = \left. \frac{dv}{dt} \right|_{(4_1)} + \left(\frac{\partial v}{\partial y}, r_1(t, \tilde{y}, \tilde{z}) \right). \quad (9)$$

С учетом оценки (8) из равенства (9) получим дифференциальное неравенство

$$\left. \frac{dv}{dt} \right|_{(5_1)} \leq -K^2 + N\gamma.$$

Выберем γ таким, чтобы выполнялось неравенство

$$\left. \frac{dv}{dt} \right|_{(5_1)} \leq -K_1, \quad K_1 > 0, \quad K_1 = -K^2 + N\gamma \quad (10)$$

при $\|y^{(1)}\| \leq H, \|y^{(2)}\| < \infty, \|z\| < \infty$ и достаточно малом $\gamma > 0$. Выберем также про-



извольное положительное число $\varepsilon > 0$, $\varepsilon \leq H$. При этом допустим, что $\varepsilon > 0$ может быть и достаточно малым. Возьмем далее произвольное решение $\tilde{y}(t, t_0, \tilde{y}_0)$ системы (5), с $\|\tilde{y}_0\| < \delta(\varepsilon)$. Здесь $\delta(\varepsilon) > 0$ не зависит от t_0 , т. к. существуют неравенства (6). Если функция $v(t, \tilde{y}^{(1)})$ является непрерывной и $v(t, 0) = 0$, то найдется $\delta(\varepsilon) > 0$ такое, что $v(t_0, \tilde{y}_0) < a(\varepsilon)$. Покажем справедливость неравенства $v(t, \tilde{y}(t, t_0, \tilde{y}_0)) < a(\varepsilon)$ при $t \geq t_0$. Допустим, что при $t = t_1$ справедливо $v(t, \tilde{y}(t, t_0, \tilde{y}_0)) = a(\varepsilon)$. Однако тогда в силу (10) получим $v(t, \tilde{y}(t, t_0, \tilde{y}_0)) < 0$, $v(t_1, \tilde{y}(t_1, t_0, \tilde{y}_0)) = a(\varepsilon)$, что противоречит условию (10). Таким образом, $a(\|\tilde{y}^{(1)}\|) \leq v(t, \tilde{y}(t, t_0, \tilde{y}_0)) < a(\varepsilon)$. В силу того, что функция $a(\|\tilde{y}^{(1)}\|)$ является непрерывной и возрастающей и, кроме того, $a(\|\tilde{y}^{(1)}\|) \rightarrow \infty$ при $\|\tilde{y}^{(1)}\| \rightarrow \infty$, то для нее существует обратная функция. Следовательно, справедливо неравенство $\|\tilde{y}^{(1)}(t, t_0, \tilde{y}_0)\| < \varepsilon$ при $t \geq t_0$ и достаточно малых $\delta(\varepsilon) > 0$ и $\gamma > 0$.

Доказательство завершено.

Примечание. Доказательство теоремы 3 проведено по алгоритму доказательств теорем 1–2, т. е. по алгоритму доказательства теорем И. Г. Малкина,

В. И. Зубова и А. С. Озиранера: 1) определяется область, в которой $\left. \frac{dv}{dt} \right|_{(5_1)} < 0$ на решениях системы (3); 2) с учетом того, что функция $v(t, y^{(1)})$ является определенно-положительной, допускает бесконечно малый высший предел, и, кроме того, $\left. \frac{dv}{dt} \right|_{(5_1)} < 0$, проверяется условие $\|y^{(1)}(t, t_0, y_0)\| < \varepsilon$ при $t \geq t_0$ и достаточно малых $\delta(\varepsilon) > 0$ и $\gamma > 0$. Если условия 1) и 2) выполняются, то это и означает $y^{(1)}$ -устойчивость «частичного» положения равновесия $y = 0$ системы (4₁–4₂) при постоянно действующих возмущениях, малых в каждый момент времени.

Обсуждение и заключения

Полученные в данной работе результаты являются развитием теории устойчивости по части фазовых переменных. Достоинством результата является то, что доказанная теорема уникальна, поскольку теорем об устойчивости при постоянно действующих возмущениях «частичного» положения равновесия до сих пор не сформулировано. Доказательство теоремы было проведено по алгоритму доказательства теорем И. Г. Малкина, В. И. Зубова и А. С. Озиранера.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дубошин Г. Н. К вопросу об устойчивости движения относительно постоянно действующих возмущений // Тр. Гос. астроном. ин-та им. Штернберга. 1940. № 114. С. 156–164.
2. Малкин И. Г. Об устойчивости при постоянно действующих возмущениях // Прикладная математика и механика. 1944. Т. VIII, № 3. С. 241–245.
3. Красовский Н. Н. Об устойчивости движения в целом при постоянно действующих возмущениях // Прикладная математика и механика. 1954. № 18. С. 95–102.
4. Тихонов А. А. Об устойчивости движения при постоянно действующих возмущениях // Вестник Ленинградского университета. 1965. № 1. С. 95–101.
5. Горшин С. И. Второй метод Ляпунова и применение к устойчивости при постоянно действующих возмущениях // Второй метод Ляпунова и его применение в энергетике : тр. семинара-симпозиума. 1956. Ч. 1. С. 5–34.
6. Strauss A., Yorke A. J. Identifying perturbations which preserved asymptotic stability // Bull. Amer. Math. Soc. 1969. Vol. 22, № 2. P. 513–518.
7. Corduneanu C. Sur la stabilite partielle // Rev. Roumaine math. Pures. Appl. 1964. Vol. 9, № 3. P. 229–236. URL: <https://zbmath.org/?q=an:0134.07104>

8. **Воротников В. И.** Два класса задач частичной устойчивости: к унификации понятий и единым условиям разрешимости // Доклады РАН. 2002. Т. 384, № 1. С. 47–51.
9. **Воротников В. И.** Об устойчивости и устойчивости по части переменных частных положений равновесия нелинейных динамических систем // Доклады РАН. 2003. Т. 389, № 3. С. 332–337.
10. **Габасов Р.** Об устойчивости решения дифференциально-операторных уравнений при постоянно действующих возмущениях // Известия вузов. Математика. 1962. Т. 30, № 5. С. 29–38. URL: <http://www.mathnet.ru/links/f63cae17d524fd7cd7a5597ffa6bcb68/ivm2096.pdf>
11. **Гермаидзе В. Е., Красовский Н. Н.** Об устойчивости при постоянно действующих возмущениях // Прикладная математика и механика. 1957. Т. 21, вып. 6. С. 769–775.
12. **Горшин С. И.** О некоторых критериях устойчивости при постоянно действующих возмущениях. Известия вузов. Математика. 1967. № 11. С. 17–20. URL: http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=ivm&paperid=3231&option_lang=rus
13. **Савченко А. Я.** Об устойчивости движений консервативных механических систем при постоянно действующих возмущениях. Прикладная математика и механика. 1974. Т. 38, № 2. С. 240–245.

Поступила 18.04.2018; принята к публикации 07.06.2018; опубликована онлайн 20.09.2018

Об авторах:

Липасов Павел Петрович, магистр кафедры фундаментальной информатики и информационных технологий, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68/1), Researcher ID: N-7266-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9524-7353>, pashka0113@yandex.ru

Щенников Владимир Николаевич, профессор кафедры прикладной математики, дифференциальных уравнений и теоретической механики, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68/1), доктор физико-математических наук, Researcher ID: Q-3912-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5230-3482>, du@math.mrsu.ru

Заявленный вклад соавторов:

П. П. Липасов – доказательство теоремы; В. Н. Щенников – постановка задачи, определение методов исследования.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Duboshin G. N. [On the question of the stability of the motion of relatively constant perturbations]. *Tr. Gos. astronom. in-ta im. Shternberga* = Proceedings of Shternberg State Astronomical Institute. 1940; 114:156–164 (In Russ.)
2. Malkin I. G. [On stability under constantly acting perturbations]. *Prikladnaya matematika i mekhanika* = Applied Mathematics and Mechanics. 1944; VIII(3):241–245 (In Russ.)
3. Krasovskiy N. N. [On the stability of motion as a whole with constantly acting perturbations]. *Prikladnaya matematika i mekhanika* = Applied Mathematics and Mechanics. 1954; 18:95–102 (In Russ.)
4. Tikhonov A. A. [On the stability of motion under constantly acting perturbations]. *Vestnik Leningradskogo universiteta* = Leningrad University Bulletin. 1965; 1:95–101 (In Russ.)
5. Gorshin S. I. [The second Lyapunov method and application to stability under constantly acting perturbations]. *Vtoroy metod Lyapunova i yego primeneniye v energetike; tr. seminara-simpoziuma* = The second Lyapunov method and its application in power engineering: Proceedings of symposium seminar. 1956; 1:5–34 (In Russ.)



6. Strauss A., Yorke A. J. Identifying perturbations which preserved asymptotic stability. *Bull. Amer. Math. Soc.* 1969; 22(2):513–518.
7. Corduneanu C. Sur la stabilité partielle. *Rev. Roumaine math. Pures. Appl.* 1964; 9(3):229–236. URL: <https://zbmath.org/?q=an:0134.07104>
8. Vorotnikov V. I. [Two classes of partial stability problems: to the unification of concepts and to unified solvability conditions]. *Doklady RAN* = Reports of RAS. 2002; 384(1):47–51 (In Russ.)
9. Vorotnikov V. I. [On stability and stability with respect to part of variable partial equilibrium positions of nonlinear dynamical systems]. *Doklady RAN* = Reports of RAS. 2003; 389(3):332–337.
10. Gabasov R. [On the stability of the solution of differential-operator equations under constantly acting perturbations]. *Izvestiya vuzov. Matematika* = Proceedings of Higher Schools. Mathematics. 1962; 30(5):29–38. Available at: <http://www.mathnet.ru/links/f63cae17d524fd7cd7a5597ffa6bcb68/ivm2096.pdf> (In Russ.)
11. Germaidze V. Ye., Krasovskiy N. N. [On stability under constantly acting perturbations]. *Prikladnaya matematika i mekhanika* = Applied Mathematics and Mechanics. 1957; 21(6):769–775 (In Russ.)
12. Gorshin S. I. [On some stability criteria for constantly acting perturbations]. *Izvestiya vuzov. Matematika* = Proceedings of Higher Schools. 1967; 11:17–20. Available at: http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=ivm&paperid=3231&option_lang=rus (In Russ.)
13. Savchenko A. Ya. [On the stability of the motions of conservative mechanical systems under constantly acting perturbations]. *Prikladnaya matematika i mekhanika* = Applied Mathematics and Mechanics. 1974; 38(2):240–245 (In Russ.)

Received 18.04.2018; revised 07.06.2018; published online 20.09.2018

About authors:

Pavel P. Lipasov, Master Degree Student, Chair of Fundamental Informatics and Information Technologies, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Researcher ID: N-7266-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9524-7353>, pashka0113@yandex.ru

Vladimir N. Shchennikov, Professor, Chair of Applied Mathematics, Differential Equations and Theoretical Mechanics, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), D. Sc. (Physics and Mathematics), Researcher ID: Q-3912-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5230-3482>, du@math.mrsu.ru

Authors' contribution:

P. P. Lipasov – proof of theorem; V. N. Shchennikov – introduction of the research task, the definition of research methods.

All authors have read and approved the final version of the paper.



Повышение эффективности процесса интерпретации данных дистанционного зондирования Земли за счет анализа дескрипторов окрестности

С. А. Ямашкин*, А. А. Ямашкин
ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)

*yamashkinsa@mail.ru

Введение. В оценке пространственно-временной структуры земной поверхности большую значимость приобретают данные дистанционного зондирования Земли. Повышение эффективности инструментов анализа космической съемки возможно через изучение проблемы получения комплексной пространственно-временной характеристики состояния земель. Целью исследования является повышение точности автоматизированного анализа данных дистанционного зондирования Земли за счет учета инвариантных и динамических дескрипторов окрестности.

Материалы и методы. С целью повышения точности классификации данных дистанционного зондирования Земли проводился расчет комплексных пространственно-временных характеристик состояния земель на основе системного анализа данных, характеризующих динамические и инвариантные состояния территории, окружающей геофизический участок. Формализация данного процесса, приведенная в статье, включает методики расчета набора численных дескрипторов окрестности: локальной энтропии, локального диапазона, среднеквадратического отклонения, цветового момента, гистограммы оттенков, кортежа цветов. Описана методика расчета комплексного дескриптора на основе вектора Фишера. Для апробации решения составлен план эксперимента и проведена выборка исходных данных.

Результаты исследования. Апробация методики и созданного на ее основе алгоритма, реализованного в виде комплекса программ, на системе тестовых полигонов показала варьирование точности классификации в диапазоне 81–89 % (без учета дескрипторов окрестности) и 91–97 % (с учетом дескрипторов). Значительное увеличение радиуса анализируемой окрестности приводит к снижению точности классификации.

Обсуждение и заключения. Разработанный комплекс программ позволяет оперативно проводить моделирование пространственных систем с целью тематического картографирования землепользования и анализа развития чрезвычайных ситуаций, а созданная методика анализа земель с учетом дескрипторов окрестности дает возможность повысить точность классификации.

Ключевые слова: дешифрирование космических снимков, дистанционное зондирование Земли, анализ земель, дескриптор окрестности, инвариантные свойства, динамические свойства

Для цитирования: Ямашкин С. А., Ямашкин А. А. Повышение эффективности процесса интерпретации данных дистанционного зондирования Земли за счет анализа дескрипторов окрестности // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 352–365. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.352-365>

© Ямашкин С. А., Ямашкин А. А., 2018



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.



Improving the Efficiency of Remote Sensing Data Interpretation by Analyzing Neighborhood Descriptors

S. A. Yamashkin*, A. A. Yamashkin

National Research Mordovia State University, Saransk, Russia

*yamashkinsa@mail.ru

Introduction. In evaluating the space-time structure of the Earth's surface, the data of remote sensing of the Earth become more important. Increasing the effectiveness of space survey analysis tools is possible through studying the problem of obtaining an integrated space-time characterization of the state of lands. The purpose of this study is to improve the accuracy of the automated analysis of remote sensing data by taking into account the invariant and dynamic descriptors of the vicinity.

Materials and Methods. In order to improve the accuracy of the remote sensing data classification, a computation of complex space-time characteristics of the state of the lands was conducted based on the system analysis of data characterizing the dynamic and invariant states of the territory surrounding the geophysical site. The formalization of this process includes methods for calculating a set of numerical descriptors of the neighborhood: local entropy, local range, standard deviation, color moment, histogram of hues, and color cortege. A technique for calculating a complex descriptor based on the Fisher vector is described. To approbate the solution, a plan for the experiment was drawn up and a sample of the initial data was sampled.

Results. The approbation of the methodology and the algorithm developed on its basis, implemented as a set of programs, on the test polygon system showed a variation in the classification accuracy in the range of 81–89% (without regard to the neighborhood), and taking into account the neighborhood, it increases to 91–97%. It is revealed that a significant increase in the radius of the analyzed neighborhood leads to a decrease in the classification accuracy.

Conclusions. The application of the developed set of programs allows for the rapid implementation of modeling of spatial systems for the purpose of thematic mapping of land use and analyzing the development of emergency situations. The developed methodology for analyzing lands with regard to the descriptors of the neighborhood makes it possible to improve the accuracy of classification.

Keywords: interpretation of space images, remote sensing, land analysis, neighborhood descriptors, invariant property, dynamic property

For citation: Yamashkin S. A., Yamashkin A. A. Improving the Efficiency of Remote Sensing Data Interpretation by Analyzing Neighborhood Descriptors. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):352–365. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.352-365>

Введение

Эффективное производственное и экономическое планирование, основанное на релевантной информации о качественных и количественных свойствах природных и антропогенных систем, способствует минимизации издержек хозяйственной деятельности от различных факторов. Выделение на картах и космических снимках относительно однородных по географическим, физическим и химическим свойствам участков земной по-

верхности позволяет не только оценить состояние территории, но и предсказать ее устойчивость к различным нагрузкам, а также спрогнозировать развитие стихийных природных и техногенных ситуаций. В этом вопросе ключевую значимость имеют получаемые со спутников данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и их автоматизированный анализ с применением методов и алгоритмов классификации. В настоящее время существует большое количество методов анализа данных ДЗЗ, однако

вопрос повышения их точности, быстродействия и эффективности по-прежнему актуален ввиду специфики решаемой задачи. Главным направлением в решении данного вопроса является критическое исследование проблемы получения комплексных пространственно-временных характеристик состояния земель и развития стихийных процессов. При этом следует опираться на системный анализ массивов данных, которые в полной мере характеризуют инвариантные и динамические состояния территории, окружающей геофизический участок. Такая необходимость объясняется тем, что анализ свойств окрестности так же важен для определения класса территории, как и спектральные характеристики.

Целью исследования является повышение эффективности анализа материалов космической съемки для решения задачи мониторинга состояния земель и прогнозирования развития стихийных процессов с помощью расчета динамических и инвариантных дескрипторов окрестности. Для достижения поставленной цели в рамках исследования, представленного в статье, решены следующие задачи:

- проведен анализ предметной области и обобщен отечественный и мировой опыт исследования структуры и состояния земель на базе материалов космической съемки;

- создана новая методика анализа земель с применением синтетических дескрипторов окрестности;

- предложенный математический аппарат апробирован на тестовых полигонах с помощью созданного для проведения эксперимента прототипа.

По результатам исследований создан программный комплекс анализа космической съемки, который является инструментом мониторинга состояния земель и прогнозирования стихийных процессов.

Обзор литературы

Инструментальное дешифрирование мульти- и гиперспектральных данных ДЗЗ в настоящее время основывается на математических и интеллектуальных алгоритмах¹ и методиках анализа сигналов данных (многомерных изображений)². Для классификации материалов космической съемки применяются методы машинного обучения³ [1] и цифровой обработки сигналов данных⁴⁻⁵. Детектирование характеристик, типов и свойств объектов осуществляется на базе выявления системных связей их структурных и спектральных свойств⁶⁻⁷, нейронных сетей⁸ (самообучающихся [2] и обучающихся с учителем⁹ [3]), статистической классификации [4], машин опорных векторов (Support Vector Machines)¹⁰ [5]. Актуальность решения задачи повышения качественных и количественных харак-

¹ Хайкин С. [Нейронные сети: полный курс](#) : пер. с англ. М. : Вильямс, 2006. 1104 с.

² Шовенгердт Р. А. [Дистанционное зондирование: модели и методы обработки изображений](#). М. : Техносфера, 2010. 560 с.

³ Duda R. O., Hart P. E., Stork D. G. [Pattern classification](#). – 2nd ed. New York : Wiley. 2001. 738 p.

⁴ Landgrebe D. A. [Signal theory methods in multispectral remote sensing](#). New York : Wiley, 2003. 508 p.

⁵ Woodcock C. E., Strahler A. H., Smith J. A. [On the nature of models in remote sensing](#) // Remote sensing of environment. 1986. Vol. 20, no. 2. P. 121–139.

⁶ Апанасевич П. А. [Основы теории взаимодействия света с веществом](#). Минск : Наука и техника, 1977. 496 с.

⁷ Степанов Б. И. [Введение в современную оптику : фотометрия : о возможном и невозможном в оптике](#). Минск : Наука и техника, 1989. 254 с.

⁸ Галушкин А. И. [Нейронные сети: основы теории](#). М. : Горячая линия-Телеком, 2012. 496 с.

⁹ Rumelhart D. E., Hinton G. E., McClelland J. L. [A general framework for parallel distributed processing : parallel distributed processing](#). 1986. 235 p.

¹⁰ Vapnik V. N. [The nature of statistical learning theory](#). Springer, 1995. 508 p.



теристик распознавания и дешифрирования материалов космической съемки для решения научных и практических задач в сфере оптимизации землепользования определяет актуальность поиска новых методов получения информации, а также повышения эффективности существующих. Результаты анализа отечественного и зарубежного опыта в области распознавания образов свидетельствуют о перспективности исследований и экспериментов в области концепции обучения ансамблей (Ensemble Learning, гибридного обучения) [6–8] в сочетании с расчетом контекстной синтетической информации (различных текстурных дескрипторов территорий).

Анализ земель на основе космической съемки Земли ориентирован на детектирование системных связей, которые существуют между физическими, химическими и биологическими свойствами территории и полем ее излучения в различных диапазонах (поверхности по-разному отражают и излучают электромагнитные волны). При этом зависимость спектральной яркости от длины волны представляет собой важнейшую характеристику свойств исследуемой территории. Системный анализ данной зависимости может предоставить информацию не только о типе территории (растительность, водные объекты, почвы, материнская порода), но и о ее свойствах (биологическом разнообразии, плодородии, чистоте водоемов).

Доступные на свободной и коммерческой основе мульти- и гиперспектральные космические снимки дают возможность проводить результативные исследования оптических свойств земель в разных спектральных диапазонах (как в видимых зонах спектра, так и в ультрафиолетовых и инфракрасных). При выборе данных ДЗЗ для анализа и проведения экспериментов необходимо основываться на специфике поставленной цели и задачах,

решаемых для ее достижения. Анализ рынка космических снимков позволил выбрать для экспериментов материалы, получаемые со спутников Landsat 7-го и 8-го поколений. Их пространственное разрешение позволяет исследовать отдельные лесные кварталы, сельскохозяйственные земли, районы населенных пунктов и учитывать геопространственные композиции земель различных категорий. Спектральное разрешение данных, получаемых с этих спутников, дает информацию о свойствах геофизических оболочек в информативных видимом, ближнем и коротковолновом ИК-диапазонах. При достаточной периодичности съемки эти данные свободно распространяются через интернет-портал Геологической исследовательской службы США (USGS).

Для анализа ДЗЗ целесообразно использовать сложные программные комплексы вычислительных расчетов и моделирования. Кроме предоставления возможности эффективной работы с матрицами большого объема (Big Data Processing), программный инструментарий для исследования должен включать средства статистического и интеллектуального анализа данных, обработки изображений (сигналов данных), оценки точности, ошибочности и эффективности экспериментальных исследований. Актуальный характер имеют качественные нефункциональные требования, такие как быстродействие, надежность, отказоустойчивость, хорошая задокументированность. По этим характеристикам был выбран MATLAB – система прикладных программ для различных расчетов, сгруппированных по тематическим разделам: Neural Network, Image Processing, Statistics Toolboxes.

Материалы и методы

Для получения наиболее информативных пространственных и временных характеристик состояния пространственных объектов и земель следует опи-

ратся не только на спектральные параметры территории, как это принято в мировой практике, но и на системный анализ данных, характеризующих инвариантные и динамические свойства территории, которая окружает геофизический объект (окрестность). Под окрестностью пространственного объекта в данном исследовании мы понимаем территорию, которая расположена в пределах установленного расстояния от него^{11–12}.

Выявление инвариантных свойств земель возможно благодаря исследованию (с помощью морфометрических карт рельефа) таких характеристик земель, изменение которых происходит в течение длительного времени и является при этом необратимым^{13–14} [9–11]. Сведения о динамических особенностях земель можно извлечь из данных космической съемки благодаря автоматизированному анализу спектральных свойств территорий [12–14]. При решении задачи автоматизированного детектирования типов и свойств земель следует учитывать параметры (дескрипторы) окрестности в совокупности со спектральными свойствами. Чтобы получить ответ на вопрос, какое влияние анализ свойств окружения оказывает на результат дешифрирования, необходимо провести эксперимент. Для этого нужно формализовать созданную методику анализа земель и реализовать ее в виде комплекса программ. Приведем описание ключевых территориальных дескрипторов в математическом виде¹⁵.

Локальная энтропия окрестности. Данный дескриптор характеризует геофизическую неоднородность территории и является идентифицирующей метрикой, определяющей тип геофизического комплекса. Расчет локальной энтропии окрестности в рамках реализованного алгоритма будет производиться по формуле

$$E = \sum_{i=1}^N \frac{n_i}{S} \log \left(\frac{n_i}{S} \right),$$

где n_i – количество пикселей, входящих в окрестность объекта и обладающих определенной спектральной яркостью i ; N – радиометрическое разрешение снимка; S – площадь окрестности в пикселях.

Локальный диапазон окрестности. Величина данного дескриптора одновременно проста в вычислении и информативна, т. к. позволяет определить сосредоточенность краевых и граничных элементов в границах исследуемой территории:

$$R = \max(X) - \min(X),$$

где X – совокупность значений спектральных яркостей пикселей окрестности.

Среднеквадратическое отклонение. Данный дескриптор характеризует величину разброса значений спектральных яркостей. Географические объекты разного типа имеют уникальную пространственную структуру, которая однозначно определяется

¹¹ Ямашкин С. А. *Методическое и алгоритмическое обеспечение процесса анализа структуры земель на базе данных дистанционного зондирования* : дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2016.

¹² Ямашкин С. А. *Методическое и алгоритмическое обеспечение процесса анализа структуры земель на базе данных дистанционного зондирования* : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2016.

¹³ Получение, хранение и распространение геоданных как единый информационный процесс / С. М. Вдовин [и др.] // Природные опасности: связь науки и практики : мат-лы II Междунар. науч.-практ. конф. Саранск, 2015. С. 82–90.

¹⁴ Ямашкин С. А., Занозин В. В. Геоинформационные ресурсы как системы поддержки принятия управленческих решений // Современные проблемы географии : межвуз. сб. науч. ст. 2017. С. 31–37.

¹⁵ GIS-diagnosis of relief forms based on remote sensing data / S. A. Yamashkin [et al.] // International Scientific Conference 150th Anniversary of Jovan Cvijić's Birth. Belgrade, 2015. P. 45.



отличными друг от друга величинами среднеквадратического отклонения. Данный параметр вычисляется по следующей формуле:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2},$$

где $\bar{x}$ – среднее арифметическое спектральной яркости пространственного окружения объекта.

Определение цветовых свойств отдельных пикселей космического снимка также является важной составляющей анализа земель. Целесообразно использовать признаки, инвариантные к нежелательным изменениям цвета, таким как засвечивание или наложение тени.

Цветовой момент – дескриптор, характеризующий вероятностное распределение цветов окрестности; определяется кортежем среднего арифметического, дисперсии и коэффициента асимметрии. В совокупности они дают устойчивую и аутентичную цветовую характеристику, которая сопоставляет распределение цвета с цветовым пространством:

$$M = [\bar{I}, D, A] = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I(j), \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (I(j) - \bar{I})^2}, \sqrt[3]{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (I(j) - \bar{I})^3} \right],$$

где M – цветовой момент; N – число пикселей окрестности; $\bar{I}$ – среднее арифметическое яркостей пикселей снимка; D – дисперсия пиксельных яркостей снимка; A – коэффициент асимметрии пиксельной яркости снимка.

Гистограмма оттенков, рассчитываемых для всех окрестных пикселей, является информативным дескриптором геофизического объекта. Значение оттенка вычисляется исходя из величин яркости объекта в трех анализируемых спектральных диапазонах:

$$H = \begin{cases} 1) \text{ if } (\max(c_1, c_2, c_3) = \min(c_1, c_2, c_3)) \Rightarrow \\ \Rightarrow 0; \\ 2) \text{ if } (\max(c_1, c_2, c_3) = c_1 \text{ и } c_2 \geq c_3) \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{c_2 - c_3}{6(\max(c_1, c_2, c_3) - \min(c_1, c_2, c_3))}; \\ 3) \text{ if } (\max(c_1, c_2, c_3) = c_1 \text{ и } c_2 < c_3) \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{c_2 - c_3}{6(\max(c_1, c_2, c_3) - \min(c_1, c_2, c_3))} + 1; \\ 4) \text{ if } (\max(c_1, c_2, c_3) = c_2) \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{c_3 - c_1}{6(\max(c_1, c_2, c_3) - \min(c_1, c_2, c_3))} + \frac{1}{3}; \\ 5) \text{ if } (\max(c_1, c_2, c_3) = c_3) \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{c_1 - c_2}{6(\max(c_1, c_2, c_3) - \min(c_1, c_2, c_3))} + \frac{2}{3}. \end{cases}$$

где H – оттенок; c_i – спектральная яркость в i -м диапазоне.

Кортеж цветов – набор значений, которые описывают вероятность появления в окрестности объекта пикселей с определенной цветовой меткой; на основе отображения цветового пространства соотносятся в численный цветовой атрибут. Поскольку объекты одного типа могут характеризоваться различными оттенками, но одной и той же цветовой меткой, данный параметр характеризуется информативной фотометрической инвариантностью. Кортеж цветов заполняется следующим образом:

$$CC = [p(C_1), p(C_2), \dots, p(C_k)] = \left[\frac{N_1}{N}, \frac{N_2}{N}, \dots, \frac{N_k}{N} \right],$$

где CC – кортеж (вектор) цветов; $p(C_i)$ – вероятность нахождения пикселя i -го цвета в пределах окрестности; N_i – количество пикселей i -го цвета в окрестности; N – общее число пикселей в окрестности.

Комплексный учет свойств окрестности при классификации земель целесообразно осуществлять путем расчета вектора Фишера, который представляет собой частный случай ядра Фишера¹⁶⁻¹⁷, предназначенного для кодирования локальных особенностей сигнала в формате, подходящем для проведения эффективного и точного обучения. Вектор Фишера – это такое представление изображения, которое получено путем объединения локальных дескрипторов изображения. Именно поэтому его целесообразно использовать в качестве комплексного дескриптора изображения при классификации земель. Изображение можно представить в виде одномерного массива D -мерных векторов дескрипторов, автоматически рассчитываемых из изображения или сигнала:

$$I = [x_1, \dots, x_N],$$

где I – изображение (сигнал); x_i – i -й дескриптор.

При $G = [a_j, \mu_j, \sigma_j; j = \overline{1, J}]$ – параметрах смеси гауссовых распределений (a априорная вероятность, μ математическое ожидание, σ среднеквадратическое отклонение), сформированной на базе распределения дескрипторов, каждый вектор x_i сопоставляется с модой j с силой, заданной апостериорной вероятностью:

$$\rho_{ij} = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2} \frac{1}{\sigma_j} (x_i - \mu_j)^2\right)}{\sum_{i=1}^J \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{1}{\sigma_j} (x_i - \mu_i)^2\right)}.$$

Далее для каждой моды j следует рассчитать векторы математического

ожидания (M) и среднеквадратического отклонения (Σ):

$$\begin{aligned} [M_{kj}; \Sigma_{kj}] = \\ = \left[\frac{1}{N\sqrt{a}} \sum_{i=1}^N \rho_{ij} \frac{x_{ki} - \mu_{kj}}{\sigma_{kj}}; \frac{1}{N\sqrt{2a}} \left(\sum_{i=1}^N \rho_{ij} \left(\frac{x_{ki} - \mu_{kj}}{\sigma_{kj}} \right)^2 - 1 \right) \right], \end{aligned}$$

где $k = \overline{1, D}$ охватывает размерность вектора.

Основываясь на этих расчетах, вектор Фишера изображения I составляется следующим образом:

$$F(I) = [M_i; \Sigma_i], i = \overline{1, J}.$$

В процессе автоматизированной классификации земель с расчетом параметров окрестности с каждым элементарным участком (пикселем) данных ДЗЗ следует сопоставить как его спектральные параметры, так и дескрипторы его окрестности, расчет которых проводится по представленным выше формулам. На базе вектора этих дескрипторов предлагается осуществлять классификацию пространственных объектов для создания карт земель.

Эксперимент по тематической интерпретации данных ДЗЗ с учетом дескрипторов окрестности проводился по следующему плану:

1) определение проблемной ситуации и выявление целей создания карт земель;

2) подбор данных для автоматизированного анализа и определение формы номенклатуры классов конечного результата;

3) предварительная обработка данных ДЗЗ, включающая в себя расчет дескрипторов окрестности (для этого необходимо экспертно подобрать размер окрестности, ее форму, а так-

¹⁶ Ямашкин С. А. Методическое и алгоритмическое обеспечение процесса анализа структуры земель на базе данных дистанционного зондирования : дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2016.

¹⁷ Ямашкин С. А. Методическое и алгоритмическое обеспечение процесса анализа структуры земель на базе данных дистанционного зондирования : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2016.



же определиться с самим перечнем рассчитываемых информативных дескрипторов);

4) сопоставление всех атомарных участков космической съемки вектора с его параметрами: $X = [A M]$, где $A = [\lambda_1, \dots, \lambda_n]$ – вектор значений спектральных яркостей участка, а $M = [\mu_1, \dots, \mu_k]$ – вектор дескрипторов его окрестности;

5) выбор алгоритма для классификации данных (гибридные системы, нейросетевые алгоритмы, машины опорных векторов (SVM), деревья принятия решений), определение его архитектуры, функциональных параметров и средств программной реализации;

6) формирование обучающих и тестовых выборок на базе априорной информации об анализируемой территории, полученной в ходе полевых исследований;

7) обучение классификатора его типу и архитектуре;

8) классификация материалов космической съемки с целью выделения интересующих типов земель;

9) оценка качества проведенной классификации на базе расчета численных метрик и экспертной оценки; формирование вывода о качестве решения поставленной задачи.

Для чистоты и полноты эксперимента выполнение пунктов 3–9 данного плана необходимо проводить с различными дескрипторами окрестности и архитектурой классифицирующих алгоритмов. На основе полученных результатов необходимо сделать вывод о влиянии значения дескрипторов окрестности на процесс проведения классификации и ее результат.

Результаты исследования

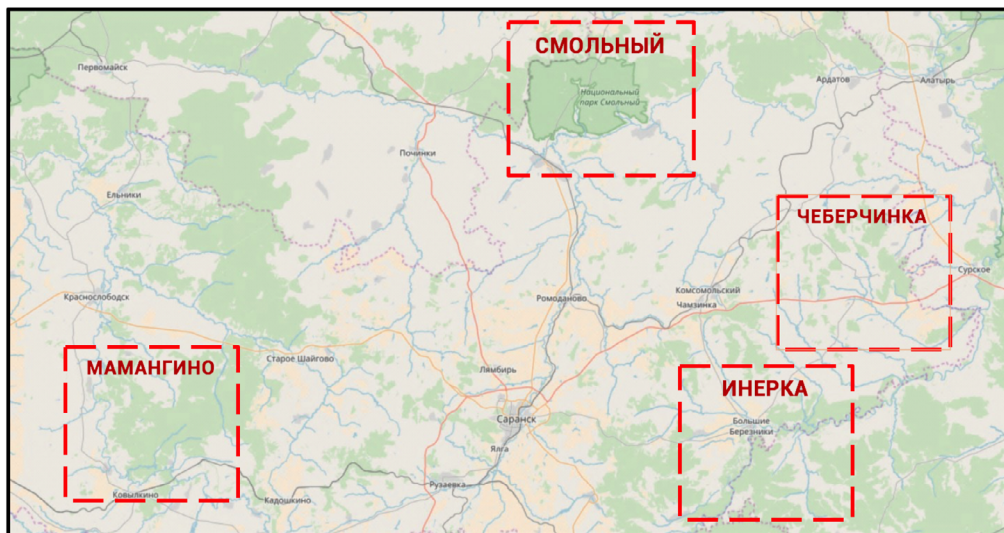
Апробация алгоритма анализа данных ДЗЗ с учетом дескрипторов окрестности была проведена на четырех тестовых полигонах: «Инерка», «Смольный», «Мамангино», «Чеберчинка» (рисунок). Полигон «Инерка» (центр: $54^{\circ}3'52.21''$ с. ш., $45^{\circ}53'11.20''$ в. д.) отражает взаи-

модействие парагенетических систем останцово-водораздельных массивов эрозионно-денудационной равнины и долины р. Сура [15]; «Смольный» (центр: $54^{\circ}42'18.72''$ с. ш., $45^{\circ}18'33.79''$ в. д.) выделен в зоне взаимодействия лесостепных геосистем вторичных моренных, лесных ландшафтов водно-ледниковых и древнеаллювиальных равнин [16]; «Чеберчинка» (центр: $54^{\circ}27'36.46''$ с. ш., $46^{\circ}18'50.60''$ в. д.) отражает своеобразие развития лесостепных ландшафтов эрозионно-денудационных равнин полигона, что связано с активными тектоническими инверсиями в неоген-четвертичное время [17]; полигон «Мамангино» (центр: $54^{\circ}13'13.42''$ с. ш., $43^{\circ}53'30.05''$ в. д.) организован в парагенетических системах лесных ландшафтов водно-ледниковых и древнеаллювиальных равнин.

В качестве исходных данных выбраны космические снимки Landsat-7. Так, для анализа земель национального парка «Смольный» изначально предполагалось, что номенклатура результата классификации будет строиться на разделении классов растительности, в т. ч. хвойных, широколиственных, мелколиственных лесов, а также земель, не покрытых растительностью. Для эффективного анализа данных ДЗЗ разумно выбрать комбинацию коротковолнового ИК, ближнего ИК и красного каналов Landsat-7. Сочетание этих спектральных зон информативно при решении задачи классификации земель, покрытых растительностью.

Был проведен расчет дескрипторов окрестности. Для оценки влияния размера анализируемой окрестности на результат классификации были проведены эксперименты с учетом характеристик дескрипторов окрестности радиусов 10 px (300 м), 50 px (1 500 м), 100 px (3 000 м), а также без учета этих параметров.

В качестве классификатора данных была использована нейронная сеть прямого распространения; совместно



Р и с у н о к. Система тестовых полигонов на территории Республики Мордовия
F i g u r e. The system of test polygons in the Republic of Mordovia

с экспертом для нее были подготовлены обучающие, валидационные и тестовые выборки. Тематическая интерпретация материалов космической съемки нейронными сетями, обученными на этих выборках, позволила сгенерировать карты растительности и выделить участки, соответствующие землям, покрытым хвойными, широколиственными, мелколиственными лесами, а также песками. Классификация с учетом дескрипторов окрестности радиусом 300 м привела к получению генерализованного результата. Классификация данных ДЗЗ с учетом дескрипторов окрестности радиусом 1,5 км позволила выделить песчаные участки, не покрытые растительностью, которые были недостаточно заметны в результате остальных экспериментов.

Это стало возможным благодаря учету информативных дескрипторов окрестности, особенности которых стали проявляться в данном масштабе. Классификация земель с учетом дескрипторов окрестности радиусом 3 км напротив, позволила, добиться существенной генерализации, при которой

с результирующей карты были убраны незначительные территориальные объекты. Таким образом, анализ специфики окрестных территорий с опорой на вычисление пространственных закономерностей и особенностей позволяет с большей точностью осуществлять классификацию земель. Объективный учет дескрипторов окрестности возможен при комплексном исследовании различных свойств окружения (табл. 1), так как каждый из них предоставляет различную аутентичную информацию о пространственных комплексах.

Проведенные эксперименты позволили сделать вывод о том, что классификация геоданных с учетом дескрипторов окрестности позволяет осуществлять более гибкую настройку получаемого результата, который часто характеризуется большей точностью (табл. 2).

Использование в качестве особенностей классифицируемых территорий рассчитываемых дескрипторов окрестности позволяет в многомерных пространствах признаков анализируемых земель получить компактные кластеры признаков. Диагностика аутентич-



Т а б л и ц а 1

Table 1

Показатели точности при анализе различных типов геофизической поверхности
Accuracy indicators for the analysis of different types of geophysical surface

Дескриптор окрестности / Descriptor of neighborhood	Точность классификации земель, % / Accuracy of land classification, %		
	Растительность / Vegetation	Вода / Water	Почва / Soil
Граничный (локальный диапазон) / Boundary (local range)	91,82	90,04	93,11
Неоднородность (локальная энтропия, среднеквадратическое отклонение) / Inhomogeneity (local entropy, standard deviation)	94,27	92,95	91,01
Цветовой (цветовой момент, гистограмма оттенков, кортеж цветов) / Color (color moment, histogram of hues, tuple of colors)	91,96	92,30	93,24
Комплексный дескриптор / Complex descriptor	95,82	93,33	94,23

Т а б л и ц а 2

Table 2

**Показатели точности классификации при учете дескрипторов разного радиуса
(полигоны «Инерка», «Смольный», «Чеберчинка», «Момангино»)**
**Indicators of classification accuracy, taking into account descriptors of a different radius
(polygons "Inerka", "Smolnyy", "Cheberchinka", "Momangino")**

Радиус окрестности / Radius of neighborhood	Точность классификации на полигонах, % / Accuracy of classification on polygons, %			
	Инерка / Inerka	Смольный / Smolnyy	Чеберчинка / Cheberchinka	Момангино / Momangino
Без учета окрестности (0 px) / Excluding the neighborhood (0 px)	84,04	88,01	81,12	82,35
10 px	89,27	92,32	87,23	86,91
50 px	93,72	93,45	91,02	92,99
100 px	90,65	96,07	93,71	92,87

ных свойств внутренней структуры пространственных объектов на основе анализа разнообразия динамических и инвариантных характеристик способствует подавлению шумового воздействия, генерализации результата и общего увеличения точности классификации.

Апробация разработанного алгоритма на четырех тестовых полигонах показала значение точности классификации в диапазоне 81–88 % (без учета дескрипторов окрестности). С учетом свойств окрестности точность возрастает до

96 %. В ходе экспериментов было выявлено, что существенное увеличение радиуса анализируемой окрестности ведет к понижению точности интерпретации космических снимков. Применение разработанных алгоритмов, основанных на анализе инвариантных и динамических дескрипторов окрестности, позволяет оперативно проводить автоматизированный анализ территориальных комплексов с целью картографирования систем землепользования и определения векторов развития стихийных процессов.

Данный комплекс алгоритмов реализован в виде набора скриптов для классификации материалов космической съемки на языке MATLAB. Алгоритмы условно подразделяются на два ключевых блока: 1) для анализа данных, описывающих инвариантные дескрипторы земель с выделением их границ; 2) для анализа динамических свойств территории с целью изучения аутентичных свойств внутренней структуры земель.

Обсуждение и заключения

Проведенное исследование позволило сделать следующие выводы.

1. Изучена предметная область, отечественный и зарубежный опыт в области анализа материалов космической съемки для оперативного мониторинга состояния земель и прогнозирования развития стихийных природных процессов. Анализ данных источников показал, что при существовании множества решений эффективность существующего инструментария можно существенно повысить путем внедрения оптимизированных алгоритмов анализа пространственных данных.

2. Разработан математический аппарат, который впоследствии послужил основой программного комплекса анализа материалов космической съемки для исследования состояния земель и прогнозирования стихийных природных процессов, а также сформировал методику анализа геофизической оболочки с использованием синтетических дескрипторов окрестности.

3. Созданные алгоритмы реализованы в виде программного комплекса на языке MATLAB. Эффективность предлагаемых решений апробирована на тестовых полигонах. Анализ результатов эксперимента проводился с участием эксперта. Применение методики анализа земель с использованием дескрипторов окрестности на четырех тестовых полигонах показало возможность достижения точности классификации в 97 % с учетом параметров окрестности. Также был сделан вывод о том, что чрезмерное увеличение радиуса анализируемой окрестности неизбежно приводит к снижению точности дешифрирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Kruse F. A., Lefkoff A. B.** The spectral image processing system (SIPS) – interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data // *Remote Sens. Environ.* 1993. Vol. 44. P. 145–163. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90013-N](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90013-N)
2. **Kohonen T.** Self-organizing maps (third extended edition). New York, 2001. 501 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56927-2>
3. **Rosenblatt F.** Analytic techniques for the study of neural nets // *IEEE Trans. on Appl. and Industry.* 1964. Vol. 83, no. 74. P. 285–292. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5407758>
4. **Breiman L.** Bagging predictors // *Machine Learning.* 1996. Vol. 24, no. 2. P. 123–140. URL: <https://www.stat.berkeley.edu/~breiman/bagging.pdf>
5. **Foody G. M., Mathur A.** Toward intelligent training of supervised image classifications: direct training data acquisition for SVM classification // *Remote Sensing of Environment.* 2004. Vol. 93. P. 107–117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.06.017>
6. **Polikar R.** Bootstrap inspired techniques in computational intelligence: ensemble of classifiers, incremental learning, data fusion and missing features // *IEEE Signal Processing Magazine.* 2007. Vol. 24, no. 4. P. 59–72. URL: <http://users.rowan.edu/~polikar/RESEARCH/PUBLICATIONS/spm2007.pdf>
7. **Polikar R.** Ensemble based systems in decision making // *IEEE Circuits and Systems Magazine.* 2006. Vol. 6, no. 3. P. 21–45. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCAS.2006.1688199>



8. Woods K., Kegelmeyer W. P. J., Bowyer K. Combination of multiple classifiers using local accuracy estimates // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1997. Vol. 19, no. 4. P. 405–410. DOI: <https://doi.org/10.1109/34.588027>

9. Ямашкин С. А., Ямашкин А. А., Фролов А. Н. Базовые геоинформационные ресурсы для оптимизации регионального землепользования // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. Т. 53, № 11-2. С. 85–88. DOI: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.53.009>

10. Ямашкин С. А. Использование ансамбль-систем в анализе данных ДЗЗ для мониторинга состояния земель и прогнозирования стихийных природных процессов // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. 2016. № 28. С. 71–77.

11. Использование ансамбль-систем для картографирования ландшафтов / С. А. Ямашкин [и др.] // Геодезия и картография. 2016. № 7. С. 42–49. DOI: <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2016-913-7-42-49>

12. Ямашкин С. А., Ямашкин А. А. Моделирование синтетической ландшафтной карты // Перспективы развития информационных технологий. 2016. № 32. С. 68–74. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27114514>

13. Ямашкин С. А. Мониторинг состояния земель и прогнозирования стихийных процессов на основе анализа инвариантных и динамических параметров территории // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. Т. 51, № 9-2. С. 110–112. DOI: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.51.129>

14. Синтетическое ландшафтное картографирование в региональной ГИС / С. А. Ямашкин [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. Т. 58, вып. 04-1. С. 54–56. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.58.003>

15. Ямашкин А. А., Ямашкин С. А., Акашкина А. Г. ГИС-моделирование ландшафтного разнообразия // Геодезия и картография. 2013. № 11. С. 40–45. URL: http://geocartography.ru/scientific_article/2013_11_40-45

16. Ямашкин А. А., Ямашкин С. А. Применение алгоритма выделения краев к решению задачи моделирования границ ландшафтов // Вестник Воронежского государственного университета (Сер. «География. Геоэкология»). 2013. № 2. С. 28–34. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/geograph/2013/02/2013-02-04.pdf>

17. Применение ГИС в анализе морфологической структуры ландшафтов / А. А. Ямашкин [и др.] // Вестник Удмуртского университета (Сер. «Биология. Науки о Земле»). 2013. № 6-3. С. 115–122. URL: <http://docplayer.ru/29381408-A-a-yamashkin-s-a-yamashkin-a-a-klkunov-a-g-akashkina-yu-s-shukshin-primenenie-gis-v-analize-morfologicheskoy-struktury-landshaftov.html>

Поступила 01.12.2017; принята к публикации 20.02.2018; опубликована онлайн 20.09.2018

Об авторах:

Ямашкин Станислав Анатольевич, старший преподаватель кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), кандидат технических наук, Researcher ID: N-2939-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7574-0981>, yamashkinsa@mail.ru

Ямашкин Анатолий Александрович, декан географического факультета, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), доктор географических наук, профессор, Researcher ID: N-2941-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9995-8371>, yamashkin56@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

С. А. Ямашкин – разработка методики и алгоритма анализа земель, реализация математического аппарата в виде комплекса программ; А. А. Ямашкин – анализ экспериментальных результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Kruse F. A., Lefkoff A. B. The spectral image processing system (SIPS) – interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sens. Environ.* 1993; 44:145–163. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90013-N](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90013-N)
2. Kohonen T. Self-organizing maps (third extended edition). New York, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56927-2>
3. Rosenblatt F. Analytic techniques for the study of neural nets. *IEEE Trans. on Appl. and Industry.* 1964; 83(74):285–292. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5407758>
4. Breiman L. Bagging predictors. *Machine Learning.* 1996; 24(2):123–140. Available at: <https://www.stat.berkeley.edu/~breiman/bagging.pdf>
5. Foody G. M., Mathur A. Toward intelligent training of supervised image classifications: directing training data acquisition for SVM classification. *Remote Sensing of Environment.* 2004; 93:107–117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.06.017>
6. Polikar R. Bootstrap inspired techniques in computational intelligence: ensemble of classifiers, incremental learning, data fusion and missing features. *IEEE Signal Processing Magazine.* 2007; 24(4):59–72. Available at: <http://users.rowan.edu/~polikar/RESEARCH/PUBLICATIONS/spm2007.pdf>
7. Polikar R. Ensemble based systems in decision making. *IEEE Circuits and Systems Magazine.* 2006; 6(3):21–45. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCAS.2006.1688199>
8. Woods K., Kegelmeyer W. P. J., Bowyer K. Combination of multiple classifiers using local accuracy estimates. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.* 1997; 19(4):405–410. DOI: <https://doi.org/10.1109/34.588027>
9. Yamashkin S. A., Yamashkin A. A., Frolov A. N. Basic information resources for optimisation of the regional land use. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* = International Research Journal. 2016; 53(11-2):85–88. DOI: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.53.009> (In Russ.)
10. Yamashkin S. A. [Using ensemble-based systems in the analysis of remote sensing data for monitoring the state of lands and forecasting natural processes]. *Fundamentalnyye i prikladnyye issledovaniya: problemy i rezul'taty* = Fundamental and Applied Research: Problems and Results. 2016; 28:71–77. (In Russ.)
11. Yamashkin S. A., Radovanovich M. M., Yamashkin A. A., Vukovich D. V., Frolov A. N. Using ensemble-based systems for the landscapes mapping. *Geodeziya i kartografiya* = Geodesy and Cartography. 2016; 7:42–49. DOI: <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2016-913-7-42-49> (In Russ.)
12. Yamashkin S. A., Yamashkin A. A. [Modeling a synthetic landscape map]. *Perspektivy razvitiya informatsionnykh tekhnologiy* = Prospects for Development of Information Technology. 2016; 32:68–74. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27114514> (In Russ.)
13. Yamashkin S. A. Monitoring of land and natural processes prediction based on analysis of invariant and dynamic parameters of the territory. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* = International Research Journal. 2016; 51(9-2):110–112. DOI: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.51.129> (In Russ.)
14. Yamashkin A. A., Yamashkin S. A., Frolov A. N., Zarubin O. A. Synthetic landscape mapping in the regional GIS. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* = International Research Journal. 2017; 58(04-1):54–56. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.58.003> (In Russ.)
15. Yamashkin A. A., Yamashkin S. A., Akashkina A. G. [GIS-modeling of landscape diversity]. *Geodeziya i kartografiya* = Geodesy and Cartography. 2013; 11:40–45. Available at: http://geocartography.ru/scientific_article/2013_11_40-45 (In Russ.)
16. Yamashkin A. A., Yamashkin S. A. [Application of the algorithm for edge selection to the solution of the problem of modeling the borders of landscapes]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Geografiya. Geoekologiya* = Voronezh State University Bulletin. Series: Geography, Geoecology. 2013; 2:28–34. Available at: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/geograph/2013/02/2013-02-04.pdf> (In Russ.)



17. Yamashkin A. A., Yamashkin S. A., Klikunov A. A., Akashkina A. G., Shukshin Yu. S. Application of GIS in the analysis of morphological structure of the landscape. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Ser.: Biologiya. Nauki o Zemle* = Udmurt University Bulletin. Series: Biology, Earth Sciences. 2013; 6-3:115–122. Available at: <http://docplayer.ru/29381408-A-a-yamashkin-s-a-yamashkin-a-a-klikunov-a-g-akashkina-yu-s-shukshin-primenenie-gis-v-analize-morfologicheskoy-struktury-landshaftov.html> (In Russ.)

Received 01.12.2017; revised 20.02.2018; published online 20.09.2018

About authors:

Stanislav A. Yamashkin, Senior Lecturer, Chair of Automated Systems of Information Processing and Control, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: N-2939-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7574-0981>, yamashkinsa@mail.ru

Anatoliy A. Yamashkin, Dean, Geography Faculty, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), D.Sc. (Geography), Professor, Researcher ID: N-2941-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9995-8371>, yamashkin56@mail.ru

Author's contribution:

S. A. Yamashkin developed the methods and algorithms for the analysis of lands and implementation of mathematical apparatus in form of a program system; A. A. Yamashkin analyzed the experimental results.

All authors have read and approved the final version of the paper.

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

УДК 004.4:631.316

DOI: 10.15507/0236-2910.028.201803.366-378



Моделирование, изучение и изготовление стойки культиватора из композитных материалов

И. Р. Антибас*, А. Г. Дьяченко

*ФГБОУ ВО «Донской государственный технический
университет», (г. Ростов-на-Дону, Россия)*

**imad.antypas@mail.ru*

Введение. До настоящего времени композитные материалы не были широко распространены в народном хозяйстве, особенно в сельском. В связи с этим актуально их применение для изготовления отдельных деталей сельскохозяйственной техники, например, стоек культиваторных лап, часто ломающихся из-за концентрации напряжения в местах изменения их толщины при выполнении пахотных работ. Эти напряжения можно уменьшить, повысив надежность работы стоек, если использовать для их изготовления композитные материалы.

Материалы и методы. В исследовании применялись композитные материалы для изготовления культиваторных стоек и изучения их свойств при соответствующем подборе объемного соотношения волокон в каждом из слоев ткани и связующего материала. Получение опытным путем молекулярного соотношения волокон ткани и связующего слоя послужило исходным материалом для проектировочных расчетов и дало возможность использовать шаблонный метод для набора слоя.

Результаты исследования. Был получен расчетный коэффициент безопасности, равный 2. Следует отметить, что были изменены значения механических характеристик материала из-за наличия в материале пористости, коэффициент которой оказался равен 11,6 %, тогда как допустимое значение – 4 %. Полевые испытания показали долговечность изготовленной из композитных материалов стойки (даже при тяжелых условиях работы) по сравнению с обычной стойкой, выполненной из легированной стали.

Обсуждение и заключения. В результате исследования механического поведения геометрической модели стойки и моделирования ее материала, обладающего высокими механическими свойствами и впоследствии использованного для производства композитного материала, было достигнуто минимальное значение коэффициента безопасности – 4 (при максимальном коэффициенте безопасности для работников 15). Также была доказана экономическая целесообразность производства стоек из композитных материалов как менее дорогого, чем при использовании традиционных материалов – сталей.

© Антибас И. Р., Дьяченко А. Г., 2018



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.



Ключевые слова: композитный материал, стекло, полиэстер, культиватор, стойка культиватора, стойка из композитных материалов, производство композитных материалов

Для цитирования: Антибас И. Р., Дьяченко А. Г. Моделирование, изучение и изготовление стойки культиватора из композитных материалов // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 366–378. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.366-378>

Благодарности: Работа выполнена в рамках инициативной НИР. Выражаем благодарность университету г. Алеппо (Сирия) за помощь, которая была оказана нам в проведении практических испытаний, а также преподавателям кафедры «Сельскохозяйственного машиностроения» данного университета.

Modeling, Studying and Manufacturing a Cultivator Rack from Composite Materials

I. R. Antypas*, A. G. Dyachenko

Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia)

**imad.antypas@mail.ru*

Introduction. The composite materials have not been widely used in the Russian economy (especially in agriculture) until recently. It is relevant to use them for manufacturing some parts of agricultural machinery, for example, racks of cultivator paws. These parts often break down because of stress concentration in the places where their thickness changes during the time of plowing. The stress can be decreased by using composite materials.

Materials and Methods. This paper presents the study results on the use of composite materials for manufacturing of cultivator racks with the appropriate selection of the volume ratio of fibers in each of the layers of fabric and layers of binder.

Results. Based on the results, the design safety factor was calculated to be equal to 2. It should be noted that the values of the mechanical characteristics of the material changed because of the presence of a porosity coefficient, which was 11.6 %, while the allowable value was 4%. Field tests have shown the durability of a new composite material, even under severe operating conditions, compared to a conventional rack made of alloy steel.

Conclusions. Studying the mechanical behavior of the rack geometric model and modeling a material with high mechanical properties, which later was used for manufacturing a composite material, we could get the minimum safety factor of 4, with the maximum safety factor for workers – 15. The racks from composite material are economically feasible as less expensive than used steel racks.

Keywords: composite materials, glass, polyester, cultivator, cultivator rack, composite rack, production of composite materials

For citation: Antypas I. R., Dyachenko A. G. Modeling, Studying and Manufacturing a Cultivator Rack from Composite Materials. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):366–378. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.366-378>

Acknowledgments: The research is carried out in the framework of initiative research activities. We express our gratitude to the University of Aleppo (Syria) for the help in practical tests, as well as for the teaching staff of the Department of Agricultural Engineering.

Введение

Использованию композитных материалов в области производства культиваторов и другой сельскохозяйственной техники, а также проведению каких-либо исследований в этом направлении не уделялось достаточного внимания, несмотря на информацию из различных источников о неограниченной адаптации свойств таких материалов. В результате частых поломок стоек, особенно в местах перегибов, и применения литейных операций происходит изменение их конфигурации и увеличение веса культиватора. Во время сельскохозяйственных работ это также приводит к постоянным травмам рук работников, поэтому внимание было сосредоточено на поиске новых материалов, снижении веса, хороших механических свойствах, высокой несущей способности и гибкости при проектировании и производстве стоек культиватора, а также экономической целесообразности по сравнению с различными конструкциями.

В настоящее время композитные материалы все чаще применяются в сельском хозяйстве, строительстве, автомобилестроении, авиастроении и военной промышленности. Широкое применение данных материалов обусловлено прежде всего их высокими физико-механическими, термомеханическими, антикоррозионными и другими важными свойствами, которыми не обладают традиционно используемые материалы.

Обзор литературы

Композитные материалы использовались в автомобильной промышленности для того, чтобы снизить массу различных конструкций, а также количество энергии, затрачиваемое при перевозке людей или грузов. Результаты исследований показывают, что замещение традиционных материалов некото-

рых деталей автомобилей материалами из карбона с коротко нарезанными волокнами (МФ) и связующего материала приносит экономическую выгоду с точки зрения снижения массы и цены [1].

Также изучалось влияние каждого из видов материалов и факторов воздействия, а полученные результаты были сопоставлены с традиционными металлами, такими как стали и алюминий. Чтобы найти оптимальное соотношение композитных материалов в автомобильной промышленности¹ [2–3], предпочтительнее использовать многослойные ткани в дополнение к армированному материалу из рубленых волокон.

Был найден целый ряд возможностей для использования композитов в качестве предохранительного материала в строительстве и автомобильной промышленности. С целью выявления лучшего соединения для использования в автомобильной промышленности были проведены экспериментальные исследования по определению характеристик трех типов материальных основ, в которых в качестве связующего вещества выступил уретан. В первом типе использовалось стекловолокно (стеклянные волокна были нарезаны вручную и рассеяны случайным образом); во втором типе – карбон (слои углеродных волокон пересекались под углом 45° или 90°); в третьем – слоистый карбон (слои углеродных волокон пересекались под углом 45° и 90°), имеющий почти однородные свойства углеродного волокна по всем направлениям [4]. Были определены механические свойства всех трех типов материала при растяжении и ударе.

Учеными было исследовано влияние стеклянных слоев с полибутиленом трифталата, зависящее от объемного соотношения волокон, на некоторые механические свойства. Полученные резуль-

¹ Smith C. S. Design of marine structures in composite materials. London : Elsevier Applied Science, 1990. 389 p.



таты показали, что увеличение объемного соотношения волокон приводит к увеличению изгиба при растяжении и давлении, а также к разрушению материала при растяжении и изгибе. Было выявлено, что свойства композитного материала и его поведение при повреждениях и разрушении в значительной степени зависят от микроскопических материальных переменных, таких как длина волокон, объемное соотношение волокон, ориентация волокон и т. д. [5–7].

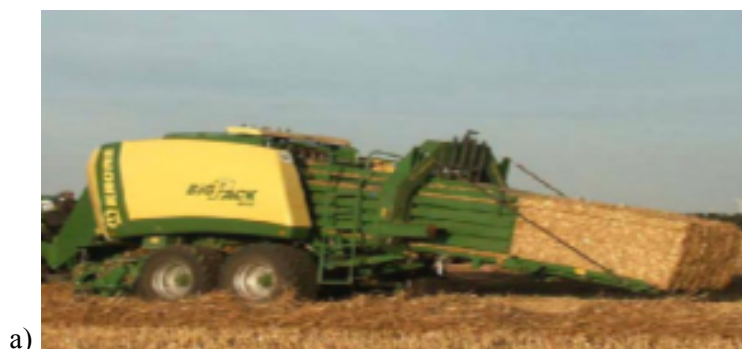
Применение композитных материалов в современной сельскохозяйственной технике ограничено. До сих пор они использовались при изготовлении лишь некоторых корпусных деталей или топливных баков, как это показано на рис. 1, с целью снижения веса и давления на почву, а также получения соответствующей формы.

Также были проведены исследования по определению влияния объемно-

го соотношения стекловолокна на механические свойства полипропилена, укрепленного стекловолокном. Сделаны следующие выводы:

1. Увеличение объемного соотношения стекловолокна происходило пропорционально увеличению изгибных и растягивающих свойств композитных материалов (стекловолокно / полипропилен);

2. при увеличении объемного соотношения стекловолокна на 15–20 % возрастал предел прочности композитного материала при его растяжении и изгибе; в ходе дальнейшего увеличения прочностные свойства снижались. Данный результат свидетельствует о том, что в материале за счет концентрации напряжений на концах слабых волокон сформировались локальные микроскопические трещины; это оказывало влияние на прочность сцепления стекловолокна [8].



a)



b)

Р и с. 1. Корпусные детали из композитных материалов: а) соломоподборщик; б) топливный бак

F i g. 1. Enclosures made from composite materials: a) straw collector; b) fuel tank

Исследователями было определено, что с увеличением объема на 30 % значения модулей упругости при сдвиге и растяжении материала повышаются. В случае изгиба это увеличение соотношения стекловолокна сказывается в значительной степени, и при приложении растягивающих усилий оно отклоняется от линейного. Также было установлено, что композитные материалы в плане их устойчивости к растяжению и изгибу ведут себя не так, как при испытаниях на прочность сдвига, а в зависимости от соотношения стекловолокна наблюдается квазилинейное поведение модуля упругости, достигающего определенного значения [9–10].

Цель исследований – моделирование и изготовление стойки культиватора из композитных материалов.

Материалы и методы

Для изготовления композитного материала использовалось стекловолокно в виде сбалансированной ткани с поверхностной массой 300 г/см², связующий материал – полиэстер (400 г/см²), отвердитель (2 %), катализатор (0,5 %). Также изучались физические и механические свойства компонентов композитных материалов (табл. 1).

При изготовлении стоек культиваторных лап глубокорыхлителя, представленных на рис. 2, их сердцевин

были сформованы стереотипным образом в многослойную пластину, которая состояла из 20 слоев (10 слоев ткани и 10 слоев связующего компонента), в соответствии со следующим набором [T5/M10/T5], который послужил шаблоном для формирования остальных слоев. Изготовленные стойки устанавливались в культиваторе и использовались для вспашки земли.



Р и с. 2. Объекты исследования – сердцевин

Fig. 2. The objects of study are the cores of two cultivator racks

Образцы из слоистого материала подвергались растягивающим усилиям в соответствии с международными стандартами с целью определения механических свойств для последующего использования при моделировании культиваторных стоек² [11–12].

Т а б л и ц а 1
Table 1

Механические и физические свойства компонентов композитных материалов
Mechanical and physical properties of components of composite materials

Материал / Material	Тип / Type	Модуль упругости E , МПа / Elastic modulus E , MPa	Плотность ρ , кг/м ³ / Density ρ , kg/m ³	Напряжение σ , МПа / Strain σ , MPa
Связующий / Binder	Полиэстер / Polyester	1 600	1 183	15
Волокно / Fiber	Стекловолокно / Fiberglass	71 000	2 500	791

²Антибас И. Р., Дьяченко А. Г. [Изготовление теплоизоляционного материала и изучение его теплофизических и механических свойств](#) // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. ст. 10-й Междунар. науч.-практ. конф. Ростов н/Д : ДГТУ, 2017. С. 182–183.

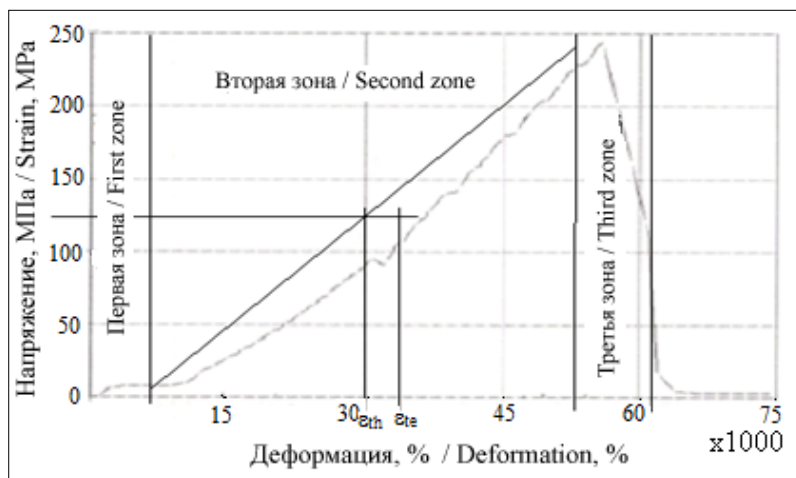


В допущениях не учитывалась неоднородность в пропорциях волокон и, таким образом, пренебрегалось ее влиянием на поведение образцов во время испытаний.

Для измерения толщины слоев определялось объемное соотношение волокон. Композитный материал представляет собой монолитную конструкцию, состоящую из 20 слоев (10 слоев ткани и 10 слоев связующего материала) со средней толщиной 10,02 мм. Для определения толщины ряда образцов и облегчения процесса измерения каждого из них был использован оптический микроскоп. После выполнения ряда измерений толщин каждого слоя была рассчитана средняя толщина каждого из них, причем средняя толщина слоя ткани h_t составила 0,514 мм, а толщина связующего слоя h_m – 0,493 мм. Таким образом, будем считать толщину слоя ткани равной толщине связующего слоя, имеющей значение 0,5 мм. Во время исследования было обнаружено, что это допущение не оказывало заметного влияния

на механические свойства одного слоя и, таким образом, на весь многослойный материал [13–15].

Испытание образцов на растяжение проводилось в соответствии с международным стандартом ASTM D3039-79³. На рис. 3 показана кривая поведения одного из этих образцов при растяжении, где первая область указывает на проскальзывание в местах зажимов. Во избежание этого их поверхности должны быть зафиксированы должным образом. Вторая область свидетельствует о гибком характере поведения этих материалов и о связи между напряжением и деформациями, которая проявляет почти линейную зависимость тогда, когда разница между теоретической и реальной деформацией возникает из-за характеристик тканевых материалов, особенно из-за волнистой структуры текстильных волокон. В результате упрочнения волокон деформация распространяется в противоположные по отношению друг к другу стороны. Третья область отображает ситуацию после разруше-



Р и с. 3. Кривые, характеризующие механическое поведение образцов при растяжении
F i g. 3. Curves characterizing the mechanical behavior of specimens under tension

³ [ASTM D3039 / D3039M – 17 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.](#)

ния образцов, происходящего вследствие наличия армированных слоев и слоев ткани, которые постепенно расщепляются в соответствии с углами ориентации волокон.

Результаты исследования

Одним из наиболее распространенных дефектов в деталях, изготовленных из композитных материалов, является наличие пор между слоями, т. к. доля пористости V_v отрицательно влияет на объемное соотношение используемых материалов-носителей, что, в свою очередь, влияет на механические свойства композитного материала в целом. Доля пористости принимается во внимание при расчете объемного соотношения V_f волокон в соответствии со следующим⁴ [16–17]:

$$V_f = (1 - V_v) \cdot V_f.$$

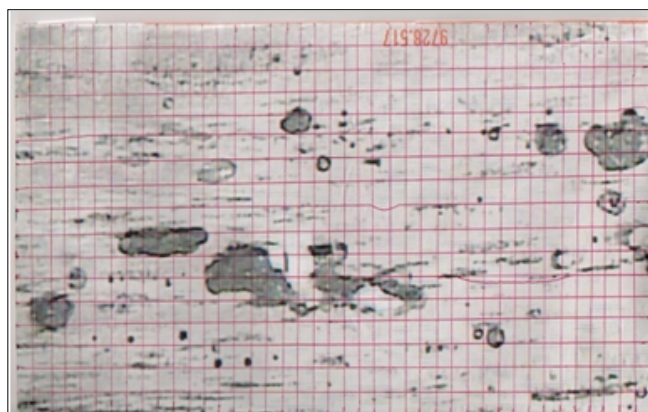
Для расчета процента пористости в слоях композитного материала после проведения очистки поверхностей

брались образцы боковых секций, а для получения четкого изображения использовался электронный микроскоп (рис. 4). С помощью электронного микроскопа определили $V_v = 11,6 \%$.

Из значений табл. 2 можно определить первоначальную геометрию образцов, используемых при испытании на статическое растяжение, средние значения для каждого фактора гибкости, а также напряжение растяжения и разрушающую деформацию при растяжении.

Для изучения и расчета свойств волокон и связующего вещества (фактор гибкости, поверхностной массы, количества и толщины слоев и метод набора материала) использовалась компьютерная программа. При изучении механического поведения стоек сравнивали опытные значения разрушающих напряжений со значениями, полученными при приложении реальных нагрузок^{5–6} [18].

Были получены следующие результаты: напряжение разрушения в слое



Р и с. 4. Соотношение пористости в образцах

F i g. 4. The porosity ratio in the samples

⁴ Gayton N., Pendola M., Lemaire M. Partial safety factors calibration of externally pressurized thin shells // Third European Conference on Launcher Technology. Strasbourg, 2001. 399 p.

⁵ Kharmanda G., Antypas I. Integration of reliability and optimization concepts into composite yarns // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. ст. 10-й Междунар. науч.-практ. конф. Ростов н/Д : ДГТУ, 2017. С. 174–176.

⁶ Kharmanda G., Antypas I. System reliability-based design optimization using optimum safety factor with application to multi failure fatigue analysis // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. ст. 10-й Междунар. науч.-практ. конф. Ростов н/Д : ДГТУ, 2017. С. 177–179.



Геометрические и механические свойства, а также технические характеристики образцов при испытании на растяжение

Geometric and mechanical properties, as well as technical characteristics of the samples during the tensile test

Средние геометрические параметры образцов / Average geometric parameters of samples			Средние величины характеристик при растяжении / Average values of tensile properties		
Длина образца L , мм / Sample length L , mm	Ширина образца W , мм / Sample width W , mm	Толщина образца T , мм / Sample thick- ness T , mm	E , МПа / E , MPa	σ , МПа / σ , MPa	ε , %
95,13	30,17	10,04	5 130,00	226,83	0,0515

ткани составило $\sigma_{yt} = 195,48$ МПа; напряжения разрушения связующего слоя $\sigma_{ym} = 126,71$ МПа.

Для определения напряжения при нагрузке слоев композитного многослойного материала была использована программа-ламинатор, работа которой направлена на изучение теплового и механического поведения одного слоя и распределение координат в зависимости от случайной нагрузки.

Полученные результаты включают модуль упругости материала, относительную деформацию, а также напряжение, приводящее к разрушению каждого слоя.

В процессе проведения исследований мы пренебрегли тепловыми нагрузками, поскольку культиватор с коэффициентом безопасности 2 не работает при высоких температурах. Следовательно, были изучены только механические характеристики материала в результате воздействия растягивающих сил: модуль упругости материала составил $E = 9\,965$ МПа; относительная деформация материала во время приложения нагрузки – $\varepsilon = 0,0139$; напряжение в слое ткани – $\sigma_{yt} = 165$ МПа; напряжение в связующем материале $Y_m = 113$ МПа.

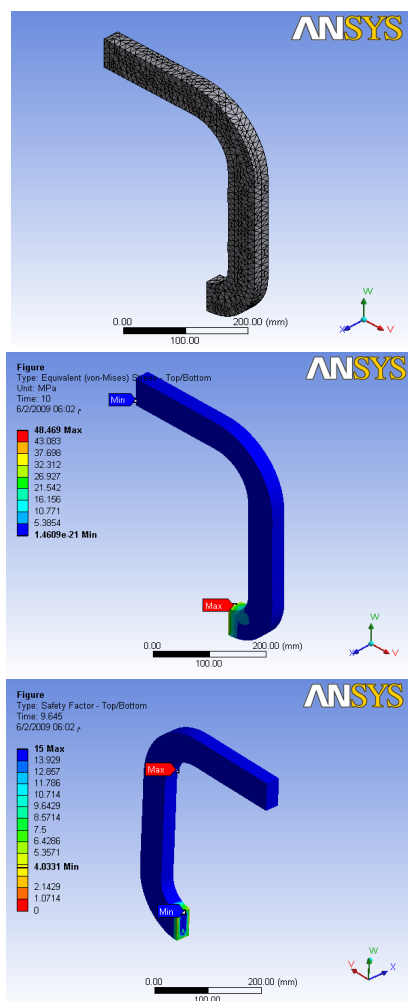
Следует отметить, что напряжение в тканевом слое и слое связующего материала с двойной нагрузкой силы сопротивления на пластину при воздействии на культиваторы с коэффици-

ентом безопасности 2 оказалось меньше значений напряжения разрушения, вычисленных программой для расчета объемных соотношений, механических свойств и напряжений разрушения слоев ткани и связующего материала. Значение коэффициента запаса прочности получилось равным 2.

Для изучения механического поведения стойки были выбраны четыре различных конструкции, которые впоследствии рассчитывались методом конечных элементов; напряжение и деформации определялись в условиях, схожих с реальными. Данный метод является экономичным с точки зрения временных и материальных затрат, а также гарантирует высокую безопасность.

При двустороннем измерении было получено инженерное изображение модели стойки (программа-ламинатор использует реальные размеры, и после их экспорта в программу Ansys Workbench была получена трехмерная модель стойки). Определены механические свойства материалов, используемых в соответствии с вышеупомянутым исследованием многослойного материала, принятых для производства стойки. Впоследствии стойка была разбита на конечные 186 элементов, что показано на рис. 5. Далее были разработаны пограничные условия, и к стойке были приложены нагрузки, аналогичные реальным условиям работы культиватора.

На рис. 5, б-с также показано распределение напряжений по Мизесу по профилю стойки и коэффициент запаса прочности стойки.



Р и с. 5. Модель стойки: а) вид геометрической формы стойки после разбиения ее на узлы; б) распределение напряжений в стойке; в) коэффициент запаса прочности стойки

Fig. 5. The rack model: a) the form of the geometric shape of the post after breaking it into knots; b) Stress distribution in the rack; c) safety factor of the rack

При проведении полевых испытаний⁷ [19] были определены физико-механические свойства почвы: щелочность рН – 7,5; электропроводность – 1,6; известковый карбонат – 18,7 г/100 г почвы, состав почвы – 2,1 г/100 г материала; песка – 10 %; фосфора – 20,8 миллионных долей, калия – 1,3 миллионных долей; глины – 68 %; содержание солей – 22 %.

Были выбраны два типа почвы: почва, содержащая камни, и почва без камней, уплотненная в результате многочисленных проходов сельхозтехники после работ по сбору урожая.

Опыты проводились при переменных скоростях (8, 10 и 12 км/ч) и глубинах (5, 10 и 15 см) [20].

Вспашка земли осуществлялась за десять проходов на участке длиной 380 м.

Испытания показали безопасность работы стойки, что соответствует результатам теоретического исследования и исследования по моделированию механического поведения стойки, которая позднее была изготовлена.

Обсуждение и заключения

По итогам исследований можно сделать вывод, что существует неограниченная адаптация свойств композитных материалов, которые могут быть использованы во многих инженерных конструкциях. В процессе замещения стоек культиватора из традиционного материала были использованы имеющиеся в нашем распоряжении компоненты, а именно композитный материал, изготовленный из локально армированного волокна и связующего вещества, обладающего в т. ч. устойчивостью, простотой изготовления, а также меньшими весом и стоимостью. Отметим также, что значения, полученные для определения объемного коэффициента волокон

⁷ Антибас И. Р., Дьяченко А. Г. Исследование зависимости силы сопротивления проникновению и размеров пор некоторых видов почв методом сжатого воздуха при различных влажностях // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. ст. 8-й междунар. научно-практ. конф. 2015. С. 81–84.



в каждом из тканевых и связующих слоев (до настоящего времени в области композитных материалов не имевшие широкого распространения), а также их высокие композитные свойства (объемное соотношение волокон, которые использовались ранее, составляло $< 60\%$) позволили применить ручной метод формования композитного материала, не требующий особых технологий в производственных процессах. С другой стороны, это обеспечило нас набором значений и цифр, которые были использованы, главным образом, при расчетах и дизайне, и послужило ориентиром для принятия метода набора многослойного материала, который вследствие расчета обеспечил коэффициент безопасности, равный 2.

Следует отметить, что значения механических свойств материала были изменены из-за наличия пористости слоев материала, коэффициент которой при расчетах в процентном выражении был равен $11,6\%$, тогда как допустимый процент – всего 4% .

Исследования механического поведения геометрической модели стойки

и моделирование ее структуры, выполненной из материалов с высокими механическими свойствами, а также использование шаблона композитных материалов при производстве стойки, показали, что был достигнут минимальный коэффициент безопасности – 4 (при максимальном значении 15). Это соответствует результатам $[T5/M10/T5]$ как части условий, аналогичных работе культиватора с применением двойной силы сопротивления.

Полевые испытания показали высокую прочность новой стойки, произведенной из композитных материалов, при тяжелых условиях работы на максимальных скоростях (до 12 км/ч) и глубине резания до 15 мм , что соответствует результатам теоретического исследования при моделировании механического поведения изготовленных стоек.

Также стоит отметить, что производство стойки из композитного материала является более целесообразным с экономической точки зрения, чем при использовании традиционных материалов – сталей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Hosseinzadeh R., Shokrieh M. M., Lessard L. B. Parametric study of automotive composite bumper beams subjected to low-velocity impacts // *Composite Structures*. 2005. Vol. 68, Issue 4. P. 419–427. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.04.008>
2. Corum J. M., Battiste R. L., Ruggles-Wrenn M. B. Low-energy impact effects on candidate automotive structural composites // *Composites Science and Technology*. 2003. Vol. 63, Issue 6. P. 755–769. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00265-8](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00265-8)
3. Thomason J. L. Micromechanical parameters from macromechanical measurements on glass-reinforced polybutyleneterephthalate // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2002. Vol. 33, Issue 3. P. 331–339. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00129-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00129-4)
4. Lee N. J., Jang J. The effect of fibre-content gradient on the mechanical properties of glass-fibre-mat/polypropylene composites // *Composites Science and Technology*. 2000. Vol. 60, Issue 2. P. 209–217. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(99\)00122-0](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(99)00122-0)
5. Meraghni F., Desrumaux F., Benzeggagh M. L. Implementation of a constitutive micromechanical model for damage analysis in glass mat reinforced composite structures // *Composites Science and Technology*. 2002. Vol. 62, Issue 16. P. 2087–2097. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00110-0](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00110-0)
6. The influence of fiber treatment on the performance of coir-polyester composites / J. Rout [et al.] // *Composites Science and Technology*. 2001. Vol. 61, Issue 9. P. 1303–1310. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00021-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00021-5)

7. **Netravali A. N., Chabba S.** Composites get greener // *Materials Today*. 2003. Vol. 6, Issue 4. P. 22–29. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(03\)00427-9](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(03)00427-9)
8. **Davies P., Petton D.** An experimental study of scale effects in marine composites // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1999. Vol. 30, Issue 3. P. 267–275. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(98\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(98)00156-0)
9. **Richardson M., Zhang Z.** Nonwoven hemp reinforced composites // *Reinforced Plastics*. 2001. Vol. 45, Issue 4. P. 40–44. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(01\)80134-X](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(01)80134-X)
10. **Антибас И. Р., Дьяченко А. Г.** Определение характеристик компонентов композитных материалов, предназначенных для производства деталей сельскохозяйственной техники // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2017. Т. 17, № 3 (90). С. 155–163. DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-3-60-69>
11. **Антибас И. Р., Дьяченко А. Г.** Влияние содержания древесного дисперсного наполнителя на долговечность композиционных материалов // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2017. Т. 17, № 1 (88). С. 67–74. DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-1-67-74>
12. **Kharmanda G.** The safest point method as an efficient tool for reliability-based design optimization applied to free vibrated composite structures // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2017. Т. 17, № 2 (89). С. 46–55. DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-2-46-55>
13. Reliability based design optimization for multiaxial fatigue damage analysis using robust hybrid method / A. Yaich [et al.] // *Journal of Mechanics*. 2017. P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1017/jmech.2017.44>
14. **Du X., Chen W.** Sequential optimization and reliability assessment method for efficient probabilistic design // *Journal of Mechanical Design*. 2004. Vol. 126, Issue 2. P. 225–233. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1649968>
15. Reliability-based design optimization of computation-intensive models making use of response surface models / Steenackers G. [et al.] // *Quality and Reliability Engineering International*. 2011. Vol. 27, Issue 4. P. 555–568. DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.1166>
16. **Lopez R. H., Beck A. T.** Reliability-based design optimization strategies based on FORM : a review // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2012. Vol. 34, no. 4. P. 506–514. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-58782012000400012>
17. **Kharmanda G., Antypas I.** Integration of reliability concept into soil tillage machine design // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2015. Т. 15, № 2 (81). С. 22–31. DOI: <https://doi.org/10.12737/11610>
18. **Ibrahim M. H., Kharmanda G., Charki A.** Reliability-based design optimization for fatigue damage analysis // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 76, Issue 5–8. P. 1021–1030. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6325-2>
19. **Antibas I. R., Dyachenko A. G.** Evaluation of soil force of resistance to penetration with the use of new design of penetrometer's probe tip // *International Journal of Environmental and Science Education*. 2016. Vol. 11, Issue. 18. P. 10941–10950. URL: <http://www.ijese.net/makale/1478>
20. **Антибас И. Р., Дьяченко А. Г.** Технические параметры модифицированной сеялки для высева зерновых культур в тяжелые по механическому составу почвы // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2015. Т. 15, № 3 (82). С. 81–88. DOI: <https://doi.org/10.12737/12592>

Поступила 23.01.2018; принята к публикации 10.04.2018; опубликована онлайн 20.09.2018.

Об авторах:

Антибас Имад Ризакалла, доцент кафедры «Основы конструирования машин», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), кандидат технических наук, Researcher ID: O-4789-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8141-9529>, imad.antypas@mail.ru

Дьяченко Алексей Геннадьевич, доцент кафедры «Основы конструирования машин», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Россия, г. Ростов-на-



Дону, пл. Гагарина, д. 1), кандидат технических наук, Researcher ID: O-4796-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9934-4193>, dyachenko_aleshka@bk.ru

Заявленный вклад соавторов:

И. Р. Антибас – научное руководство, постановка задачи, определение методологии исследования; сбор и анализ аналитических и практических материалов по теме исследования, критический анализ и доработка решения; компьютерная реализация решения задачи. А. Г. Дьяченко – постановка задачи, анализ научных источников по теме исследования, критический анализ и доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Hosseinzadeh R., Shokrieh M., Lessard I. B. Parametric study of automotive composite bumper beams subjected to low-velocity impacts. *J. Composite Structures*. 2005; 68(4):419–427. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.04.008>
2. Corum J. M., Battiste R. L., Ruggles-Wrenn M. B. Low-energy impact effects on candidate automotive structural composites. *J. Composites Science and Technology*. 2003; 63(6):757–769. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00265-8](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00265-8)
3. Thomson J. L. Micromechanical parameters from macromechanical measurements on glass – reinforced polybutyleneterephthalate. *J. Composites*. 2002. Part A. *Applied Science and Manufacturing*. 2002; 33(3):331–339. [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00129-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00129-4)
4. Lee N. J., Jang J. The effect of fiber-content gradient on the mechanical properties of glass-fiber-mat/polypropylene composites. *J. Composites Science and Technology*. 2000; 60(2):209–217. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(99\)00122-0](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(99)00122-0)
5. Meraghnia F., Desrumauxb F., Benzeggagh M. L. Implementation of a constitutive micromechanical model for damage analysis in glass mat reinforced composite structures. *J. Composites Science and Technology*. 2002; 62(16):2087–2097. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00110-0](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00110-0)
6. Rout J., Misra M., Tripathy S. S., Nayak S. K., Mohanty A. K. The influence of fiber treatment on the performance of coir-polyester composites. *J. Composites Science and Technology*. 2001; 61(9):1303–1310. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00021-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00021-5)
7. Netravali A. N., Chabba S. Composites get greener. *Materials Today*. 2003; 6(4):22–29. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(03\)00427-9](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(03)00427-9)
8. Davies P., Petton D. An experimental study of scale effects in marine composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1999; 30(3):267–275. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(98\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(98)00156-0)
9. Richardson M., Zhang Z. Nonwoven hemp reinforced composites. *Reinforced Plastics*. 2001; 45(4):40–44. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(01\)80134-X](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(01)80134-X)
10. Antibas I. R., Dyachenko A. G. Determination of the characteristics of components of composite materials intended for the production of parts of agricultural machinery. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Don State Technical University Bulletin. 2017; 17(3):60–69. DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-3-60-69> (In Russ.)
11. Antibas I. R., Dyachenko A. G. Influence of the content of wood dispersed filler on the durability of composite materials. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Don State Technical University Bulletin. 2017; 17(1):67–74. DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-1-67-74> (In Russ.)
12. Kharmanda G. The safest point method as an efficient tool for reliability-based design optimization applied to free vibrated composite structures. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo univer-*

siteta = Don State Technical University Bulletin. 2017; 17(2):46–55. DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-2-46-55>

13. Yaich A., Kharmanda G., El Hami A., Walha L. Reliability-based design optimization for multi-axial fatigue damage analysis using robust hybrid method. *Journal of Mechanics*. 2017; 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1017/jmech.2017.44>

14. Du X., Chen W. Sequential optimization and reliability assessment method for efficient probabilistic design. *ASME J. Mech. Des.* 2004; 126(2):225–233. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1649968>

15. Steenackers G., Versluys R., Runacres M., Guillaume P. Reliability-based design optimization of computation-intensive models making use of response surface models. *Quality and Reliability Engineering International*. 2011; 27(4):555–568. DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.1166>

16. Lopez R. H., Beck A. T. Reliability-based design optimization strategies based on FORM: A review. *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.* 2012; 34(4):506–514. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-58782012000400012>

17. Kharmanda G., Antypas I. Integration of reliability concept into soil tillage machine design. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Don State Technical University Bulletin. 2015; 15(2):22–31. DOI: <https://doi.org/10.12737/11610>

18. Ibrahim M. H., Kharmanda G., Charki A. Reliability-based design optimization for fatigue damage analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015; 76(5-8):1021–1030. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6325-2>

19. Antibas I. R., Dyachenko A. G. Evaluation of soil force of resistance to penetration with the use of new design of penetrometer's probe tip. *International Journal of Environmental and Science Education*. 2016; 11(18):10941–10950. Available at: <http://www.ijese.net/makale/1478>

20. Antibas I. R., Dyachenko A. G. Technical parameters of a modified seeder for sowing grain crops in heavy soils according to the mechanical composition. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Don State Technical University Bulletin. 2015; 15(3):81–88. DOI: <https://doi.org/10.12737/12592> (In Russ.)

Received 23.01.2018; revised 10.04.2018; published online 20.09.2018.

About authors:

Imad R. Antypas, Associate Professor of Chair of Design Principles of Machines, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: O-4789-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8141-9529>, imad.antypas@mail.ru

Alexey G. Dyachenko, Associate Professor of Chair of Design Principles of Machines, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: O-4796-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9934-4193>, dyachenko_aleshka@bk.ru

Author's contribution:

I. R. Antypas – scientific guidance, statement of the problem, definition of research methodology; collection and analysis of analytical and practical materials on the research topic, critical analysis and finalization of the solution; computer realization of the solution of the problem; A. G. Dyachenko – statement of the problem: analysis of scientific sources on the topic of research, critical analysis and revision of the text.

All authors have read and approved the final version of the paper.



Оптимизация параметров и режимов работы дискового высевающего аппарата по критерию равномерности высева

В. А. Овчинников*, М. Н. Чаткин, А. В. Овчинникова
ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)

*ovchinnikovv81@rambler.ru

Введение. При возделывании сельскохозяйственных культур необходимо учитывать потребность растений во влаге и питательных элементах, размещение по площади питания, определяющую освещенность и т. д. С целью создания благоприятных условий для роста и развития растений применяются различные способы посева с учетом биологических особенностей культур. Важным условием при посеве является равномерное расположение семян вдоль борозды, особенно актуально это при возделывании семенников мелкосеменных культур. Ключевое влияние на равномерность высева оказывают конструктивные параметры и кинематические режимы работы высевающего аппарата.

Материалы и методы. Для определения оптимальных параметров и режимов работы дискового высевающего аппарата были использованы методы дробно-факторного эксперимента и многокритериальной оптимизации. Обработка результатов исследования проводилась с помощью программного комплекса Pareto.

Результаты исследования. На основе экспериментальных исследований были получены математические модели технологического процесса высева семян мелкосеменных культур.

Обсуждение и заключения. Для повышения качества высева мелкосеменных культур конструктивные параметры экспериментального высевающего аппарата (x_4 – диаметр ячейки; x_5 – количество ячеек на диске) будут стремиться к максимальным значениям. Оптимальная окружная скорость высевающего диска должна находиться в диапазоне от 0,127 до 0,192 м/с, а скорость движения агрегата – составлять не более 2 м/с.

Ключевые слова: посев, высевающий аппарат, мелкосеменная культура, равномерность распределения, параметр, кинематический режим, дробно-факторный эксперимент

Для цитирования: Овчинников В. А., Чаткин М. Н., Овчинникова А. В. Оптимизация параметров и режимов работы дискового высевающего аппарата по критерию равномерности высева // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 379–388. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.379-388>



Optimization of Parameters and Operating Modes of Disc Sowing Device According to Seeding Uniformity Criterion

V. A. Ovchinnikov*, M. N. Chatkin, A. V. Ovchinnikova

National Research Mordovia State University

(Saransk, Russia)

*ovchinnikovv81@rambler.ru

Introduction. When cultivating agricultural crops, it is necessary to take into account the plants' need for moisture, nutrients, location by area of nutrition, determining illumination, etc. Taking into account the biological characteristics of crops, various methods of sowing are used to create favorable conditions for plant growth and development. An important condition for sowing is the uniform arrangement of seeds along the sulcus, especially in the cultivation of testes of small-seeded cultures. A key role in the uniformity of seeding is provided by the design parameters and kinematic operating conditions of the sowing device.

Materials and Methods. To determine the optimal parameters and operating modes of the disk sowing device, methods of factor experiment and multi-criteria optimization were used.

Results. Mathematical models of the technological process of sowing seeds were obtained based of experimental studies.

Conclusions. To ensure the improvement of the seeding quality of small seeds, the design parameters of the experimental seeder: x_d – is the diameter of the cell; x_s – the number of cells on the disk, will tend to the maximum values. The optimum circumferential speed of the sowing disk should be in the range from 0.127 to 0.192 m/s, and the speed of the machine's movement is no more than 2 m/s.

Keywords: sowing, sowing apparatus, small-seed cultures, uniformity of distribution, parameter, kinematic regime, factor experiment

For citation: Ovchinnikov V. A., Chatkin M. N., Ovchinnikova A. V. Optimization of Parameters and Operating Modes of Disc Sowing Device According to Seeding Uniformity Criterion. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):379–388. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.379-388>

Введение

Животноводство является одной из стратегических отраслей АПК России в осуществлении Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013–2020 гг., а также Доктрины продовольственной безопасности. Наиболее сложным и трудоемким направлением животноводства является скотоводство. В последние годы, благодаря государственной поддержке данной отрасли, численность крупного рогатого скота постепенно

увеличивается. В связи с этим возникает необходимость производства высококачественных кормов, удовлетворяющих основным потребностям высокопродуктивных животных. Определяющее значение в обеспечении оптимального рациона кормления животных имеют многолетние травы. Они являются универсальным сырьем для приготовления кормов для различных групп животных.

Правильная система организации кормопроизводства предусматривает обязательное наличие посевов семенников трав, агротехника возделывания которых накладывает жесткие требо-



вания к размещению растений на площади питания¹. Установлено, что наиболее эффективным способом посева семенников мелкосеменных культур (люцерна, клевер) является ширококорядный, а именно пунктирно-гнездовой, способствующий успешному плодonoшению. В таких посевах создаются благоприятные для развития растений условия освещения, опыления, температурного, воздушного и водного режимов, что в итоге влияет на качество и количество будущего урожая² [1].

Обзор литературы

Для реализации вышеупомянутого способа используют, как правило, сеялки точного высева с вертикально-дисковыми высевающими аппаратами, отличающиеся простотой конструкции и высокой надежностью. К тому же точка схода семян с дозатора максимально приближена к поверхности почвы, что благоприятно сказывается на равномерности распределения семян в борозде [2].

Многочисленные исследования в области совершенствования посевных машин указывают на то, что именно вертикально-дисковые высевающие аппараты имеют резерв повышения точности дозирования семян при высеве мелкосеменных культур [3–4].

При проектировании аппаратов точного высева необходимо учитывать следующие условия:

– использование данных аппаратов целесообразно при окружной скорости

высевающего диска не выше 0,22 м/с, т. к. с увеличением данного показателя резко возрастает травмированность семян и ухудшается заполняемость ячеек [2; 5];

– оптимальная скорость посева семенников мелкосеменных культур должна находиться в интервале от 1,4 до 2,1 м/с, т. к. в данном диапазоне скоростей наблюдается максимально равномерное распределение семян в борозде^{3–4}.

Материалы и методы

С учетом вышеизложенных условий в ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет» разработан экспериментальный вертикально-дисковый высевающий аппарат для посева мелкосеменных культур (рис. 1) [6–9]. Процесс функционирования вертикально-дискового высевающего аппарата находится в сложной зависимости от множества факторов, каждый из которых оказывает влияние на качественные показатели его работы. На основании поисковых исследований было отобрано несколько факторов, оказывающих наибольшее влияние на равномерность дозирования семян (x_1 – окружная скорость диска; x_2 – скорость МТА; x_3 – глубина ячеек; x_4 – диаметр ячеек; x_5 – количество ячеек на высевающем диске); остальные малозначимыми факторами можно было пренебречь⁵. Обозначим натуральные значения факторов V_d , V_a , h_a , d_a и n_a , которым соответствуют кодовые x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 .

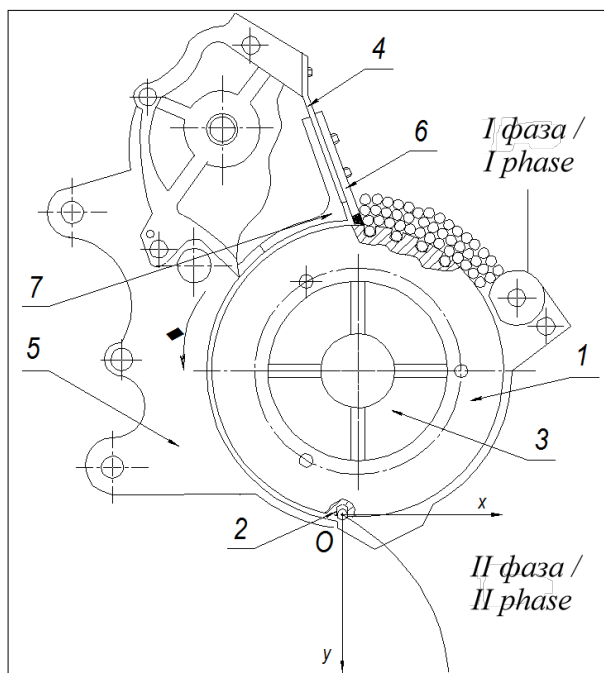
¹ **Обвинников В. А.** Повышение эффективности машин для посева мелкосеменных культур : монография. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2013. 104 с.

² **Обвинников В. А., Драняев С. Б., Жегалин В. В.** Особенности возделывания люцерны на семена // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2013. С. 15–18.

³ **Василенков В. Е.** Обоснование процесса высева семян люцерны малыми нормами усовершенствованным вертикально-дисковым высевающим аппаратом : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Глевах, 1983. 18 с.

⁴ **Paarlberg P. L., Paarlberg D.** The agricultural revolution of the 20th century. Ames : Iowa State University Press, 2001. 154 p.

⁵ **Обвинников В. А.** Совершенствование конструктивно-технологических параметров дискового высевающего аппарата для высева мелкосеменных культур (на примере люцерны) : дис. ... канд. техн. наук. Саранск, 2007. 165 с.



Р и с. 1. Экспериментальный вертикально-дисковый высевной аппарат:
1 – высевной диск; 2 – ячейки; 3 – зубчатка; 4 – планка; 5 – корпус; 6 – отражатель;
7 – вставка

F i g. 1. Experimental vertical disk sowing device: 1 – sowing disk; 2 – cell; 3 – gear; 4 – plank;
5 – hull; 6 – seeds regulator; 7 – insertion

Уровни варьирования факторов выбранны на основании предварительных исследований и представлены в табл. 1.

Для описания процесса посева мелко-семенных культур используем факторно-эксперимент⁶. В каче-

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Интервалы и уровни варьирования факторов /
Intervals and the variation levels of the factors

Независимые факторы (переменные) / Independent factors (variables)		Уровни варьирования / Variation levels		
В кодированном виде / Coded views	В натуральном виде / Natural views	–1	0	+1
x_1	$V_{д^2}$, м/с / $V_{д^2}$, m/s	0,12	0,185	0,25
x_2	$V_{а^2}$, км/ч / $V_{а^2}$, km/h	3,4	5,45	7,5
x_3	$h_{я^2}$, мм / $h_{я^2}$, mm	1	1,5	2
x_4	$d_{я^2}$, мм / $d_{я^2}$, mm	2,5	3,75	5
x_5	$n_{я^2}$, шт / $n_{я^2}$, pc	60	70	80

⁶ Адлер Ю. П., Маркова Е. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. : Наука, 1976. 279 с.



стве параметров оптимизации прием равномерность количества семян в одном гнезде и равномерность среднего расстояния между соседними гнездами.

В табл. 2 представлен план эксперимента $N = 2^{k-1}$ и подсчитаны значения параметров оптимизации.

Исследования опытного образца высевающего устройства проводились на экспериментальном стенде кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Института механики и энергетики. Данный стенд представляет собой почвенный канал

с подвижным модулем и контрольно-измерительным оборудованием⁷. Рабочие элементы экспериментального стенда учитывали особенности испытания рабочих органов сельскохозяйственных машин⁸ [10–12], что позволило провести эксперименты на достаточно высоком уровне.

Результаты исследования

После проведения опытов и обработки экспериментальных данных были получены математические модели технологического процесса высева семян мелкосеменных культур опытным образцом вертикально-дискового высевающего ап-

Т а б л и ц а 2

Table 2

План дробно-факторного эксперимента /
Plan of fractional-factor experiment

Номер опыта / Number of experiment	Независимые факторы / Independent factors					Значения параметров оптимизации / Optimization parameter values	
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	$v(N)$	$v(I)$
1	–1	1	–1	–1	–1	9,3	9,2
2	1	1	1	–1	–1	15,1	4,7
3	–1	1	–1	1	1	13,9	13,8
4	1	1	–1	–1	1	6,5	9,2
5	1	1	1	1	1	2,0	14,6
6	1	1	–1	1	–1	13,7	7,0
7	1	–1	–1	–1	–1	2,8	4,4
8	–1	–1	–1	–1	1	14,8	6,3
9	–1	–1	1	1	1	7,9	3,8
10	1	–1	–1	1	1	2,8	3,9
11	–1	–1	–1	1	–1	4,4	16,4
12	–1	1	1	–1	1	2,8	6,2
13	1	–1	1	1	–1	1,8	4,2
14	–1	–1	1	–1	–1	4,1	5,0
15	1	–1	1	1	1	4,3	13,2
16	–1	1	1	1	–1	2,7	2,5

⁷ Обчинников В. А. Повышение эффективности машин для посева мелкосеменных культур: монография. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2013. 104 с.

⁸ Особенности работы приводных модулей высевающих аппаратов механических зерновых сеялок / В. Ф. Купряшкин [и др.] // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : междуз. сб. науч. трудов. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2013. С. 6–10.

парата в зависимости от его конструктивных и кинематических параметров:

$$v(N) = 10,8 + 3,7 x_1 - 5,7 x_3 + 2,7 x_4 + 4,4 x_5 - 2,5 x_1 x_2 - 3 x_1 x_3 + 3,9 x_1 x_4 + 3,8 x_2 x_3 - 3,5 x_2 x_4 - 5 x_2 x_5 - 5,5 x_3 x_4 - 5,3 x_3 x_5 + x_4 x_5; \quad (1)$$

$$v(l) = 7,8 + 0,63 x_2 - x_3 + 1,1 x_5 + 2,5 x_1 x_3 - 0,73 x_1 x_4 + 1,47 x_1 x_5 + 1,45 x_2 x_5 - x_3 x_4 + 1,57 x_3 x_5. \quad (2)$$

Результаты экспериментов были обработаны с использованием программного комплекса Pareto⁹⁻¹⁰. На основе многокритериальной оптимизации были получены параметры и режимы работы, оптимальные для экспериментального высевающего аппарата. Опытные данные приведены в закодированном виде в табл. 3.

Из анализа уравнений регрессии (1–2), а также данных табл. 3 следует, что глубина и диаметр ячеек (x_3 , x_4) стремятся к максимальным значениям, что благоприятно влияет на параметры оптимизации. Количество ячеек на высевающем диске (x_5) также стремится к максимуму, что дополнительно подтверждено результатами ряда опытов по определению влияния числа ячеек на травмированность семян [13].

Влияние окружной скорости высевающего диска и скорости машинно-тракторного агрегата (МТА) на равномерность высева представлено на рис. 2–3.

Анализируя результаты исследования (рис. 2–3), приходим к выводу, что кинематические режимы работы экспериментального высевающего аппарата оказывают максимальное влияние на равномерность высева семян вдоль

Т а б л и ц а 3

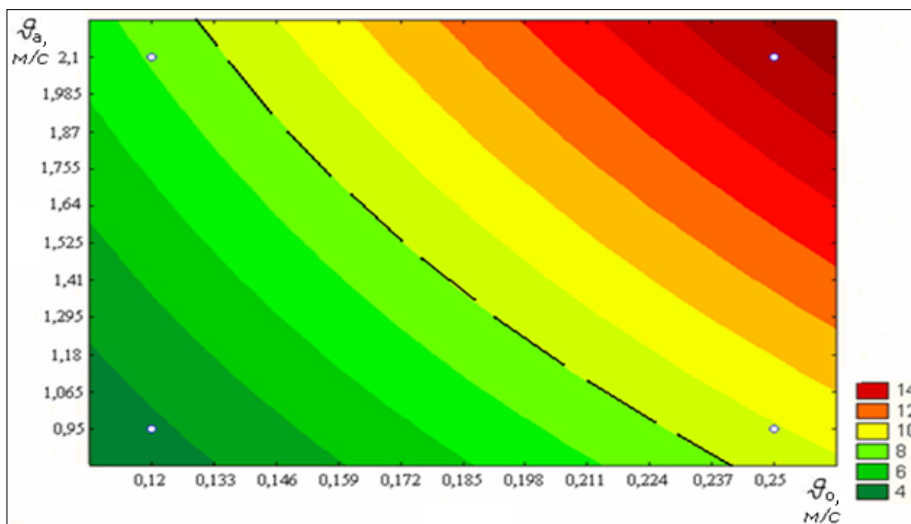
Table 3

Оптимальные значения параметров экспериментального аппарата /
Optimal values of experimental apparatus parameters

Окружная скорость диска, x_1 / Peripheral speed of the disk, x_1	Скорость МТА, x_2 / Sowing speed, x_2	Глубина ячеек, x_3 / Depth of cells, x_3	Диаметр ячеек, x_4 / Diameter of the cell, x_4	Количество ячеек на диске, x_5 / Number of cells on disk, x_5
0,93	0,84	0,95	0,83	0,68
0,80	0,93	0,83	0,97	0,91
0,83	0,74	0,91	0,73	1,00
0,59	0,82	0,89	1,00	0,95
0,91	1,00	0,73	0,91	0,94
0,75	0,59	0,94	0,90	0,74
0,84	0,64	1,00	0,85	0,50
1,00	0,74	0,79	0,84	0,83
0,64	0,50	0,98	0,82	0,79
0,98	0,98	1,00	0,63	0,72
0,77	0,62	0,90	0,79	0,89
0,68	0,91	0,95	0,78	0,93
0,96	0,58	0,96	0,71	0,62
0,78	0,97	0,93	0,87	0,77

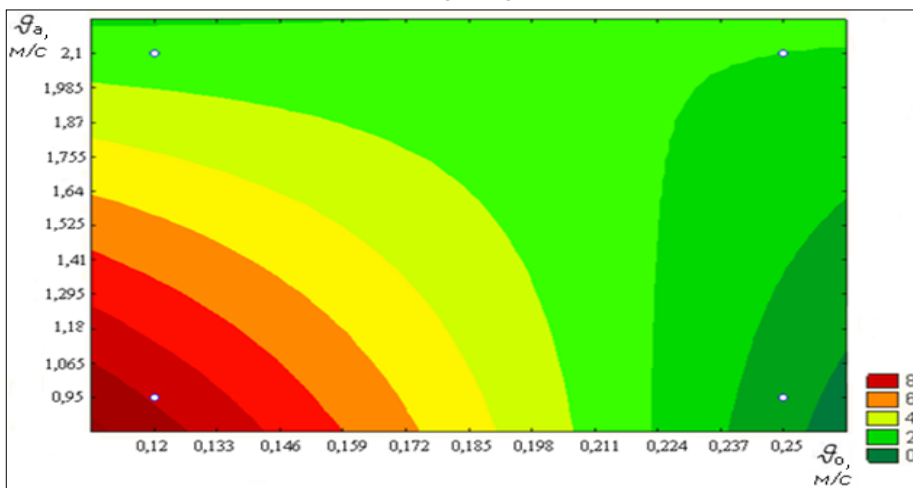
⁹ Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1989. 192 с.

¹⁰ Акимов А. П., Константинов Ю. В. [Оптимизация параметров и режимов функционирования дисков почвообрабатывающих машин и орудий](#). Чебоксары, 2017. 136 с.



Р и с. 2. Влияние окружной скорости диска и скорости МТА на равномерность высева семян вдоль ряда

F i g. 2. The influence of disc peripheral velocity and speed movement of the seed drill for uniform seed sowing along the row



Р и с. 3. Влияние окружной скорости диска и скорости МТА на равномерность числа семян в одном гнезде

F i g. 3. The influence of the circumferential speed of the disc and the speed of the seeder on the uniformity of the number of seeds in one nest

ряда, и минимальное – на равномерность числа семян в одном гнезде.

Обсуждение и заключения

В результате исследования параметров и режимов работы экспериментального высевающего аппарата сеялки для пунктирно-гнездового посева семенни-

ков мелкосеменных культур установлены ее оптимальные параметры: диаметр ячейки – 5 мм; глубина ячейки – 2 мм; число ячеек на диске – 80 шт; окружная скорость диска находится в диапазоне от 0,127 до 0,192 м/с, а скорость агрегата составляет не более 2 м/с.

Technologies and means of agricultural mechanization

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Овчинников В. А., Чаткин М. Н.** Посев семенников люцерны экспериментальным агрегатом // Сельский механизатор. 2013. № 12. С. 8–9. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21283539>
2. **Шварц А. А., Шварц С. А.** Повышение эффективности аппаратов точного высева мелкосеменных культур // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 9. С. 104–110. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-apparatov-tochnogo-vyseva-melkosemennyyh-kultur>
3. **Фирсов А. С., Голубев В. В.** Перспективы развития дисковых высевальных аппаратов // Агротехника и энергообеспечение. 2015. № 1. С. 18–22. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27420748>
4. Результаты лабораторных исследований высевального аппарата с цилиндрами упругодеформируемом кольце / В. Н. Кувайцев [и др.] // Нива Поволжья. 2016. № 2. С. 78–81. URL: <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=32232>
5. **Шварц А. А., Шварц С. А.** Повышение качества посева и универсальности аппарата точного высева // Техника в сельском хозяйстве. 2005. № 3. С. 43–44.
6. **Овчинников В. А.** Влияние угла установки отражателя семян на степень заполнения ячеек дискового высевального аппарата // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. № 4. С. 166–169. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-ugla-ustanovki-otrazhatelya-semyan-na-stepen-zapolneniya-yacheek-diskovogo-vysevalyushego-apparata>
7. **Овчинников В. А., Чаткин М. Н., Драняев С. Б.** Дисковый аппарат для высева мелкосеменных культур // Тракторы и сельхозмашины. 2013. № 9. С. 10–11. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=20658654>
8. **Овчинников Д. А., Овчинников В. А., Чаткин М. Н.** Дисковый высевальный аппарат для мелкосеменных культур // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2015. № 2. С. 75–78. DOI: <https://doi.org/10.12737/12057>
9. **Чаткин М. Н., Овчинников В. А.** Результаты исследований свекловичной сеялки ССТ-12 на посеве семенников люцерны // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. 2007. № 3. С. 68–69. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=9513629>
10. **Купряшкин В. Ф., Наумкин Н. И., Купряшкин В. В.** Исследование устойчивости движения подвижного модуля экспериментальной установки при испытании активных ротационных рабочих органов почвообрабатывающих машин // Вестник Мордовского университета. 2016. Т. 26, № 2. С. 246–258. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.026.201602.246-258>
11. Обоснование параметров динамического стабилизатора устойчивости движения подвижного модуля экспериментального стенда при исследовании активных ротационных рабочих органов почвообрабатывающих машин / В. Ф. Купряшкин [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2017. Т. 27, № 1. С. 52–66. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.027.201701.052-066>
12. Повышение эффективности функционирования универсальной зерновой сеялки СЗУ-6 / В. Ф. Купряшкин [и др.] // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 8, ч. 2. С. 206–211. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=32085>
13. **Овчинников В. А.** Результаты исследований повреждения семян мелкосеменных культур дисковым высевальным аппаратом // Вестник Мордовского университета. 2017. Т. 27, № 2. С. 190–197. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.027.201702.190-197>

Поступила 01.02.2018; принята к публикации 10.04.2018; опубликована онлайн 20.09.2018

Об авторах:

Овчинников Владимир Анатольевич, доцент кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), кандидат технических наук, Researcher ID: O-6834-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0350-8478>, ovchinnikovv81@rambler.ru



Чаткин Михаил Николаевич, профессор кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), доктор технических наук, Researcher ID: O-7004-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, chatkinm@mail.ru

Овчинникова Алена Владимировна, магистрант кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), Researcher ID: O-6853-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2081-2367>, alena2011ovch@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. А. Овчинников – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, подготовка начального варианта текста и формирование выводов; М. Н. Чаткин – проведение критического анализа исследования и доработка текста; А. В. Овчинникова – проведение исследований, компьютерные работы, визуализация, верстка и редактирование текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Ovchinnikov V. A., Chatkin M. N. Seeding alfalfa testes experimental unit. *Selskiy mekhanizator* = Rural Mechanic. 2013; 12:8–9. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21283539> (In Russ.)
2. Schwartz A. A., Schwartz S. A. Increasing the efficiency of precision seeding machines for small seeds. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Kursk State Agricultural Academy Bulletin. – 2015; 9:104–110. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-apparatov-tochnogo-vyseva-melkosemennyh-kultur> (In Russ.)
3. Firsov A. S., Golubev V. V. Prospects for the development of disc seeding machines. *Agrotehnika i energoobespechenie* = Agrotechnics and Power Supply. 2015; 1:18–22. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27420748> (In Russ.)
4. Kuvaytsev V. N., Laryushin N. P., Shukov A. V. The results of laboratory researches of the sowing unit with cylinders elastodeformed. *Niva Povolzhya* = Field of Volga Region. 2016; 2:78–81. Available at: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=32232> (In Russ.)
5. Schwartz A. A., Schwartz S. A. Improving the quality of sowing and versatility of the machine of exact seeding. *Tekhnika v selskom khozyaystve* = Machinery in Agriculture. 2005; 3:43–44. (In Russ.)
6. Ovchinnikov V. A. Influence of the angle of the reflector the degree of filling cells disk sowing apparatus. *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Ulyanovsk State Agricultural Academy Bulletin. 2014; 4:166–169. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-ugla-ustanovki-otrazhatelya-semyan-na-stepen-zapolneniya-yacheek-diskovogo-vysevayuschego-apparata> (In Russ.)
7. Ovchinnikov V. A., Chatkin M. N., Dranyaev S. B. Disk sowing apparatus for small-seeded crops. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2013; 9:10–11. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=20658654> (In Russ.)
8. Ovchinnikov D. A., Ovchinnikov V. A., Chatkin N. M. Disk sowing apparatus for seeding small-seeded crops. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Kazan State Agrarian University Bulletin. 2015; 2:75–78. DOI: <https://doi.org/10.12737/12057> (In Russ.)
9. Chatkin M. N., Ovchinnikov V. A. Results of the research of the beet drill SST-12 on the crop of the alfalfas seed plants. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N. I. Vavilova* = Bulletin of Vavilov Saratov State Agrarian University. 2007; 3:68–69. Available at: <https://doi.org/10.12737/12057> (In Russ.)
10. Kupryashkin V. F., Naumkin N. I., Kupryashkin V. V. Stability of motion of mobile module of experimental setup in the study of active rotary working of machines for soil treatment. *Vestnik Mordovskogo*

universiteta = Mordovia University Bulletin. 2016; 26(2):246–258. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.026.201602.246-258> (In Russ.)

11. Kupryashkin V. F., Naumkin N. N., Knyazkov A. S., Kupryashkina V. N., Shlyapnikov M. G., Kupryashkin V. V., Terekhin E. Yu. Justification for parameters of a dynamic stabilizer of the experimental stand mobile unit in studying of active rotational working tools of tiller machines. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2017; 27(1):52–66. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.027.201701.052-066> (In Russ.)

12. Kupryashkin, V. F., Naumkin N. I., Firstov A. F., Ulanov A. S. Increase of efficiency of functioning of universal grain seeder SZU-6. *Sovremennyye naukoemkie tekhnologii* = Modern Science Intensive Technologies. 2013; 8(2):206–211. Available at: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=32085> (In Russ.)

13. Ovchinnikov V. A. Results of the study of damage to small seeds from the disk sowing apparatus. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2017; 27(2):190–197. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.027.201702.190-197> (In Russ.)

Received 01.02.2018, revised 10.04.2018, published online 20.09.2018

About authors:

Vladimir A. Ovchinnikov, Associate Professor, Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Researcher ID: O-6834-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0350-8478>, ovchinnikovv81@rambler.ru

Mikhail N. Chatkin, Professor, Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: O-7004-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, chatkinm@mail.ru

Alena V. Ovchinnikova, Master Degree Student, Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Researcher ID: O-6853-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2081-2367>, alena2011ovch@yandex.ru

Authors' contribution:

V. A. Ovchinnikov managed the research project, developed the theoretical framework, revised the draft and drew the conclusions; M. N. Chatkin critically analyzed the research results and revised the draft; A. V. Ovchinnikova carried out the research, made word processing, editing, and visualization of the results.

All authors have read and approved the final version of the paper.



Исследование качественных характеристик льноволокна в зависимости от конструкции очесывающего аппарата

А. В. Галкин*, Д. Г. Фадеев, И. В. Ущиповский
ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт механизации льноводства» (г. Тверь, Россия)

*vniml@vniml.ru

Введение. Процесс уборки льна-долгунца характеризуется активным взаимодействием рабочих органов льноуборочных машин с частями растения. Различные принципы и конструкции адаптеров для очеса коробочек от стебля льна-долгунца, используемые в льноуборочных машинах, имеют не только положительные, но и отрицательные стороны. Наиболее эффективен однобарабанный гребневый очесывающий аппарат, однако у него отмечается повышенный уровень повреждений стеблей и их отход в путанину. Цель данной работы – экспериментальное обоснование конструктивных изменений гребневого очесывающего аппарата, позволяющих снизить повреждения стеблей льна-долгунца в процессе очеса и повысить качество льносырья.

Материалы и методы. Полевые и лабораторные исследования по уборке льна-долгунца и технологической оценке льносырья и волокна проводились по существующим методикам и действующим ГОСТам. Определялось влияние скорости уборочного льнокомбайна и типа очесывающе-транспортирующего барабана на выход и качество волокна. В качестве объекта использовался лен-долгунец сорта Алексим, а уборка проводилась в фазе полной спелости – желтой.

Результаты исследования. Для снижения повреждений стеблей льна использована конструкция очесывающего барабана с тремя гребнями вместо четырех, учитывающая, что в слое вытеребленных стеблей находится только один очесывающий гребень. Данная мера позволила снизить повреждения стеблей и их отход в путанину в процессе очеса. В вариантах с трехгребневым барабаном качество льнотресты составило 0,97–1,09 номера, что на 0,19–0,28 номера выше, чем при использовании четырехгребневого барабана.

Обсуждение и заключения. Снижение нагрузки на стебель льна при очесе положительно влияет на характеристики волокнистой продукции. Так, при использовании трехгребневого барабана выход длинного волокна увеличился на 1,27–1,54 % (абс.), а качество – на 0,3 номера по сравнению с классическим.

Ключевые слова: лен-долгунец, уборка, коробочка, очес, очесывающий барабан, волокно, гребневый барабан

Для цитирования: Галкин А. В., Фадеев Д. Г., Ущиповский И. В. Исследование качественных характеристик льноволокна в зависимости от конструкции очесывающего аппарата // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 389–399. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.389-399>



Studying Quality Characteristics of Flax Fiber Depending on Deseeding Device Design

A. V. Galkin, D. G. Fadeev, I. V. Uschapovsky
*All Russian Research Institute for Flax Production
(Tver, Russia)*

*vniiml@vniiml.ru

Introduction. The process of harvesting fiber flax is characterized by tough interactions of the work tools of the flax puller and parts of plants. Different principles and design of work tools for taking out seed bolls from the stem, used in flax harvesting machines, have both advantages and disadvantages. Single-drum comb deseeders are the most effective, but the level of damage to the stems caused during the working of these mechanisms is high. The purpose of this work is the experimental substantiation of constructive changes in the comb deseeders, which allows reducing damage to the stems of the flax fiber in the process of combing and improving the quality of the flax material.

Materials and Methods. Fields and laboratories studies of flax harvesting and technological tests of flax straw and fiber were carried out according to the existing methods and standard protocols (GOST). The influence of the harvesting combine speed and deseeders type (the drum for the taking flax balls off by the stems' combing and for the transporting removed balls to hopper) on the yield and quality of the fiber were determined. The fiber flax variety Alexim (cultivated by All Russian Research Institute for Flax Production, Torzhok) was used as a plant object and the harvesting was carried out in the vegetation stage "yellow stem" – "full ripeness".

Results. The classical design of the combing drum with four ridges for deseeding was changed to three ones that means only one of ridges should be in the layer of flax stems during the combing process. That design could decrease damage to the stems when deseeding stems. Instrumental assessment of fiber shows that after the deseeding by the three-ridges drum the quality of flax straw was 0.97–1.09 numbers that was by 0.19–0.28 numbers higher than after using four-ridges drums.

Conclusions. The obtained data indicate that the reducing of the load on the flax stems has a positive effect on the quality of the fibrous products. The yield of long fiber increases by 1.27–1.54% (abs.), and the fiber quality – by 0.3 numbers.

Keywords: fiber flax, harvesting, deseeding, flax ball, combing drum, fiber, comb drum

For citation: Galkin A. V., Fadeev D. G., Uschapovsky I. V. Studying Quality Characteristics of Flax Fiber Depending on Deseeding Device Design. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):389–399. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.389-399>

Введение

Конкурентоспособность льняного комплекса России во многом зависит от возможности льносеющих и льноперерабатывающих предприятий обеспечить потребности отечественного и международного рынка в качественном длинном волокне, что возможно не только за счет повышения урожайности льна, но и за счет увеличения качества льнопродукции [1–2]. В процессе уборки льна

происходит активное взаимодействие растения и рабочих органов льноуборочных машин, что может негативно сказываться на выходе и качестве волокна и семян [3]. Наиболее распространенная в льносеющих хозяйствах комбайновая технология уборки предполагает использование льноуборочных комбайнов типа ЛК-4А, осуществляющих теребление льна одновременно с очесом коробочек¹. Это позволяет в ограниченные

¹ Ковалев М. М., Галкин А. В., Фадеев Д. Г. [Модернизация льнокомбайнов для повышения качества очеса лент льна-долгунца](#) // Производство льнопродукции на основе современных технологий возделывания и переработки льна : мат-лы конф. 2013. С. 106–109.



сроки формировать как волокнистую, так и семенную части урожая. Разработка технических средств и рабочих органов льноуборочных машин обусловлена стремлением максимально возможного сохранения сортового потенциала выращенного льносырья на каждом этапе уборки².

В процессе комбайновой и раздельной технологий уборки льна-долгунца после основной операции («теребление») проводится следующая по важности технологическая операция – «очесывание семенных коробочек»³. Эффективность очеса влияет на количественные и качественные характеристики урожая льна-долгунца⁴. Однако конструктивные особенности рабочих органов, используемых для очеса в российских и зарубежных уборочных машинах (льнокомбайнах, подборщиках-очесывателях), при выполнении технологической операции могут оказывать дополнительное механическое воздействие на стебель растения, что опосредованно снижает качественные и количественные характеристики получаемого льносырья.

Обзор литературы

Очес – технологическая операция по отделению листьев, семян, соцветий (в т. ч. коробочек) от стеблей при убор-

ке сельхозкультур; применяется в технологиях производства лубяных, лекарственных и др. растений. В льноводстве для отделения семенной части растения от стебля используются многочисленные методы⁵⁻⁶ и разнообразные устройства⁷ [4]. Рациональный баланс между достоинствами и недостатками каждого из известных очесывающих аппаратов⁸⁻⁹ позволяет находить свою нишу в использовании всего многообразия технических средств при уборке культур и учитывать особенности технологического процесса.

1. *Плющильные и клавишные*. Достоинства: незначительные повреждения стеблей и семян, количество потерь минимально; недостатки: ограничения по влажности убираемого льна.

2. *Вальцово-дековые*. Достоинства: компактность конструкции и высокая производительность; недостатки – ограничения по влажности убираемого льна.

3. *Однорарабанные гребневые*. Достоинства: высокая надёжность, независимость от характеристик влажности сырья, одновременный очес и транспортирование вороха; недостатки: повреждения и потери стеблей.

4. *Двухрарабанные гребневые*. Достоинства: высокая чистота отделения

² Cultivation of flax / A. Marchenkov [et al.] // [Flax: the genus Linum](#) / Ed. by A. D. Muir, N. D. Westcott. London ; New York : Taylor & Francis Group. 2003. P. 74–91.

³ Ковалев М. М., Галкин А. В. [Машинные технологии производства льнопродукции и их эффективность](#) // Инновационные процессы – основа модели стратегического развития АПК в XXI веке. 2011. С. 62–64.

⁴ Поздняков Б. А., Ковалев М. М. [Организационно-экономические аспекты технологизации льняного комплекса](#) : монография. Тверь : ГУПТО Тверская областная типография, 2006. 208 с.

⁵ Галкин А. В. [Классификация и анализ схем очесывающих систем льноуборочных машин](#) // Актуальные проблемы аграрной науки и практики : сб. науч. тр. по мат-лам Междунар. науч.-практ. конф. Тверь, 2005. С. 247–250.

⁶ Шишин Д. А. [Классификация очесывающих аппаратов](#) // Машинно-технологическая модернизация льняного агропромышленного комплекса на инновационной основе : сб. науч. тр. ВНИИМЛ. Тверь, 2014. С. 104–109.

⁷ Фадеев Д. Г. [Классификация и анализ схем очесывающих аппаратов льноуборочных машин](#) // Инновационные разработки для производства и переработки лубяных культур : мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. ФГБНУ ВНИИМЛ (г. Тверь, 18 мая 2017 г.). Тверь, 2017. С. 224–235.

⁸ Еругин А. Ф. [Обоснование процессов, средств вымолота и очистки семян в селекции и семеноводстве](#) : дис. ... докт. техн. наук. Торжок, 1990. 218 с.

⁹ Ростовцев Р. А. [Повышение качества очеса стеблей льна путем совершенствования технологии и оптимизации параметров и режимов работы очесывающего аппарата](#) : дис. ... канд. техн. наук. Тверь, 2003. 195 с.

продуктов очёса и надёжность; недостатки: значительные повреждения стеблей и высокий уровень потерь в виде путанины.

5. *Щеточные*. Достоинства: мягкое воздействие на части растения; недостатки: низкая чистота и надежность технологического процесса.

6. *Роторно-щелевого типа с динамически активными рабочими органами*. Достоинства: незначительные повреждения стеблей и семян, количество потерь минимально; недостатки: сложность конструктивной схемы, а также сбора и транспортирования продуктов очеса.

7. *Роторно-бильные, роторно-планчатые*. Достоинства: незначительные повреждения и потери стеблей; недостатки: низкая степень чистоты очеса, сложность сбора и транспортирования продуктов очеса, зависимость от влажности сырья.

8. *Вальцово-битерные*. Достоинства: высокая производительность, незначительные потери семян; недостатки: высокая зависимость от влажности сырья, сложность вывода продуктов очеса к последующим рабочим органам.

9. *Вальцово-гребневые*. Достоинства: высокая чистота процесса выделения семян, независимость от влажности; недостатки: большие габариты, материалоемкость, сложность транспортирования продуктов очеса.

Попытки использовать для уборки льна-долгунца метод кошения, адаптируя технологии уборки зерновых или масличных культур с применением зерновых комбайнов и жаток [5–7] обусловлены стремлением снизить затраты на специализированную технику и ускорить процесс уборки. Однако итоговые потери волокна (при средней высоте стерни 7–10 см) могут составлять до 15–18 %, что даже при высоком биологическом урожае льна-долгунца является неблагоприятным результатом. Полученная после приме-

нения зерноуборочного комбайна дезориентированная волокнистая льнопродукция может быть использована лишь для ограниченного спектра продукции: нетканые материалы, изоляционные изделия и др. [8].

Таким образом, для уборки льна-долгунца наиболее эффективным является однобарабанный гребневый аппарат, характеризующийся универсальностью, высокой чистотой очеса и независимостью от влажности сырья. Он используется в большинстве типов льноуборочных машин, в т. ч. наиболее популярном в России и странах ближнего зарубежья льнокомбайне ЛК-4А [9]. Очесывающий барабан данного типа имеет четыре гребня, снабженных лопастями, которые обеспечивают отрыв коробочек от стебля и их вывод в тракторный прицеп.

Недостатком используемой конструкции является повышенный уровень повреждений и потерь стеблей (отход в путанину), что обуславливает необходимость его совершенствования.

Цель данной работы – экспериментальное обоснование конструктивных изменений очесывающих рабочих органов, характеризующихся снижением ударного воздействия на стебли льна-долгунца в процессе очеса коробочек и сохранением урожайных характеристик льносырья.

Материалы и методы

Исследования проводились на экспериментальной базе ФГБНУ ВНИИМЛ (г. Тверь) и опытном поле ВНИИ льна (Торжокский р-н, Тверская обл.). Влияние скорости уборочного льнокомбайна ЛК-4А на выход и качество волокна определялось как минимальное и максимальное, исходя из рекомендаций завода-изготовителя и типа очесывающе-транспортирующего барабана. Объект исследования – лен-долгунец сорта Алексим. Густота стояния растений перед уборкой составила 1 256 шт./кв.м. Уборка льна в желтой



фазе (полной спелости) проводилась согласно СТО АИСТ 1.13-2011¹⁰. Продолжительность вылежки льносоломы в тресту составила 25 сут. Технологическая оценка льносырья проведена по методике ВНИИЛ и действующих ГОСТ 10330-76 «Лен трепаный. Технические условия»¹¹ и ГОСТ 24383-89 «Треста льняная. Требования при заготовках»¹² с использованием следующего оборудования: мяльно-трепального станка СМТ-200М, трепальной машины ТЛ-40А, мялки КЛ-25А, разрывной машины РМ-30-1. Повторность опытов – трехкратная.

Схема исследования предполагала следующие варианты:

I – трехгребневый очесывающе-транспортирующий барабан, скорость агрегата $v_M = 1,5$ м/с;

II – трехгребневый очесывающе-транспортирующий барабан, скорость агрегата $v_M = 3,4$ м/с;

III – четырехгребневый очесывающе-транспортирующий барабан, скорость агрегата $v_M = 1,5$ м/с;

IV – четырехгребневый очесывающе-транспортирующий барабан, скорость агрегата $v_M = 3,4$ м/с.

Результаты исследования

Оценка процесса очеса и качества работы четырехгребневого очесывающего барабана льнокомбайна показала, что при очесе семенных коробочек на стебли льна одновременно воздействуют два гребня: первый завершает прочес верха стеблей с коробочками, а второй в это время начинает входить в натянутый первым гребнем слой (рис. 1, а). Это дополнительное механическое воздействие второго гребня, не улучшающее процесс очеса, приводит к увеличению повреждений, перекосу стеблей в слое и их выдергиванию в путанину.

Для устранения данного недостатка было предложено использовать в очесывающем барабане три гребня вместо четырех [10], когда в слое стеблей находится только один гребень, а второй не входит в этот момент в слой (рис. 1, б). При этом условия для выдергивания стеблей из зажимного устройства, а также повреждения стеблей и их отход в путанину минимальны. Для более детального анализа степени повреждения необходима инструментальная оценка льносырья и волокна.

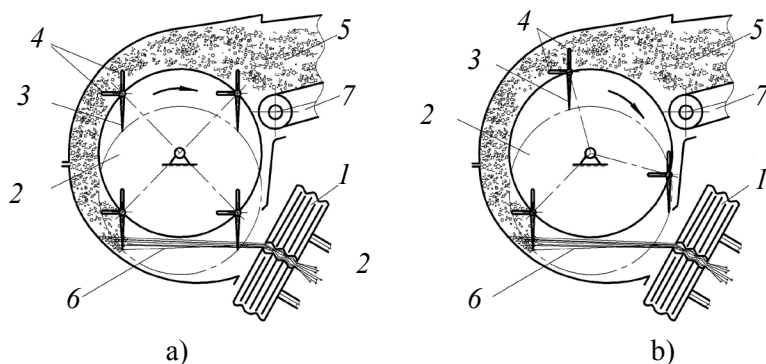
На рис. 2 схематически изображены силы, действующие на стебли льна в процессе очеса семенных коробочек при входе гребней в слой стеблей (I зона) и выходе из него (II зона). При работе четырехгребневого барабана сила воздействия (P) зубьев гребней на ленту льна была отмечена как в зоне I, так и в зоне II; у трехгребневого барабана данное сложение сил отсутствует. Таким образом, воздействие гребней на стебли минимизировано, а значит, уменьшается повреждение и отход стеблей в путанину.

Инструментальная оценка льносоломой показала, что уменьшение числа очесывающих гребней влияет на разрывную нагрузку стеблей, которая по вариантам составила: I – 26 Н, II – 26 Н, III – 22 Н, IV – 22 Н, что показывает увеличение качества и пригодности льносоломой в вариантах с трехгребневым барабаном по сравнению с четырехгребневым. Показатель пригодности – 0,94–0,96 ед., где пригодность в варианте с тремя гребнями – 0,96. Все это подтверждает уменьшение воздействия трехгребневого барабана на стебли по сравнению с серийным четырехгребневым барабаном.

¹⁰ СТО АИСТ 1.13-2011 Испытания сельскохозяйственной техники. Машины для внесения удобрений, машины для послевборочной обработки зерна, машины для уборки картофеля, овощных и бахчевых культур, плодов и ягод, льна, погрузочно-разгрузочные и транспортные средства. Показатели назначения и надежности. Москва : ФГБНУ «Росинформагротех», 2013. 52 с.

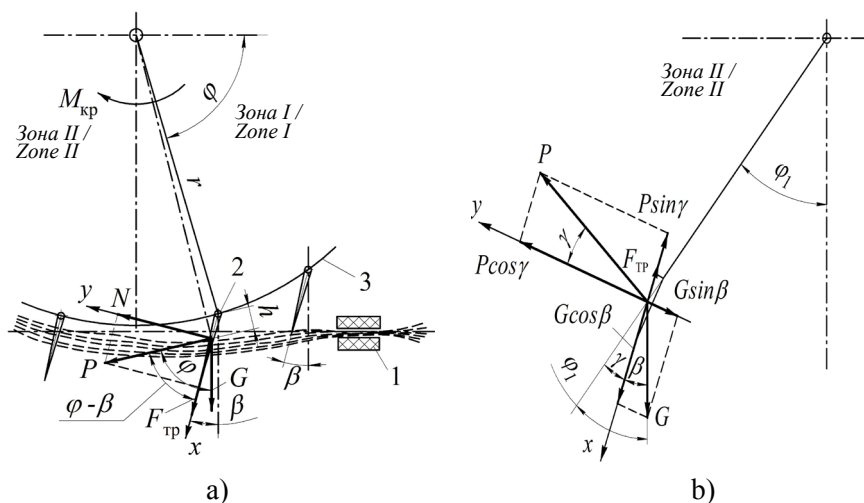
¹¹ ГОСТ 10330-76 «Лен трепаный. Технические условия».

¹² ГОСТ 24383-89 «Треста льняная. Требования при заготовках».



Р и с. 1. Схемы очеса льна очесывающе-транспортирующими барабанами: а) четырехгребневый; б) трехгребневый (1 – зажимной транспортер; 2 – диски барабана; 3 – гребни; 4 – лопасти; 5 – выходное окно камеры очеса; 6 – растения льна; 7 – транспортер вороха)

F i g. 1. Schemes of fiber flax deseeding by combing-conveying drums: а) four-ridged; б) three-ridged (1 – clamping conveyor; 2 – discs of the drum; 3 – combing ridge; 4 – blades; 5 – outlet window of deseeding chamber; 6 – plants of fiber flax; 7 – heaps conveyor)



Р и с. 2. Схема сил, действующих на стебли при очесе семенных коробочек в первой (а) и второй (б) зонах: 1 – зажимной транспортер; 2 – гребни с зубьями; 3 – диск очесывающего барабана (G – сила тяжести; N – сила нормального давления зубьев на стебли; $F_{тр}$ – сила трения; P – сила воздействия зубьев гребней на ленту льна; $M_{кр}$ – крутящий момент; r – радиус барабана; r_n – радиус прочеса; γ – угол между нормалью к поверхности зуба и направлением воздействия зубьев на стебли; φ – угол поворота барабана; β – угол наклона зубьев гребня)

F i g. 2. Scheme of forces acting on stems during deseeding (seed bolls removing) in first (a) and in second (b) zones: 1 – clamping conveyor; 2 – combing ridge; 3 – disc of the combing drum (G – force of gravity; N – force of normal pressure of teeth on stalks;

$F_{тр}$ – friction force; P – force of the ridge teeth on the flax stems; $M_{кр}$ – twisting moment; r – radius of the drum; r_n – radius of the deseeding; γ – angle between the normal to the surface of the tooth and the direction of the action of the teeth on the stems; φ – angle of drum rotation; β – angle of inclination of ridge teeth)



Результаты инструментальной оценки качества льнотресты
Results of flax straw quality tests

Номер варианта / Number of option	Вариант / Options	Выход длинного волокна со станка CMT-200, % / Outlet of long fiber CMT-200 testor, %	Процентно- номер волокна / Percentage number of flax fiber	Номер льнотресты / Number of flax retted straw	
				По ГОСТ / According to GOST	Интерполи- рованный / Interpolation
I	Трехребневый барабан, $v_i = 1,5$ м/с / Three-ridged drum, $v_i = 1,5$ m/sec	14,64	146	1,00	1,09
II	Трехребневый барабан, $v_i = 3,4$ м/с / Three-ridged drum, $v_i = 3,4$ m/sec	13,40	134	0,75	0,97
III	Четырехребневый барабан, $v_i = 1,5$ м/с / Four-ridged drum, $v_i = 1,5$ m/sec	11,56	116	0,75	0,81
IV	Четырехребневый барабан, $v_i = 3,4$ м/с / Four-ridged drum, $v_i = 3,4$ m/sec	10,91	109	0,75	0,78

Из табл. 1 видно, что в вариантах I–II качество льнотресты составило 0,97–1,09 номера, что на 0,19–0,28 номера выше, чем в вариантах III–IV.

Последующая технологическая оценка тресты подтвердила более высокие показатели качества в вариантах с использованием трехребневого барабана: выход длинного волокна и качество льнотресты на 1,27–1,54 % (абс.) выше, чем у серийного (табл. 1–2).

Различие результатов по выходу длинного волокна между рассматриваемыми барабанами статистически доказуемо. Критерий Фишера: $F_{\text{факт}} = 10,2 > F_{\text{табл}} = 3,0$.

Изменения номера длинного волокна по вариантам были меньше, чем изменения показателя выхода волокна (табл. 2). Инструментальная оценка

трепаного волокна указывает на его более высокое качество при очесе в опытных барабанах.

Обсуждение и заключения

Конструктивные изменения очесывающих барабанов, снижающие дополнительные воздействия на стебли льна, положительно влияют на выход и качество длинного волокна. Характеристики параметров технологического процесса (чистота очеса, потери семян) у опытного барабана были несколько ниже, чем серийного, однако соответствовали агротехническим требованиям, предъявляемым к данной машине. Улучшения были отмечены по следующим параметрам: разрывная нагрузка и номер льносоломы, номер льнотресты и длинного волокна, процент выхода длинного волокна.

Таблица 2
Table 2

Результаты переработки льнопресты на волокно
Results of primary processing retted straw into fiber

Номер варианта / Number of option	Вариант / Options	Общее содержание волоконистых веществ, % / Sum of total fiber, %	Длинное волокно / Long flax fiber			Короткое волокно / Short flax fiber			Процентнономер всего волокна / Percentage number of total fiber
			Выход, % / Out-let, %	Средний номер / Average number	Процентнономер / Percentage number	Выход, % / Out-let, %	Средний номер / Average number	Процентнономер / Percentage number	
I	Трехребневый барабан, $v_i = 1,5$ м/с / Three-ridged drum, $v_i = 1,5$ m/sec	24,42	9,85	9,34	92,00	14,57	3	43,7	135,7
II	Трехребневый барабан, $v_i = 3,4$ м/с / Three-ridged drum, $v_i = 3,4$ m/sec	24,80	9,75	9,14	87,80	15,05	3	45,2	133
III	Четырехребневый барабан, $v_i = 1,5$ м/с / Four-ridged drum, $v_i = 1,5$ m/sec	24,28	8,48	9,01	76,40	15,80	3	47,4	123,8
IV	Четырехребневый барабан, $v_i = 3,4$ м/с / Four-ridged drum, $v_i = 3,4$ m/sec	23,94	8,31	8,84	73,50	15,63	3	46,9	120,4



Полученные результаты свидетельствуют о перспективе использования традиционного метода уборки льна-долгунца (теребления с последующим очесом) и возможности его совершенствования для увеличения урожайности и качества длинного волокна.

В целом экспериментальные данные подтвердили, что дополнительные воздействия на стебли льна, возника-

ющие при использовании четырех-гребневого очесывающего аппарата, могут быть уменьшены за счет улучшения конструкции барабана путем изменения количества очесывающих гребней. Применение трехгребневого барабана позволяет увеличить выход длинного волокна на 1,27–1,54 % (абс.), а качество – на 0,3 номера по сравнению с четырехгребневым.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Uschapovsky I.** The Russian flax sector: bottlenecks and solutions // Journal of Natural Fibers. 2009. Vol. 6, no. 1. P. 108–113. DOI: <https://doi.org/10.1080/15440470802704404>
2. Системные проблемы льнокомплекса России и зарубежья, возможности их решения / И. В. Ущиповский [и др.] // Молочнохозяйственный вестник. 2017. Т. 25, № 1. С. 166–186. URL: <http://molochnoe.ru/journal/articles/author/952>
3. **Ковалев М. М., Галкин А. В., Фадеев Д. Г.** Анализ процесса очеса стеблей // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2010. № 8. С. 10–11. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25015516>
4. **Круглень В. Е., Левчук В. А., Цайц М. В.** Устройства для отделения семенных коробочек от стеблей-очесывающие аппараты // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. 2015. Т. 14, № 1. С. 172–182. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25378778>
5. **Foulk J. A., Akin D. E., Dodd R. B.** Fiber flax farming practices in the southeastern United States // Crop Management. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1094/CM-2003-0124-01-MG>
6. Optimising flax production in the South Atlantic region of the USA / J. A. Foulk [et al.] // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2004. Vol. 84. P. 870–876. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.1738>
7. **Heller K.** The technologies of fibrous crops (flax and hemp) growing and processing in sustainable and multifunctional development of agriculture. Fragmenta Agronomica. 2007. Vol. 24. P. 181–186. URL: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=PL2008000488>
8. Research on new technology of fiber flax harvesting / J. Mańkowski [et al.] // Journal of Natural Fibers. 2017. Vol. 15, no. 1. P. 53–61. DOI: <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1302390>
9. A comparative study between Europe and China in crop management of two types of flax: linseed and fibre flax / K. Heller [et al.] // Industrial Crops and Products. 2014. Vol. 68. P. 24–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.07.010>
10. Патент 41566 Российская Федерация, МПК A01D 45/06 (2000.01). Очесывающее устройство льноуборочной машины / М. М. Ковалев, В. Г. Черников, В. П. Козлов, А. В. Галкин, А. В. Журавлев, В. Д. Манойло; № 2004118909/22; заявл. 24.06.2004, опубл. 10.11.2004, бюл. № 31.

Поступила 09.04.2018; принята к публикации 29.05.2018; опубликована онлайн 20.09.2018

Об авторах:

Галкин Алексей Васильевич, ученый секретарь, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт механизации льноводства» (170041, Россия, г. Тверь, Комсомольский пр., д. 17/56), кандидат технических наук, Researcher ID: G-9122-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3779-0267>, a.galkin@vniiml.ru

Фадеев Денис Геннадьевич, старший научный сотрудник лаборатории «Возделывания и уборки лубяных культур», ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт механизации льноводства» (170041, Россия, г. Тверь, Комсомольский пр., д. 17/56), Researcher ID: G-9196-2018, <https://orcid.org/0000-0003-0805-6650>, d.fadeev@vniiml.ru

Ушаповский Игорь Валентинович, доцент, заместитель директора по научной работе, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт механизации льноводства» (170041, Россия, г. Тверь, Комсомольский пр., д. 17/56), кандидат биологических наук, Researcher ID: V-2159-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0602-1211>, vniiml@vniiml.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. В. Галкин – научное руководство, подготовка первоначального варианта текста, проведение экспериментов; Д. Г. Фадеев – проведение экспериментов, подготовка литературного обзора, анализ и дополнение текста статьи; И. В. Ушаповский – проведение критического анализа материалов, формирование выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Ushchapovsky I. The Russian flax sector: bottlenecks and solutions. *Journal of Natural Fibers*. 2009; 6(1):108–113. DOI: <https://doi.org/10.1080/15440470802704404>
2. Ushchapovskiy I. V., Novikov E. V., Basova N. V., Bezbabchenko A. V., Galkin A. V. System problems of flax growing in Russia and abroad, the possibilities of their solution. *Molochnohozyaystvennyy vestnik* = Dairy Bulletin. 2017; 25(1):166–186. Available at: molochnoe.ru/journal/articles/author/952 (In Russ.)
3. Kovalev M. M., Galkin A. V., Fadeev D. G. [Analysis of the process of stems combing]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva* = Mechanization and Electrification of Agriculture. 2010; 8:10–11. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25015516> (In Russ.)
4. Kruglenya V. Ye., Levchuk V. A., Tsayts M. V. Device for separating the seed pods from the stem stripper machines. *Konstruirovaniye, ispolzovaniye i nadezhnost mashin selskokhozyaystvennogo naznacheniya* = Design, Use and Reliability of Agricultural Machines. 2015; 14(1):172–182. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25378778> (In Russ.)
5. Foulk J. A., Akin D. E., Dodd R. B. Fiber flax farming practices in the southeastern United States. *Crop Management*. 2003. 2(1). DOI: <https://doi.org/10.1094/CM-2003-0124-01-MG>
6. Foulk J. A., Akin D. E., Dodd R. B., Fredericks J. R. Optimising flax production in the South Atlantic region of the USA. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2004; 84:870–876. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.1738>
7. Heller K. The technologies of fibrous crops (flax and hemp) growing and processing in sustainable and multifunctional development of agriculture. *Fragmenta Agronomica*. 2007; 24:181–186. Available at: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=PL2008000488>
8. Mańkowski J., Maksymiuk W., Sychalski G., Kołodziej J., Kubacki A., Kupka D., Pudęko K. Research on new technology of fiber flax harvesting. *Journal of Natural Fibers*. 2017; 15(1):53–61. DOI: <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1302390>
9. Heller K., Sheng Q. C., Guan F., Alexopoulou E., Hua L. S., Wu G. W., Jankauskienė Z., Fu W. Y. A comparative study between Europe and China in crop management of two types of flax: linseed and fibre flax. *Industrial Crops and Products*. 2014; 68:24–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.07.010>



10. Patent 41566 Russian Federation, MPK A01D 45/06 (2000.01). Flossing machine for flax harvesting machine. Authors: Kovalev M. M., Chernikov V. G., Kozlov V. P., Galkin A. V., Zhuravlev A. V., Manoylo V. D.; No. 2004118909/22; declared: 24.06.2004, published: 10.11.2004, bulletin no. 31. (In Russ.)

Received 09.04.2018; revised 29.05.2018; published online 20.09.2018

About authors:

Alexey V. Galkin, Scientific Secretary, All Russian Research Institute for Flax Production (17/56, Komsomolskiy Prospekt, Tver 170041, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: G-9122-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3779-0267>, a.galkin@vniiml.ru

Denis G. Fadeev, Senior Researcher, Bast Crops Cultivation and Harvesting Laboratory, All Russian Research Institute for Flax Production (17/56, Komsomolskiy Prospekt, Tver 170041, Russia), Researcher ID: G-9196-2018, <https://orcid.org/0000-0003-0805-6650>, d.fadeev@vniiml.ru

Igor V. Uschapovsky, Associate Professor, Deputy Director for Research, All Russian Research Institute for Flax Production (17/56, Komsomolskiy Prospekt, Tver 170041, Russia), Ph.D. (Biology), Researcher ID: V-2159-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0602-1211>, vniiml@vniiml.ru

Authors' contribution:

A. V. Galkin – research supervision, writing the draft, implementation of experiments; D. G. Fadeev – implementation of experiments, reviewing the relevant literature, analyzing and supplementing the text; I. V. Uschapovsky – critical analysis of materials, drawing the conclusions.

All authors have read and approved the final version of the paper.



Обоснование конструкции динамометрического модуля для исследования лемешно-отвального плуга мотоблока и его практическая апробация с использованием технологий реверс-инжиниринга

В. Ф. Купряшкин*, А. С. Уланов, Н. И. Наумкин
ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)
*kupwfs@mail.ru

Введение. Вспашка почвы, являясь одной из главных операций при возделывании сельскохозяйственных культур, одновременно требует значительных энергетических затрат и эффективного использования почвообрабатывающих машин, в частности, мотоблока с плугом. Анализ исследований работы мотоблока показывает, что объектом возмущений при вспашке является его рабочий орган (в данном случае плуг), на который действуют нормальные и касательные силы взаимодействия корпуса плуга с почвой (R_x , R_y , R_z), которые могут быть определены путем пространственного динамометрирования плужного корпуса. Исходя из вышесказанного, цель исследования – разработка динамометрического модуля и изучение лемешно-отвального корпуса плуга мотоблока с применением технологий реверс-инжиниринга на основе 3D-сканирования.

Материалы и методы. Из анализа литературных и патентных источников следует, что для пространственного динамометрирования корпусов лемешно-отвальных плугов необходимо разработать достаточно простое и функциональное устройство, позволяющее путем динамометрирования определить силы R_x , R_y и R_z с достаточно высокой точностью. Для решения этой проблемы была предложена конструкция устройства, на которое авторами получено удостоверение на рационализаторское предложение № 1173 «Экспериментальный модуль для динамометрирования лемешно-отвального корпуса плуга» (22.01.2018 г., ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва»). *Результаты исследования.* На основе расчетных схем был спроектирован и изготовлен динамометрический модуль, определены его геометрические параметры, проведены исследования плуга мотоблока в лабораторных условиях с установлением графических и аппроксимирующих силовых зависимостей взаимодействия плуга с почвой.

Обсуждение и заключения. Полученные аппроксимирующие уравнения позволяют проанализировать характер изменения сил взаимодействия лемешно-отвального корпуса плуга мотоблока с почвой и установить пределы их варьирования. Кроме этого, использование аппроксимирующих силовых зависимостей позволяет определить степень их влияния на устойчивость плуга и тяговые характеристики мотоблока в случае соответствующих расчетов.

Ключевые слова: почва, мотоблок, корпус плуга, устойчивость движения, динамометрический модуль, тензометрический датчик, 3D-сканер

© Купряшкин В. Ф., Уланов А. С., Наумкин Н. И., 2018



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.



Для цитирования: Обоснование конструкции динамометрического модуля для исследования лемешно-отвального плуга мотоблока и его практическая апробация с использованием технологий реверс-инжиниринга / В. Ф. Купряшкин [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 400–415. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.400-415>

Благодарности: Работа выполнена при поддержке проекта № 18-013-00342 Российского фонда фундаментальных исследований.

Design of a Dynamometric Module for Studying a Motoblock Share-Moldboard Plow and Its Practical Testing by Using Reverse Engineering

V. F. Kupryashkin*, A. S. Ulanov, N. I. Naumkin

National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

**kupwfw@mail.ru*

Introduction. Plowing is one of the main operations in the cultivation of crops. It requires significant energy costs and efficient use of soil-cultivating machines, e. g. walking tractor (motoblock) with plow in this case. The analysis of work of the walking tractor shows that the object of the disturbances in plowing is its working body, in this case a plow, which is influenced by normal and shear interaction forces between the plow body and soil (R_x , R_y , R_z) which can be determined by spatial dynamometric disruption of the body. The aim of the study is to develop a dynamometric module and to research share-mouldboard plow of the motoblock using reverse engineering based on 3D scan.

Materials and Methods. According to relevant literature and patent sources it is need to design a simple and functional device for the spatial dynamometrical body of share-mouldboard plow. This devise should allow to identify the forces R_x , R_y and R_z with high accuracy by dynamometrical measurements. We developed the device providing the measurement of all forces R_x , R_y and R_z by dynamometrical measurements. The authors received a certificate for rationalization proposal No. 1173 "Experimental module for dynamometrical measurements of share-mouldboard plow body" (22.01.2018. National Research Mordovia State University).

Results. We designed and manufactured a dynamometric module, defined the geometry of this device, and tested the plow of the motoblock in the laboratory with identification of graphical and approximating dependency power of the interaction of the plow with soil.

Conclusions. Obtained approximating equations allow us to analyze the nature of the change of interaction forces of share-mouldboard plow body of motoblock with the soil and calculate the limits their variation. In addition, the use of the power of approximating dependences allow us to determine the extent of their influence on the stability of the plow and the traction characteristics of the motoblock.

Keywords: soil, motoblock, plow body, stability of motion, dynamometric module, strain gauge sensor, 3D scanner

For citation: Kupryashkin V. F., Ulanov A. S., Naumkin N. I. Design of a Dynamometric Module for Studying a Motoblock Share-Moldboard Plow and Its Practical Testing by Using Reverse Engineering. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 3(28):400–415. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.400-415>

Acknowledgments: The work is supported by grant from the Russian Foundation for Basic Research (Project № 18-013-00342).

Введение

Разработка и внедрение наиболее актуальных методов экспериментального и теоретического исследования в области совершенствования сельскохозяйственной техники, а также технологии ее производства и испытаний, является одной из главных задач исследований, направленных на изучение почвообрабатывающих машин и их рабочих органов. В основе решения вышеуказанной задачи лежит анализ или синтез. Решение задачи анализа или синтеза современных технологических установок и объектов вызывает необходимость применения для этого различных последовательных, структурировано выдержанных способов, в частности, построения расчетных моделей их функционирования.

Моделирование одной из важнейших операций сельскохозяйственного производства – вспашки почвы мотоблоком с плугом – открывает путь для решения широкого комплекса задач анализа и синтеза параметров указанной технологической операции с одновременной оптимизацией процесса вспашки в зависимости от технических характеристик пахотного агрегата, условий устойчивости его движения и режимов работы¹⁻⁴ [1–2].

Вспашка почвы, являясь одной из главных операций при возделывании сельскохозяйственных культур, требует значительных энергетических затрат [3–4], поэтому к почвообрабатывающим машинам предъявляются особые требования, соответствие которым необходимо для эффективного использования техники⁵⁻⁷.

Анализ исследований работы почвообрабатывающих машин [5–6] показывает, что объектом возмущений мотоблока при вспашке является его рабочий орган (в данном случае плуг), на который действуют нормальные и касательные силы взаимодействия корпуса плуга с почвой (R_x , R_y , R_z), которые могут быть определены путем пространственного динамометрирования плужного корпуса⁸. Исходя из вышесказанного, цель исследования – разработка динамометрического модуля и изучение лемешно-отвального корпуса плуга мотоблока с применением технологий реверс-инжиниринга на основе 3D-сканирования.

Обзор литературы

В настоящее время существуют различные конструкции испытательных стендов и установок для динамометри-

¹ К вопросу устойчивости работы мотоблока в агрегате с плугом / А. С. Уланов [и др.] // Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК : сб. науч. ст. по мат-лам XII Междунар. науч.-практ. конф. Ставрополь : АГРУС, 2016. С. 144–150.

² [Semi-mounted reversible plough Hektor 1000 : operating manual and parts list](#). Wartberg im Mürital, 1997. 131 p.

³ [Koolen A. J. Soil loosening processes in tillage : analysis, systematics and predictability](#). Wageningen : Veenman, 1977. 159 p.

⁴ [Sakun V. A., Lobatchewsky Ya. P. Langfristige trends in der entwicklung von bodenbearbeitungsgeraten](#) // Agrartechnische berichte. Stuttgart : Institut für Agrartechnik und Universität Hohenheim, 1993. P. 76–82.

⁵ [Купряшкин В. Ф. Устойчивость движения и эффективное использование самоходных почвообрабатывающих фрез. Теория и эксперимент](#). Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2014. 140 с.

⁶ [Уланов А. С., Купряшкин В. Ф. Особенности комплектования состава пахотного агрегата и выбора способа движения мотоблока при вспашке почвы](#) // Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции : мат-лы XIII Междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 548–553.

⁷ [Сельскохозяйственные и мелиоративные машины](#) / Г. Е. Листопад [и др.]. М. : Агропромиздат, 1986. 688 с.

⁸ [Уланов А. С. Основы и способы эффективного функционирования пахотных агрегатов на базе мотоблоков](#) // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. Саранск : Типография Рузаевский печатник, 2016. С. 383–391.



рования лемешно-отвальных корпусов плуга⁹.

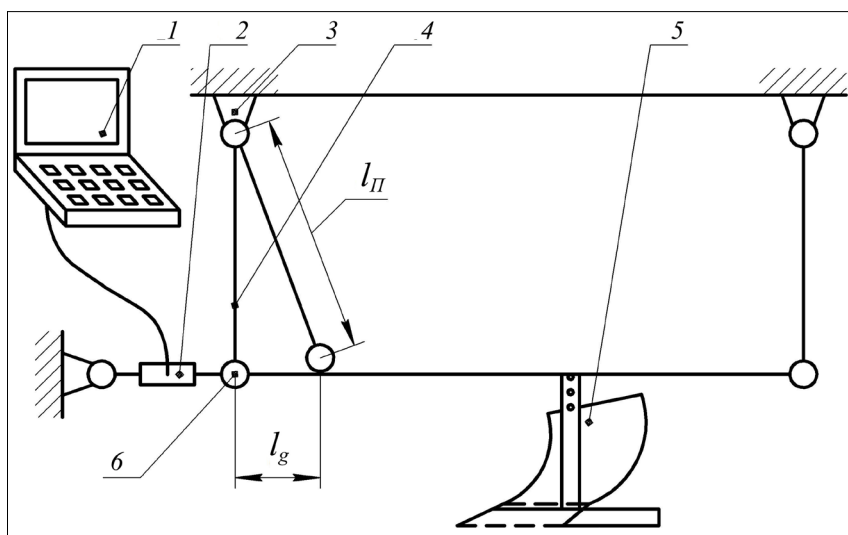
Рассмотрим данные конструкции и особенности их функционирования с учетом силового взаимодействия лемешно-отвального корпуса плуга с почвой.

Для экспериментального определения тягового сопротивления в лабораторных условиях на тяговой тележке почвенного канала кафедры сельскохозяйственных машин ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» была разработана специальная подвесная система, представляющая собой раму, в основе конструкции которой лежит параллелограммный механизм (рис. 1), который крепится к тележке с помощью шарниров¹⁰.

Отличительной особенностью данного механизма является то, что для снижения влияния вертикального перемещения плеча подвески на тензометрические показания плечо параллельного механизма ($l_{\Pi} = 1,15$ м) значительно больше, чем возможность перемещения ($l_{\Delta} = 0,02$ м) S-образного датчика растяжения-сжатия 2, установленного в центре рамки и предназначенного для фиксации усилия от корпуса плуга.

Данная установка характеризуется достаточно простой конструкцией, однако обеспечивает только линейное динамометрирование, которого недостаточно для точного исследования.

В другом исследовании для определения тягового сопротивления корпуса плуга был разработан двухплоскостной



Р и с. 1. Установка для определения тягового сопротивления корпуса плуга
(1 – измерительный комплекс М1С-400В; 2 – тензодатчик; 3 – верхние шарниры;
4 – параллелограммный механизм; 5 – рабочий орган (корпус плуга); 6 – нижние шарниры)

F i g. 1. Installation for determining the traction resistance of the plow body

(1 – M1S-400V measuring complex; 2 – load cell; 3 – upper hinges;
4 – parallelogram mechanism; 5 – working body (plow body); 6 – lower hinges)

⁹ [Анализ существующих конструкций экспериментальных стендов для динамометрирования лемешно-отвального корпуса плуга.](#) / А.Ю. Гусев [и др.] // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : межвуз. сб. науч. тр. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2017. С.

¹⁰ [Фархутдинов И. М. Совершенствование лемешно-отвальной поверхности корпуса плуга на основе моделирования технологического процесса вспашки](#) : дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2012. 176 с.

динамометрический корпус (рис. 2), позволяющий одновременно измерять продольную и поперечную составляющие силы сопротивления почвы¹¹.

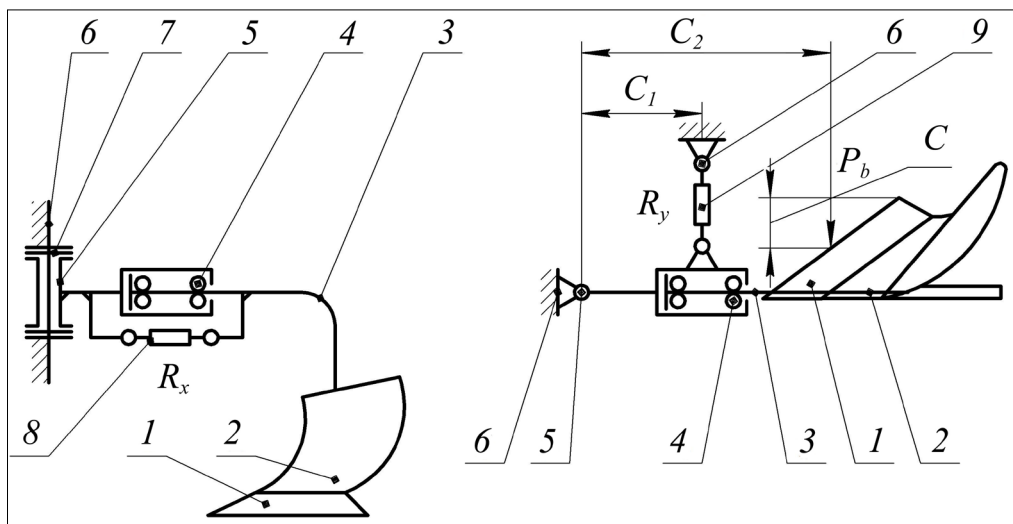
Динамометрический корпус включает в себя лемех 1, отвал 2, грядиль 3, горизонтальную направляющую, оснащенную подшипниками качения 4, и устанавливается посредством вертикального шарнира 5 на раме экспериментальной установки 6. Усилия в горизонтальной и поперечной плоскостях измерялись двумя кольцевыми тензометрическими датчиками 8–9, установленными на динамометрическом корпусе. При этом плужный корпус закрепляется на установку для проведения динамометрирования с демонтированной полевой доской. Высота установки динамометрического корпуса, а также

глубина обработки почвы регулируются с помощью шайб 7.

В динамометрическом корпусе тензозвено 8 непосредственно измеряло продольную составляющую силы сопротивления почвы R_x . Боковая составляющая силы сопротивления почвы P_6 определяется из уравнения моментов в горизонтальной плоскости относительно вертикального шарнира 5. Данная сила P_6 , действуя на рабочую поверхность в горизонтальной плоскости, стремится повернуть корпус вокруг шарнира 5 и растягивает тензозвено силой R_y .

Запишем выражение для P_6 :

$$P_6 = R_y \frac{C_1}{C_2}, \quad (1)$$



Р и с. 2. Схема динамометрического корпуса (1 – лемех; 2 – отвал; 3 – грядиль; 4 – подшипники качения; 5 – вертикальный шарнир; 6 – рама плуга; 7 – регулировочные шайбы; 8–9 – тензозвенья для измерения продольной R_x и поперечной R_y составляющих силы сопротивления почвы соответственно)

Fig. 2. Scheme of the dynamometer body (1 – share; 2 – mouldboard; 3 – mound; 4 – antifriction bearings; 5 – vertical hinge; 6 – frame of the plow; 7 – adjusting washers; 8–9 – tensor links for measuring the longitudinal R_x and transverse R_y components of the soil resistance force, respectively)

¹¹ Мардарьев С. Н. Повышение эффективности работы плугов для отвальной вспашки путем адаптации их параметров к изменяющимся условиям функционирования : дис. ... канд. техн. наук. Чебоксары, 2002. 154 с.



где C_1 и C_2 – плечи сил P_6 и R_y соответственно.

Исследуемый плуг агрегатируется с трактором МТЗ-82 и присоединяется с помощью автосцепки СА-1. Тензодатчики, наклеенные на верхней тяге навески трактора по мостовой схеме, осуществляют измерение усилий, действующих в ней. Для измерения усилий в нижних тягах навески трактора применялись динамометрические тяги 1 с кольцевыми тензозвеньями 2 конструкции ВИСХОМ. При полученных в результате исследований значениях усилий, возникающих в тягах навески трактора во время лабораторно-полевых экспериментов, показатели тягового сопротивления плуга $R_{пл}$ определялись по формуле:

$$R_{пл} = P_{л} \cos \alpha \cdot \cos \beta + P_{п} \cos \alpha \cdot \cos \beta - P_{в} \cos \theta, \quad (2)$$

где $P_{л}$, $P_{п}$ и $P_{в}$ – усилия в левой, правой и верхней тягах навески трактора соответственно, Н; θ – угол между верхней тягой и горизонтом, град.

Достоинством представленной схемы является возможность измерения уже двух параметров динамометрирования, но недостатком будет относительная сложность конструкции.

Кроме рассмотренных выше установок и стендов для динамометрирования плужных корпусов существуют разработки таких исследователей, как А. В. Захаров [7], С. В. Иванов¹², Г. Н. Синеоков¹³, Д. З. Стародинский¹⁴, В. И. Мяленко [8–9], Н. И. Наумкин¹⁵ и др. Данные разработки характери-

зуются сложностью и громоздкостью конструкции, и в связи с этим их использование в условиях лабораторий затруднительно или невозможно.

Материалы и методы

В результате исследования предлагаемых конструкций был выявлен ряд существенных недостатков: невозможность одновременно определять характеристики действующих на плуг сил; сложность конструкции установок для пространственного динамометрирования, обеспечивающих одновременное измерение сил сопротивления на корпусе плуга R_x , R_y , R_z ; невозможность проведения лабораторных исследований и, следовательно, проведение испытаний только в полевых условиях.

Из анализа литературных и патентных источников следует, что для пространственного динамометрирования корпусов лемешно-отвальных плугов необходимо разработать достаточно простое и функциональное устройство, позволяющее путем динамометрирования определить силы взаимодействия корпуса плуга с почвой R_x , R_y и R_z с достаточно высокой точностью.

Для решения этой проблемы нами была предложена конструкция устройства, обеспечивающего измерение всех указанных сил путем динамометрирования. На данное устройство было получено удостоверение на рационализаторское предложение № 1173 «Экспериментальный модуль для динамометрирования лемешно-отвального корпуса плуга» (22.01.2018 г., ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва»). Особенностью модуля является

¹² Иванов С. В. Повышение эффективности работы плуга с изменяемыми параметрами путем оптимизации системы стабилизации его поперечной устойчивости : дис. ... канд. техн. наук. СПб ; Павловск, 2003. 176 с.

¹³ Синеоков Г. Н., Панов И. М. Теория и расчет почвообрабатывающих машин. М. : Машиностроение, 1977. 328 с.

¹⁴ А. с. 535474 СССР, МКИ G01L 5/13. Устройство для динамометрирования навесных сельскохозяйственных машин / Д. З. Стародинский, И. П. Шподаренко, Л. И. Курганский. Заявл. 16.12.74, опубл. 15.11.76. Бюл. №42.

¹⁵ Введение в практикум по аддитивным технологиям / Н. И. Наумкин [и др.]. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та. 2015. 84 с.

наличие трехподвижного шарнира. Кинематическая схема установки представлена на рис. 3.

Для анализа особенностей функционирования данного динамометрического модуля составим расчетную схему нагружения (рис. 4), предварительно заменив связи их реакциями, а именно: в т. С. приложим силы взаимодействия корпуса плуга с почвой R_x , R_y и R_z ; в м. I, II и III приложим силы R_I , R_{II} и R_{III} , соответствующие показания тензометрических датчиков I, II и III в точке проекции главного вектора R_{ox} , R_{oy} и R_{oz} . При этом допустим, что трение в шарнирах невелико и, следовательно, примем вектор главного момента равным $M_0 = 0$.

На первом этапе составим уравнения моментов по плоскостям XOZ , YOX и YOZ .

Плоскость XOZ :

$$M_{oy} = 0; R_3 l_3 + R_z(l_4 + l_7) - R_x l_5 = 0. \quad (3)$$

Плоскость YOX :

$$M_{oz} = 0; R_I l_1 - R_x l_6 - R_y(l_4 + l_7) = 0. \quad (4)$$

Плоскость YOZ :

$$M_{ox} = 0; -R_2 l_2 + R_y l_5 + R_z l_6 = 0. \quad (5)$$

Здесь $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$ и l_7 – геометрические размеры из схемы (рис. 3), м.

Каждое из полученных уравнений (3–5) содержит по два искомым неизвестных силовых фактора.

Для их решения выразим из уравнения (5) значения R_y и получим:

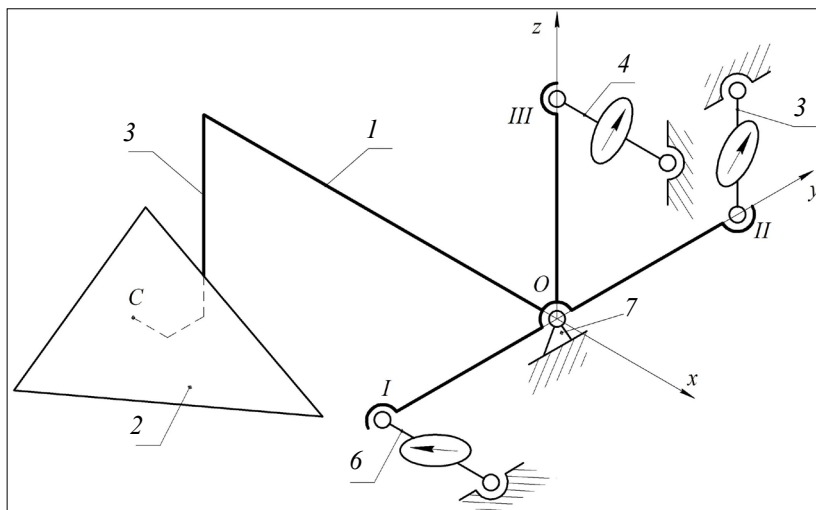
$$R_y = \frac{R_2 l_2 - R_z l_6}{l_5}, \quad (6)$$

Далее подставим (6) в (4) и получим следующую зависимость:

$$R_I l_1 - R_x l_6 - \frac{(R_2 l_2 - R_z l_6)(l_4 + l_7)}{l_5} = 0, \quad (7)$$

Затем из (7) выразим R_x :

$$R_x = \frac{\frac{(R_2 l_2 - R_z l_6)(l_4 + l_7)}{l_5} - R_I l_1}{l_6}, \quad (8)$$

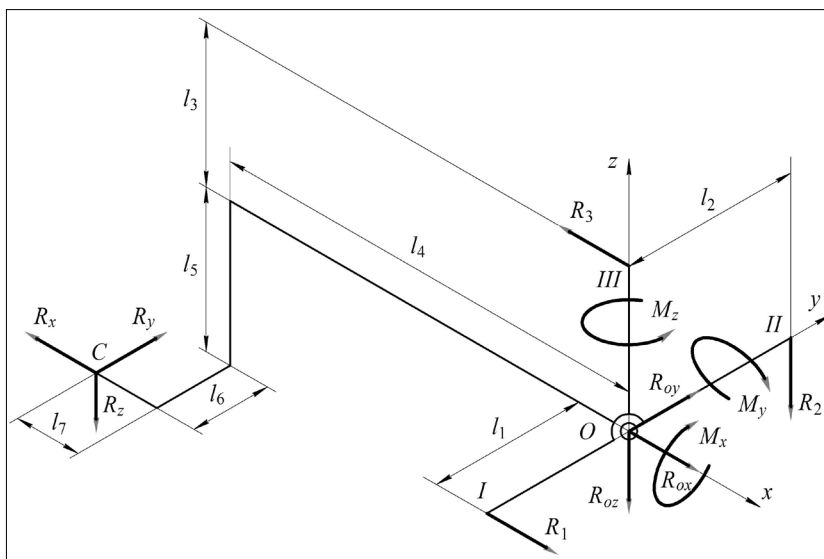


Р и с. 3. Кинематическая схема динамометрического модуля:

1 – корпус динамометрического модуля; 2 – корпус плуга;
3 – стойка корпуса плуга; 4–6 – динамометры; 7 – сферический шарнир

F i g. 3. Kinematic scheme of the dynamometric module:

1 – dynamometric module body; 2 – plow body;
3 – plow body stand; 4–6 – dynamometers; 7 – spherical hinge



Р и с. 4. Расчетная схема динамометрического модуля

Fig. 4. Calculation scheme of the dynamometric module

Подставим (8) в (3), получим:

$$- \left[\frac{R_X = R_3 l_3 + R_Z (l_4 + l_7) - \frac{(R_2 l_2 - R_Z l_6)(l_4 + l_7)}{l_5} - R_1 l_1}{l_6} \right] l_5 = 0, \quad (9)$$

После преобразования уравнения (9) получим следующую зависимость:

$$R_Z = \frac{\frac{R_1 l_1 l_5}{l_6} - R_3 l_3}{2(l_4 + l_7)}. \quad (10)$$

Таким образом, уравнение (10) включает в себя значение динамометров I и III R_1 и R_3 соответственно, которые можно определить в ходе проведения испытаний.

Для нахождения значений сил R_y и R_x необходимо воспользоваться зависимостями (6) и (8) соответственно, а также результатами расчетов силы R_z и показаниями тензометрических датчиков I и II R_1 и R_2 .

Таким образом, предлагаемая кинематическая схема динамометрического модуля при относительной простоте конструкции позволяет определять в ходе эксперимента значение сил R_x , R_y и R_z , действующих на корпус плуга. Однако при этом необходимо отметить, что отдельным вопросом, требующим решения, является определение геометрических параметров из схемы (см. рис. 4) – l_1 , l_2 , l_3 , l_4 , l_5 , l_6 и l_7 . Так, параметры l_1 , l_2 , l_3 и l_4 характеризуются особенностями конструкции динамометрического модуля и компоновки его составных элементов, поэтому их можно определить после его проектирования и изготовления.

Геометрические параметры l_s , l_6 и l_7 определяют положение т. C – точки приложения сил R_x , R_y и R_z относительно т. O , характеризующее сферический шарнир (см. рис. 4). Определение размеров l_s , l_6 и l_7 вызывает определенные трудности, связанные со сложной криволинейной поверхностью отвала плуга, поэтому для точного определения указанных размеров можно воспользоваться технологиями реверс-инжи-

ниринга на основе 3D-сканирования, позволяющего получить *CAD*-модель реального образца и, следовательно, ее искомые размеры.

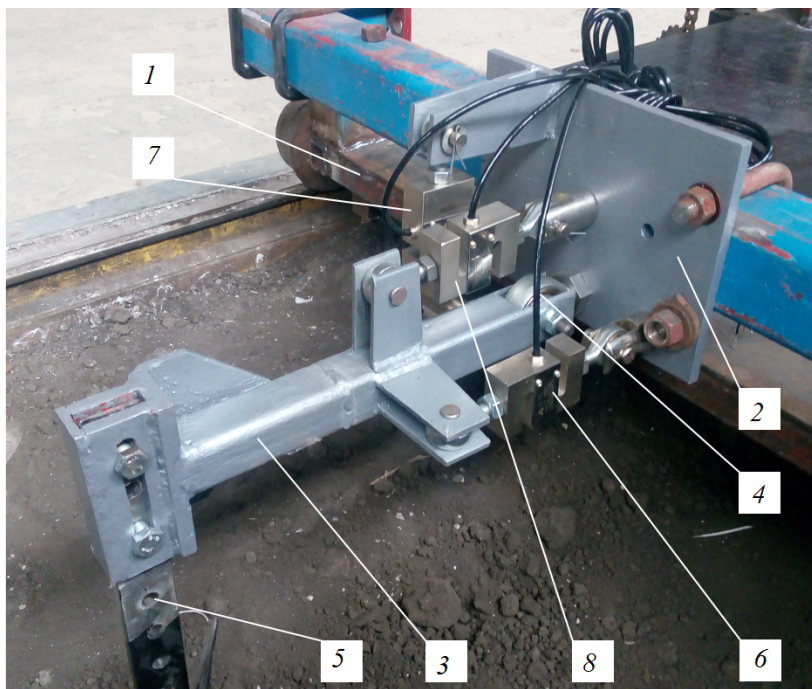
Рассмотрим результаты исследования лемешно-отвального корпуса плуга мотоблока с разработкой динамометрического модуля и использованием технологий реверс-инжиниринга на основе 3D-сканирования.

Результаты исследования

На основе вышеуказанных расчетных схем нами был спроектирован и изготовлен модуль для динамометрирования лемешно-отвального плуга мотоблока (рис. 5) и определены его основные конструктивные размеры: $l_1 = 80$ мм, $l_2 = 80$ мм, $l_3 = 80$ мм,

$l_4 = 355$ мм, характеризующие, как было отмечено выше, взаиморасположение его составных элементов.

Для определения размеров l_5 , l_6 и l_7 был использован 3D-сканер Shining3D Optiscan-plus DM и ПК с установленным специализированным программным обеспечением. В 3D-сканере Shining, разработанном компанией Shining3D TechCo. Ltd, применены технологии «решетки» автоматического выравнивания по опорным точкам¹⁶. Устройство подходит главным образом для обратного моделирования сложной поверхности произвольной формы и широко применяется в области прикладных исследований и проектирования (RD), обратного проектирования



Р и с. 5. Динамометрический модуль для исследования сил действующих на лемешно-отвальный плуг мотоблока (1 – подвижный модуль экспериментального стенда; 2 – кронштейн; 3 – корпус; 4 – сферический шарнир; 5 – плуг; 6–8 – тензометрические датчики I, II и III)

F i g. 5. Dynamometric module for studying the forces of the motoblock operating on the share-mouldboard plow (1 – movable module of the experimental stand; 2 – bracket; 3 – body; 4 – spherical hinge; 5 – plow; 6–8 – strain gauges I, II and III)

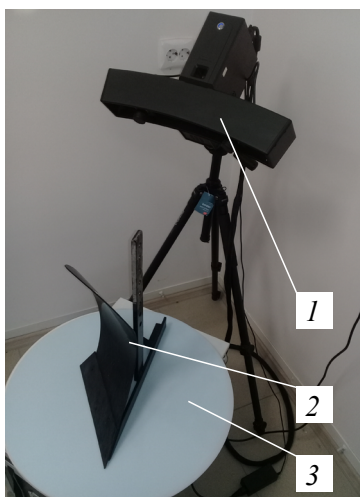
¹⁶ [Введение в практикум по аддитивным технологиям](#) / Н. И. Наумкин [и др.]. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та. 2015. 84 с.



(RE), и компьютерной верификации (CAV). На рис. 6 представлен общий вид 3D-сканера Shining3D Optiscan-plus DM с поворотным столом и лемешно-отвальным плугом П1-20/3.

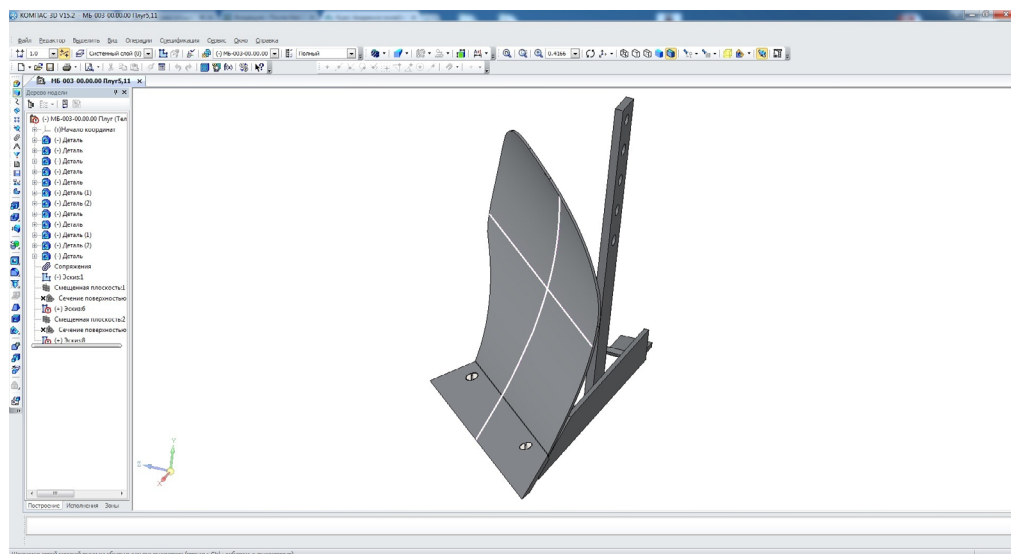
В результате сканирования исследуемого объекта была получена его

CAD-модель (рис. 6), которая в дальнейшем была обработана в программе КОМПАС 3D путем ее сечения двумя взаимно перпендикулярными плоскостями YOX и YOZ , расположенными на расстоянии от носка лемеха $z = 95$ мм и $y = 98$ мм соответственно (рис. 7).



Р и с. 6. Общий вид 3D-сканера Shining3D Optiscan-plus DM и лемешно-отвального плуга П1-20/3 для мотоблоков (1 – 3D-сканер; 2 – поворотный стол; 3 – плуг)

F i g. 6. General view of Shining3D Optiscan-plus DM scanner and P1-20/3 mouldboard plow for motor blocks (1 – 3D scanner; 2 – turntable; 3 – plow)

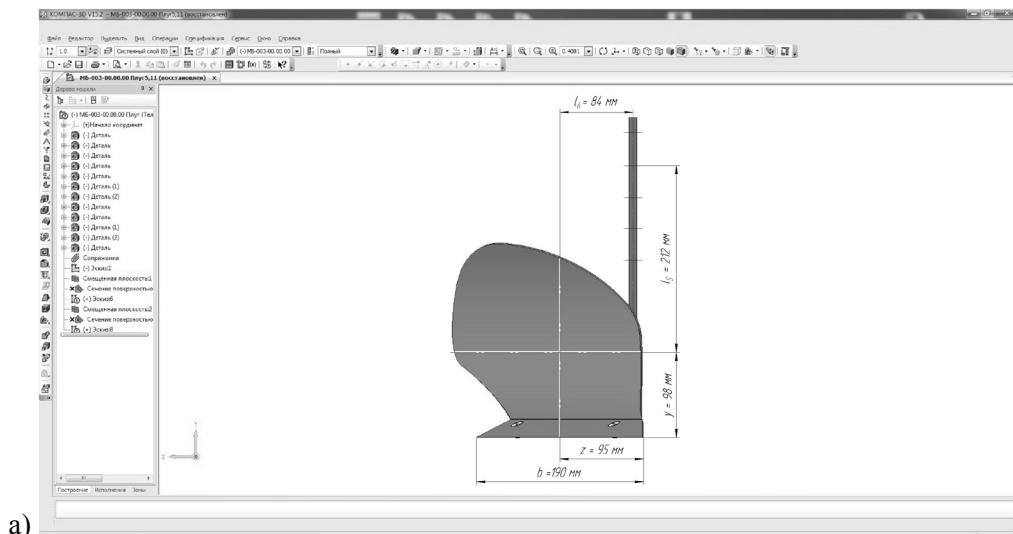


Р и с. 7. CAD-модель лемешно-отвального корпуса плуга П1-20/3 в программе КОМПАС 3D

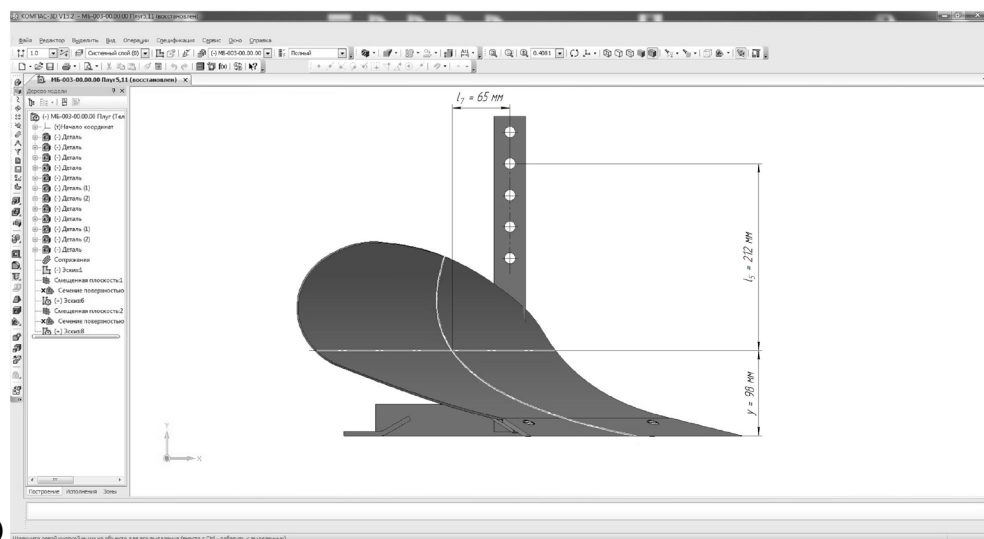
F i g. 7. CAD-model of the P1-20/3 share-mouldboard plow in KOMPAS 3D program

В нашем случае значения $z = 95$ мм и $y = 98$ мм зависят от конструктивных и технологических параметров плуга П1-20/3, а именно от ширины захвата $b = 200$ мм и глубины обработки

$h = 220$ мм, и определяются с учетом рекомендаций при условии заостренного лезвия лемеха¹⁷. Все это позволило получить геометрические параметры $l_5 = 212$ мм, $l_6 = 84$ мм и $l_7 = 65$ мм,



a)



b)

Р и с. 8. Проекция CAD-модели лемешно-отвального корпуса плуга П1-20/3 в программе КОМПАС 3D на плоскости YOZ (a) и YOX (b)

Fig. 8. Projections of the CAD-model of the P1-20/3 share-mouldboard plow body in KOMPAS 3D program on the plane YOZ (a) and YOX (b)

¹⁷ [Сельскохозяйственные и мелиоративные машины](#) / Г. Е. Листопад [и др.]. М. : Агропромиздат, 1986. – 688 с.



определяющие положение точки приложения сил R_x , R_y и R_z относительно сферического шарнира динамометрического модуля.

На следующем этапе проводились лабораторные испытания лемешно-отвального плуга П1-20/3, применяемого для вспашки почвы мотоблоком. Испытания проводились в почвенном канале лаборатории кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва». Почва представляла собой малогумусный чернозем, твердость в ходе эксперимента поддерживалась в пределах от 1,25 до 1,26 МПа, а влажность – от 18 до 20 %. Испытания проводились в диапазоне рабочих скоростей движения от 1 до 4 км/ч.

В ходе проведения лабораторных исследований были получены значения

R_1 , R_2 и R_3 показаний тензодатчиков I, II и III соответственно (табл. 1).

Используя данные табл. 1, основные конструктивные размеры ($l_1 = 80$ мм, $l_2 = 80$ мм, $l_3 = 80$ мм, $l_4 = 355$ мм), размеры, определяющие положение точки приложения сил взаимодействия плуга с почвой относительно сферического шарнира динамометрического модуля ($l_5 = 212$ мм, $l_6 = 84$ мм, $l_7 = 65$ мм), и (последовательно) зависимости (10), (6) и (8), рассчитаем значения R_z , R_y и R_x (табл. 2).

На основании табл. 2 были построены графики сил взаимодействия корпуса плуга с почвой R_z , R_y и R_x в зависимости от скорости движения v . Обработка значений полученных графических зависимостей при их построении позволила установить соответствующие аппроксимирующие функции:

$$R_x = -49,5v^2 + 382,7v + 578; \quad (11)$$

Таблица 1

Table 1

Значения показаний тензодатчиков

Values of the load cells

Нагрузка на тензодатчиках, Н / Load on load cells, N	Значения показаний тензодатчиков при скорости движения v , км/ч / Values of the load cells at speed v , km/h			
	1	2	3	4
R_1	2 479	3 214	3 603	3 816
R_2	961	1 241	1 439	1 515
R_3	1 453	1 909	100	2 043

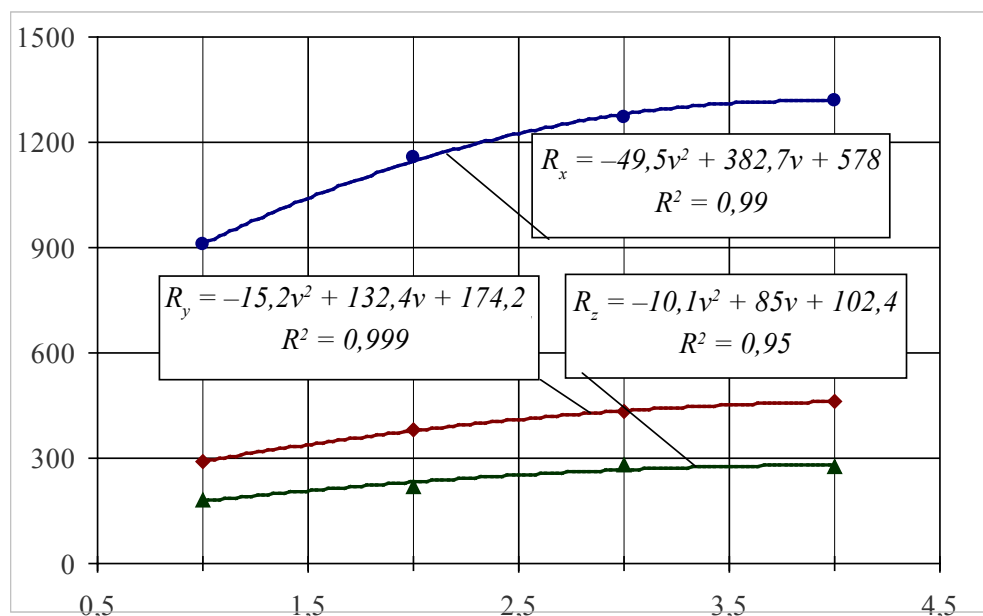
Таблица 2

Table 2

Значения сил взаимодействия корпуса плуга с почвой

Values of interaction forces of the plow body with soil

Силы сопротивления на корпусе плуга, Н / Resistance force on plow body, N	Значения сил взаимодействия корпуса плуга с почвой при рабочей скорости v , км/ч / Values of interaction forces of plow body with soil at operating speed v , km/h			
	1	2	3	4
R_x	908,0	1 155,0	1 271,0	1 320,0
R_y	290,6	381,2	432,1	462,0
R_z	181,6	219,5	279,6	277,2



Р и с. 9. Графические зависимости сил взаимодействия лемешно-отвального корпуса плуга мотоблока с почвой R_x , R_y , R_z (Н) от скорости движения v (км/ч)

F i g. 9. Graphical dependences of the forces of interaction between share-mouldboard plow of the motor block with the soil R_x , R_y , R_z (H) on the speed v (km/h)

$$R_y = -15,2v^2 + 132,4v + 174,2; \quad (12)$$

$$R_z = -10,1v^2 + 85v + 102,4. \quad (13)$$

Величины достоверности данных уравнений составляют $R^2 = 0,99$, $R^2 = 0,99$ и $R^2 = 0,95$ соответственно.

Обсуждение и заключения

Полученные аппроксимирующие уравнения (11–13) позволяют проанализировать характер изменения сил взаимодействия лемешно-отвального корпуса плуга мотоблока с почвой R_x , R_y и R_z . Так, из рис. 9 следует, что графические зависимости сил R_x , R_y и R_z изменяются по нелинейным законам,

что подтверждает результаты ранее проведенных исследований в этой области другими авторами^{18–20}. При этом значение силы R_x изменяется в пределах от 908 до 1 320 Н в диапазоне рабочих скоростей от 1 до 4 км/ч, а значения сил R_y и R_z варьируются от 291 до 462 Н и от 182 до 277 Н соответственно. Кроме этого, использование зависимостей (11–13) позволяет определить степень их влияния на устойчивость плуга и на тяговые характеристики мотоблока в случае соответствующих расчетов.

Таким образом, предложенные схема и конструкция модуля для динамометрирования лемешно-отвального плуга

¹⁸ Фархутдинов И. М. Совершенствование лемешно-отвальной поверхности корпуса плуга на основе моделирования технологического процесса вспашки : дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2012. 176 с.

¹⁹ Мардарьев С. Н. Повышение эффективности работы плугов для отвальной вспашки путем адаптации их параметров к изменяющимся условиям функционирования : дис. ... канд. техн. наук. Чебоксары, 2002. 154 с.

²⁰ Иванов С. В. Повышение эффективности работы плуга с изменяемыми параметрами путем оптимизации системы стабилизации его поперечной устойчивости : дис. ... канд. техн. наук. СПб ; Павловск. 2003. 176 с. URL: <https://dlib.rsl.ru/01002615148>



моторного блока, методика расчета, способ определения геометрических параметров с помощью реверс-инжиниринга на основе 3D-сканирования позволяют проводить испытания в лабораторных условиях и получать достаточно точные значения силовых характеристик взаимодействия рабочего органа с почвой. Все это дает возможность не только выявить характер изменения силовых ха-

рактеристик, но и определить степень их влияния на устойчивость плуга в отдельности и почвообрабатывающего агрегата в целом, а также выбрать наиболее оптимальные технологические режимы его функционирования и принимать обоснованные технические решения при модернизации существующих и разработке новых высокоэффективных почвообрабатывающих машин.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Моторный блок с бесступенчатым регулированием скорости / В. Ф. Купряшкин [и др.] // Сельскохозяйственный механизматор. 2017. № 12. С. 22–23.
2. Динамика машинно-тракторных агрегатов: курсовая устойчивость с несимметрично присоединенным полунавесным плугом / Г. С. Горин [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2017. № 5. С. 3–9. URL: <http://www.vimsmit.com/jour/article/view/204>
3. Пархоменко С. Г., Пархоменко Г. Ф. Измерение силы тяги на крюке трактора в агрегате с навесной сельскохозяйственной машиной // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 4. С. 15–18. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25871252>
4. Анализ тягового сопротивления элементов цилиндрического плужного корпуса / Я. П. Лобачевский [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2016. № 2. С. 11–15. URL: <http://docplayer.ru/73191784-Novye-tehnologii-i-oborudovanie-analiz-tyagovogo-soprotivleniya-elementov-cilindricheskogo-pluzhnogo-korpusa.html>
5. Мясников Д. Г., Незговорев С. В. Проектирование моторных блоков с учетом требований эргономики // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1996. № 12. С. 20–21.
6. Kaufman L. C., Totten D. S. Development of an inverting moldboard plow // Transactions of the ASAE. 1992. Vol. 15, Issue 1. P. 55–60. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.37828>
7. Патент 20090751 Республика Беларусь, МПК G01L 5/13. Устройство для пространственного динамометрирования корпусов оборотного плуга / А. В. Захаров, Г. С. Горин, И. О. Захарова, А. В. Ващула; заявл. 11.09.2009; опубл. 30.04.2010, бюл. № 34. URL: <http://bypatents.com/4-u6200-ustrojstvo-dlya-prostranstvennogo-dinamometrirovaniya-korpusov-oborotnogo-pluga.html>
8. Патент РФ № 2566398. Установка для объемного тензометрирования / В. И. Мясников; заявл. 26.05.2014, опубл. 27.10.2015. Бюл. № 2015. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/256/2566398.html>
9. Мясников В. И., Маринов Н. А. Пространственное динамометрирование рабочих органов почвообрабатывающих агрегатов // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2017. № 5. С. 22–26. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-5-22-26>
10. Kuczewski J. Soil parameters for predicting the draught of model plough bodies // Journal of Agricultural Engineering Research. 1981. Vol. 26, Issue 3. P. 193–201. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(81\)90104-9](https://doi.org/10.1016/0021-8634(81)90104-9)

Поступила 31.05.2018; принята к публикации 27.07.2018; опубликована онлайн 20.09.2018

Об авторах:

Купряшкин Владимир Федорович, заведующий кафедрой мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), кандидат технических наук, доцент, Researcher ID: L-5153-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7512-509X>, kupwf@mail.ru

Уланов Александр Сергеевич, инженер кафедры основ конструирования механизмов и машин ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), Researcher ID: L-4662-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6041-6911>, ulanow.aleksandr2010@yandex.ru

Наумкин Николай Иванович, заведующий кафедрой основ конструирования механизмов и машин ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), доктор педагогических наук, кандидат технических наук, доцент, Researcher ID: L-4643-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1109-5370>, NaumN@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. Ф. Купряшкин – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, подготовка начального варианта текста и формирование выводов, литературный и патентный анализ, теоретическое обоснование конструкции модуля для динамометрирования; А. С. Уланов – проведение лабораторных исследований плуга мотоблока; обработка результатов эксперимента, компьютерные работы, визуализация, верстка и редактирование текста; Н. И. Наумкин – участие в теоретических исследованиях, проведение критического анализа исследования и доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Kupryashkin V. F., Kukhmazov K. Z., Glotov S. V., Ulanov A. S. Motoblock with infinitely variable speed regulation. *Selskiy mekhanizator* = Rural Mechanizer. 2017; 12:22–23 (In Russ.)
2. Gorin G. S., Godzhaev Z. A., Golovach V. M., Kuzmin V. A. Dynamics of machine-tractor aggregates: course stability with asymmetrically attached semi-mounted plow. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machines and Technologies. 2017; 5:3–9 Available at: <http://www.vimsmi.com/jour/article/view/204> (In Russ.)
3. Parkhomenko S. G., Parkhomenko G. F. Measurement of the traction force on the hook of the tractor in an aggregate with a mounted agricultural machine. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2016; 4:15–18. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25871252> (In Russ.)
4. Lobachevsky Y. P., Kolmogortsev V. F., Starovoirov S. I., Hramovskikh K. A. Analysis of the traction resistance of the elements of the cylinder-cylindrical plow hull. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural machines and technologies. 2016; 2:11–15 Available at: <http://docplayer.ru/73191784-Novye-tehnologii-i-oborudovanie-analiz-tyagovogo-soprotivleniya-elementov-cilindroidalnogo-pluzhnogo-korpusa.html> (In Russ.)
5. Myasishchev D. G., Nezhgovorov S. V. Design of motoblocks taking into account the requirements of ergonomics. *Traktory i selskokhozyaystvennyye mashiny* = Tractors and agricultural machines. 1996; 12:20–21 (In Russ.)
6. Kaufman L. C., Totten D. S. Development of an inverting mouldboard plow. Transactions of the ASAE. 1992; 15(1):55–60. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.37828>
7. Patent 20090751. Republic of Belarus, MPC G 01 L 5/13. The device for spatial dynamometry of the hulls of the reversible plow. Zakharov A. V., Gorin G. S., Zakharova I. O., Vashchula A. V.; Belarus State Agrarian Technical University. No. U 6200; declared. 11/09/2009; published 30.04.2010, Bul. no. 34. Available at: <http://bypatents.com/4-u6200-ustrojstvo-dlya-prostranstvennogo-dinamometrirovaniya-korpusov-oborotnogo-pluga.html> (In Russ.)
8. Patent 256398. Russian Federation. Installation for volumetric strain gauging. Myalenko V. I.; declared 26.05.2014, published 27.10.2015. Bul. no. 2015. Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/256/2566398.html> (In Russ.)



9. Myalenko V. I., Marinov N. A. Spatial dynamometry of the working parts of soil-processing aggregates. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machines and Technologies. 2017; 5:22–26. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-5-22-26> (In Russ.)

10. Kuczewski I. Soil parameters for predicting the draught of model plough bodies. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1981; 26(3):193–201. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(81\)90104-9](https://doi.org/10.1016/0021-8634(81)90104-9)

Received 31.05.2018; revised 27.07.2018; published online 20.09.2018

About authors:

Vladimir F. Kupryashkin, Head, Prof Leschankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68/1, Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), Associated Professor, Researcher ID: L-5153-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7512-509X>, kupwf@mail.ru

Aleksandr S. Ulanov, Engineer, Chair of Designing of Mechanisms and Machines, National Research Mordovia State University (68/1, Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Researcher ID: L-4662-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6041-6911>, ulanow.aleksandr2010@yandex.ru

Nikolay I. Naumkin, Head, Chair of Designing of Mechanisms and Machines, National Research Mordovia State University (68/1, Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), D.Sc. (Pedagogy), Ph. D. (Engineering), Professor, Researcher ID: L-4643-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1109-5370>, NaumN@yandex.ru

Author's contribution:

V. F. Kupryashkin – the scientific management, formulation of the main concept of a research, preparation of initial version of the text and formation of conclusions, the literary and patent analysis, theoretical justification of a design of the module for dynamometer test; A. S. Ulanov – carrying out laboratory researches of a plow of the motor-block; processing of results of an experiment, computer works, visualization, imposition and editing text; N. I. Naumkin – participation in theoretical researches, critical evaluation of the study and revision of the text.

All authors have read and approved the final version of the paper.

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

УДК 004.4:621.1

DOI: 10.15507/0236-2910.028.201803.416-428



Анализ управляемости и устойчивости приближенной модели теплопереноса в автоклаве

**С. А. Мокрушин, В. С. Хорошавин*, С. И. Охупкин,
А. В. Зотов, В. С. Грудинин**
*ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»
(г. Киров, Россия)*

**khoroshavin@vyatsu.ru*

Введение. Обеспечение продовольственной безопасности страны по длительности хранения и качеству продуктов невозможно без стерилизации продуктов в автоклавах. Эффективность процессов стерилизации во многом зависит от степени их автоматизации. В 2000-2010-е гг. совершенствование автоматических и автоматизированных систем управления базировалось в основном на развитии технических средств автоматики без теоретического обоснования принимаемых решений. Предлагаемая работа направлена на выявление связей между параметрами и связями процесса стерилизации и выбором структурно-параметрических особенностей системы управления.

Материалы и методы. Проведен качественный анализ с позиций современной теории автоматического управления приближенной модели теплового процесса нагрева воды паром в автоклаве с учетом законов теплопереноса и достаточности использования двумерной модели в зависимости от ее структурно-функциональных особенностей, учитывающих параметры и связи процесса, – свойств управляемости по Калману во временной области в пространстве состояний (отдельно показан переход от передаточной функции с нулями в числителе к нормальной системе дифференциальных уравнений); свойств устойчивости модели в частотной области с помощью передаточных функций и структурных преобразований; учета соотношения параметров в виде неравенств и последующим выбором составляющих пропорционально-интегрально-дифференциального закона регулирования для реального автоклава с помощью матрицы экспертных оценок.

Результаты исследования. Показано, что для качественного исследования вопросов управляемости и устойчивости приближенной модели теплового процесса нагрева воды паром в автоклаве в зависимости от параметров процесса необходимо совместное представление модели как во временной (в пространстве состояний), так и в частотной (в виде передаточных функций) областях. Анализ управляемости процесса основывается на трех подходах: первый (формализованный) основан на пред-

© Мокрушин С. А., Хорошавин В. С., Охупкин С. И., Зотов А. В., Грудинин В. С., 2018



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.



ставлении модели в виде нормальной системы обыкновенных дифференциальных уравнений в форме Коши с развитием способа понижения порядка старших производных координат и введения дополнительных сигналов по управлению, учитывающих производные по управлению; второй (неформализованный) – на исключении производных по управлению путем структурных преобразований; третий (прямой) использует полученные из физических соображений уравнения теплового баланса и теплопроводности первого порядка. По условиям управляемости Калмана получены зависимости между параметрами процесса и степенью его управляемости. Анализ устойчивости процесса основан на исследовании полюсов передаточных функций в частотной области и характеристических корней уравнений состояния во временной области. На основе структурных преобразований выделен замкнутый контур нагрева банок водой с инерционностью, зависящей от параметров загрузки автоклава. Переходные процессы в этом контуре принимают усилительный, апериодический или интегральный характер, что сказывается на характере переходных процессов системы управления в целом. Формализованный выбор составляющих пропорционально-интегрально-дифференциального закона регулирования проводится в зависимости от частоты применения степени загрузки и необходимости составляющих пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора с помощью матрицы экспертных оценок.

Обсуждение и заключения. Результаты исследования послужат материалом для разработки реальной модели процесса автоклавирования с учетом статических и динамических характеристик измерительных, преобразовательных и исполнительных элементов, исследования влияния и компенсации инерционностей и нелинейностей реальных элементов с последующей разработкой автоматизированной системы управления процессом стерилизации в автоклавах. Результаты работы могут быть использованы для исследования общих и прикладных проблем оптимального управления как в пищевой, так и в других отраслях промышленности, например, в производстве стройматериалов и резинотехнических изделий.

Ключевые слова: теплоперенос, теплопроводность, сосредоточенная модель, управляемость, устойчивость, передаточная функция, нормальная система дифференциальных уравнений, правила преобразования структурных схем, ПИД-закон регулирования, матрица экспертных оценок

Для цитирования: Анализ управляемости и устойчивости приближенной модели теплопереноса в автоклаве / С. А. Мокрушин [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 416–428. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.416-428>

The Analysis of Controllability and Stability of an Approximate Model of Heat Transfer in an Autoclave

S. A. Mokrushin, V. S. Khoroshavin*, S. I. Ohapkin,
A. V. Zotov, V. S. Grudinin

Vyatka State University (Kirov, Russia)

*khoroshavin@vyatsu.ru

Introduction. Ensuring the safety of country food industry in terms of the duration of storage and the quality of products is impossible without sterilizing products in autoclaves. The effectiveness of the sterilization processes depends on the degree of their automation. In the last twenty years, the improvement of automatic and automated control systems was primarily based on the development of technical means for automation without theoretical justification of decision-making. The proposed work is aimed at identifying the links between the parameters and connections of the sterilization process and the choice of structural and parametric features of the control system.

Materials and Methods. A qualitative analysis is carried out based on the modern theory of automatic control for an approximative model of the thermal process of steam heating

in an autoclave, taking into account the laws of heat transfer and the sufficiency of using a two-dimensional model depending upon the structural and functional features of the model, which have regard to the parameters and relationships of the process, namely, the Kalman's controllability properties of the model in the time domain in the state-space representation (the transition from the transfer function with zeros in the numerator to the normal differential system differential equations is also described). There were also analyzed the stability properties of the model in the frequency domain by means of transfer functions and structural transformations and the relationship of parameters in the form of inequalities with the subsequent choice of proportional-integral-differential configuration components for a real autoclave using the matrix of expert estimates.

Results. It is shown that to make a qualitatively study of the issues of controllability and stability of the approximative model of the thermal process of water heating by steam in an autoclave, depending on the process parameters, it is necessary to represent the model the time domain (in the state-space representation) and in the frequency domain (in the form of transfer functions). The analysis of the controllability of the process is based on three approaches: the first (formalized) approach is based on the representation of the model in the form of a normal system of ordinary differential equations in the Cauchy form with the development of a method of decreasing the order of the higher derivatives of coordinates and introducing additional control signals taking into account the control derivatives; the second (unformalized) is based on the exclusion of management derivatives through structural transformation; the third (direct) approach uses the first-order heat balance and heat conduction equations derived from physical considerations. Under the conditions of Kalman's controllability, dependencies between the parameters of the process and the degree of its controllability have been obtained. The analysis of the stability of the process is based on studying the poles of the transfer functions in the frequency domain and the characteristic roots of the equations of state in the time domain. On the basis of structural transformations, a closed canister heating loop with water with inertia, depending on the autoclave charging parameters, is isolated. Transient processes in this circuit take an amplifying, aperiodic or integral character, which affects the nature of the transient processes of the control system as a whole. The formalized choice of the components of the proportional-integral-differential regulation law is carried out depending on the frequency of application of the degree of loading and the need for the components of the proportional-integral-differential regulator using the matrix of expert estimates.

Conclusions. The results of the research will serve as the material for the development of a real model of the autoclaving process, taking into account the static and dynamic characteristics of measuring, conversion and actuating elements, investigating the influence and compensation of inertia and nonlinearities of real elements, followed by the development of an automated system for controlling the sterilization process in autoclaves. The results of the work can be used to study general and applied problems of optimal control in both food and other industries, for example, in the production of building materials and the production of rubber products.

Keywords: heat transfer, heat conductivity, concentrated model, controllability, stability, transfer function, normal system of differential equations, rules for transformation of structural schemes, proportional-integral-differential regulation law, matrix of expert estimates

For citation: Mokrushin S. A., Khoroshavin V. S., Ohapkin S. I., Zotov A. V., Grudin V. S. The Analysis of Controllability and Stability of an Approximate Model of Heat Transfer in an Autoclave. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):416–428. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.416-428>

Введение

Начиная с работ Б. Е. Щекина¹ и Е. В. Выкубова [1] принято описывать процесс нагрева воды паром в авто-

клаве, в который помещены банки со стерилизуемым продуктом, как динамический процесс в приращениях с сосредоточенными параметрами. Ис-

¹ Щекин Б. Е. Разработка и исследование системы автоматического управления для стерилизации консервов : дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 1975. 166 с.



ходя из уравнений сохранения энергии и теплопроводности Фурье² для сосредоточенной системы при управлении тепловым потоком пара Q_n и потерей тепла на нагрев банок q_6 выходные координаты процесса температура воды Θ_6 и температура банок Θ_6 (при неизменном давлении в автоклаве и без учета потерь на нагрев охлаждающей воды, корпуса и в окружающую среду) запишем в виде системы двух обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$m_6 C_6 \frac{d\Theta_6}{dt} = Q_n - q_6;$$

$$m_6 C_6 \frac{d\Theta_6}{dt} = \alpha_{66} F_6 (\Theta_6 - \Theta_6), \quad (1)$$

где m_6 , m_6 , C_6 , C_6 – масса и удельная теплоемкость воды и банок соответственно; α_{66} – коэффициент теплопроводности вода-банка; F_6 – площадь внешних поверхностей всех банок.

Эффективность процессов стерилизации по производительности и качеству по соответствию траекторий процесса заданной формуле стерилизации, учитывающей зависимость температуры воды Θ_6 от времени, определяется системой управления процессом. Для систем управления автоклавами, как и для других систем управления реальными объектами, справедливо утверждение [2], что в 2000–2010-е гг. «... овершенствование автоматических систем базировалось на развитии технических средств автоматики, основанном

на достижениях в области электроники, приборостроения, вычислительной техники и мехатроники, а теоретическая база систем автоматического управления слабо развивалась». Исходя из этого утверждения, авторы данной работы сделали попытку обосновать принимаемые технические решения реализации систем управления автоклавами с позиций фундаментальных свойств управляемости и устойчивости³ систем управления в зависимости от структурно-функциональных особенностей объекта управления, определяемых его параметрами и связями.

Обзор литературы

Аппаратная реализация аналоговых систем управления процессами стерилизации известна из работы Б. Е. Щекина⁴. Аппаратные реализации цифровых алгоритмов классических законов регулирования (релейного, скользящего и пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) законов) в системах управления автоклавами с помощью элементов микроДАТ заложены в исследовании Е. В. Выскубова⁵ и обобщены в справочнике В. П. Бабарина⁶. Развитие программно-аппаратных систем управления автоклавами началось с работы С. А. Мокрушина [3] и продолжено в работах [4–7].

С теоретической точки зрения интерес представляет работа Е. В. Выскубова⁷ об оптимальном управлении процессом (1), в которой автор, ссылаясь на правило А. Ю. Ишлинского⁸ для достаточности двумерной модели (1), находит с помощью принципа макси-

² [Тепломассообмен : курс лекций](#) / М. С. Лобасова [и др.]. Красноярск : ИПК СФУ, 2009.

³ [Теория автоматического управления](#) / В. Б. Яковлев [и др.]. М. : Высшая школа, 2009. 568 с.

⁴ [Щекин Б. Е. Разработка и исследование системы автоматического управления для стерилизации консервов](#) : дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 1975. 166 с.

⁵ [Выскубов Е. В. Разработка микропроцессорных систем управления периодическими процессами тепловой обработки пищевых продуктов](#) : На примере САУ стерилизацией консервов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 1996. 17 с.

⁶ [Бабарин В. П. Стерилизация консервов : справочник](#). СПб. : ГИОРД, 2006. 312 с.

⁷ [Выскубов Е. В. Разработка микропроцессорных систем управления периодическими процессами тепловой обработки пищевых продуктов](#) : На примере САУ стерилизацией консервов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 1996. 17 с.

⁸ [Ишлинский А. Ю. Механика гироскопических систем](#). М. : Изд-во АН СССР, 1963. 462 с.

мума Л. С. Понтрягина⁹ качественные решения оптимального управления, т. е. в каких функциях искать управление в задаче быстрогодействия и в задаче программного движения (в последней – не учитывая нелинейность, явное вхождение времени в функционал и особые в смысле принципа максимума режимы, а также качественные свойства модели по управляемости и устойчивости). В работе О. М. Клименко и В. Г. Трегуба [8] предложен нейронный метод управления автоклавом, но он основан на программно-аппаратной реализации по структуре системы С. А. Мокрушина [3] и формуле стерилизации «нагрев-выдержка-охлаждение».

В зарубежной научной литературе существуют примеры аппаратной [9], программно-аппаратной¹⁰ и нейронной [10] реализаций систем управления автоклавами. Основное внимание в перечисленных работах уделено техническим средствам реализации системы управления, но не исследовано влияние параметров модели на алгоритм управления.

Материалы и методы

Исходя из цели исследования в работе решаются задачи:

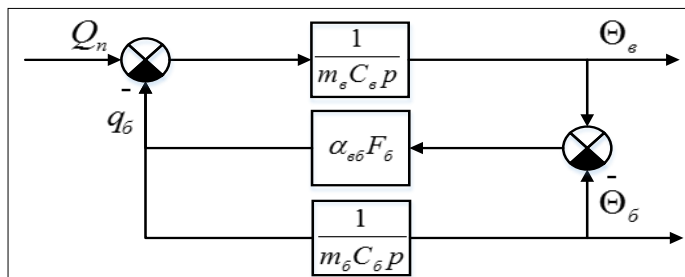
1) качественного анализа управляемости по Калману¹¹ приближенной модели (1) в пространстве состояний (отдельно показан переход от передаточной функции с нулями в числителе к нормальной системе дифференциальных уравнений в форме Коши, опирающийся на исследование В. С. Хорошавина, А. В. Зотова и С. А. Мокрушина [11]);

2) качественного анализа устойчивости приближенной модели (1) с помощью передаточных функций и структурных преобразований, соотношения параметров процесса в виде неравенств¹² и последующим выбором составляющих ПИД-закона регулирования [12] для реального автоклава¹³ с помощью матрицы экспертных оценок¹⁴.

Результаты исследования

Анализ управляемости процесса

Структурная схема приближенной модели (1) при замене символа дифференцирования $\frac{d}{dt}$ на оператор Лапласа p представлена на рис. 1.



Р и с. 1. Структурная схема приближенной модели (1)

F i g. 1. Block diagram of approximate model (1)

⁹ Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин [и др.]. М. : Наука, 1969. 384 с.

¹⁰ Lagarde autoclaves. 2012. 16 p.

¹¹ Kalman R. E., Falb P. L., Arbib M. A. Topics in mathematical system theory. New York : McGraw-Hill, 1969. Т. 1.

¹² Korn G. A., Aramanovich I. G., Korn T. M. Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review. Mineola ; New York : Dover Publications, 2000. 1130 p.

¹³ Вертикальные автоклавы Б6-КАВ-2 / Б6-КАВ-4. 2012.

¹⁴ Системный анализ и принятие решений : словарь-справочник / Под ред. В. Н. Волковой, В. Н. Козлова. М. : Высшая школа. 2004.



В формулах стерилизации¹⁵ указывается температура греющей среды Θ_g , которую нужно измерить в замкнутой системе управления, например, с ПИД-регулятором, поэтому запишем передаточную функцию объекта управления как замкнутой системы с выходом Θ_g и входом Q_n по модели (1):

$$\Phi_z \left(\frac{\Theta_g}{Q_n} \right) = \frac{m_6 C_6 p + \alpha_{66} F_6}{p^2 (m_6 C_6 m_6 C_6) + p \alpha_{66} F_6 (m_6 C_6 + m_6 C_6)} \quad (2)$$

Для анализа управляемости передаточной функции (2) потребуется переход от передаточной функции с нулями в числителе в пространство состояний без производных по управлению Q_n . Такой переход возможен путем понижения старшей производной Θ_g и введения дополнительных сигналов по управлению Q_n , учитывающих производные по управлению Q_n . Здесь и далее для краткости записи производных от переменных обозначим, например, $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$.

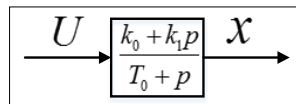
Поскольку такой переход обычно вызывает затруднения [11], то в методическом плане покажем пошаговую процедуру его применения на примере.

Известно, что представление динамики процесса с передаточной функцией без нулей в числителе в пространстве состояний не вызывает трудностей при понижении порядка старшей производной выхода.

Далее, более кратко по сравнению с приведенным в [11], формализуем процедуру представления передаточной функции с нулями в пространстве состояний на примере объекта

$$\dot{x} + T_0 x = k_0 U + k_1 \dot{U} \quad (3)$$

со структурой, представленной на рис. 2.



Р и с. 2. Структура исходного объекта (3) с нулями в числителе

F i g. 2. Diagram of the original object (3) with zeros in the numerator

В уравнении (3) объекта (рис. 2) примем коэффициент при старшей производной выхода равным 1.

1 шаг. Введем дополнительные переменные

$$x = x_1 + h_0 U,$$

$$\dot{x}_1 = \dot{x} - h_0 \dot{U} = x_2 + h_1 U$$

и т. д. до

$$\dot{x}_{n-1} = x_n + h_{n-1} U.$$

2 шаг. Подставим введенные дополнительные переменные в исходное уравнение:

$$\dot{x}_1 + h_0 \dot{U} = k_0 U + k_1 \dot{U} - T_0 (x_1 + h_0 U).$$

3 шаг. Избавимся от производных по U в последнем уравнении:

$$\dot{x}_1 = k_0 U + k_1 \left(1 - \frac{h_0}{k_1} \right) \dot{U} - T_0 x_1 - T_0 h_0 U,$$

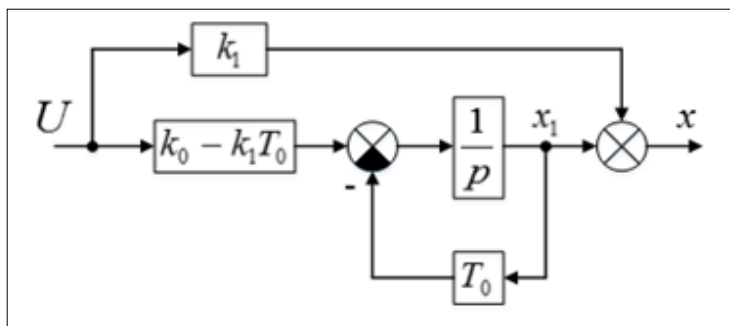
из $\left(1 - \frac{h_0}{k_1} \right) = 0$ получим $h_0 = k_1$. Тогда система уравнений объекта и его структура в пространстве состояний примут следующий вид (рис. 3):

$$\dot{x}_1 = U (k_0 - k_1 T_0) - T_0 x_1;$$

$$x = x_1 + k_1 U.$$

Из приведенного простейшего примера видна сложность метода понижения порядка старшей производной вы-

¹⁵ Щекин Б. Е. Разработка и исследование системы автоматического управления для стерилизации консервов : дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 1975. 166 с.



Р и с. 3. Структура исходного объекта (3) без нулей в числителе
F i g. 3. Diagram of the source object (3) without zeros in the numerator

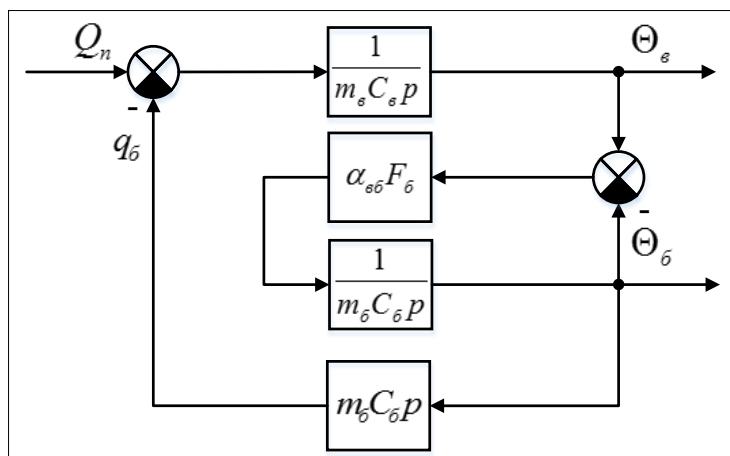
хода и введения добавок по управлению, учитывающих производные по управлению, хотя новая структура (рис. 3) позволяет более детально оценить влияние параметров в исходной структуре (рис. 2).

Для анализа управляемости модели (1) со структурой на рис. 1 с целью исключения производных по управлению воспользуемся правилами преобразования структурных схем для получения передаточной функции с выходом Θ_{δ} , более точно отражающим качество процесса по сравнению с Θ_{ϵ} , для чего перенесем точку съема сигнала q_{δ} на сигнал Θ_{δ} (рис. 4).

На основании данной структурной модели запишем передаточную функцию:

$$\Phi_3 \left(\frac{\Theta_{\delta}}{Q_n} \right) = \frac{\alpha_{\epsilon\delta} F_{\delta}}{p^2 (m_{\epsilon} C_{\epsilon} m_{\delta} C_{\delta}) + p \alpha_{\epsilon\delta} F_{\delta} (m_{\epsilon} C_{\epsilon} + m_{\delta} C_{\delta})}, \quad (4)$$

которая путем понижения порядка старшей производной Θ_{δ} может быть преобразована к нормальной системе дифференциальных уравнений первого



Р и с. 4. Преобразованная структурная схема модели (1)
F i g. 4. Transformed block diagram of the model (1)



порядка, что и требуется для исследования управляемости по Калману.

В нормальной форме Коши передаточной функции (4) путем понижения порядка производной $\dot{\Theta}_\delta$ поставим в соответствие следующую систему с управлением $U = Q_n$:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, & x_1 &= \Theta_\delta, & \dot{x}_1 &= \dot{\Theta}_\delta, \\ \dot{x}_2 &= \frac{\alpha_{\delta\delta} F_\delta}{m_\delta C_\delta m_\delta C_\delta} U - \alpha_{\delta\delta} F_\delta \left(\frac{1}{m_\delta C_\delta} + \frac{1}{m_\delta C_\delta} \right) x_2; \end{aligned} \quad (5)$$

или в матричной форме $\dot{\bar{x}} = A\bar{x} + BU$, для которой матрица управляемости $D_2 = (B \quad AB)$ имеет вид

$$D_2 = \begin{pmatrix} 0 & \frac{\alpha_{\delta\delta} F_\delta}{m_\delta C_\delta m_\delta C_\delta} \\ \frac{\alpha_{\delta\delta} F_\delta}{m_\delta C_\delta m_\delta C_\delta} & -\frac{(\alpha_{\delta\delta} F_\delta)^2}{m_\delta C_\delta m_\delta C_\delta} \left(\frac{1}{m_\delta C_\delta} + \frac{1}{m_\delta C_\delta} \right) \end{pmatrix}.$$

Определитель матрицы D_2 не равен нулю:

$$\det D_2 = \left(\frac{\alpha_{\delta\delta} F_\delta}{m_\delta C_\delta m_\delta C_\delta} \right)^2 \neq 0, \quad (6)$$

т. е. система полностью управляема.

Однако такой путь по правилам преобразования структурных схем не является формализованным, поскольку трудно в общем случае указать правила преобразования исходной структуры (рис. 1) к виду, удобному для исследования управляемости модели (1).

Ранее для исследования управляемости модели (1) мы пытались преобразовать ее к нормальной системе дифференциальных уравнений в форме Коши, что вызывало значительные затруднения. Хотя модель (1) не является нормальной формой Коши, это не является ограничением для применения условий управляемости Калмана. В результате получим, что система (1) является полностью управляемой.

Из анализа матрицы управляемости процесса, например, из $\det D_2$ (6) следует, что степень управляемости системы повышается с увеличением теплопереноса от воды к банкам ($\alpha_{\delta\delta} F_\delta$) и уменьшением инерционности нагрева воды и банок ($m_\delta C_\delta m_\delta C_\delta$), что физически объяснимо.

Анализ устойчивости процесса

Используя полученные при исследовании управляемости передаточные функции (2; 4) и уравнения состояний во временной области (5), найдем полюса передаточных функций, или характеристические корни:

$$\lambda_1 = 0, \quad \lambda_2 = -\alpha_{\delta\delta} F_\delta \left(\frac{m_\delta C_\delta + m_\delta C_\delta}{m_\delta C_\delta m_\delta C_\delta} \right) < 0$$

из которых следует, что система обладает интегрирующими свойствами, т. е. не имеет самовыравнивания [12] и находится на грани устойчивости.

Вообще говоря, из эквивалентных структурных схем (рис. 1 и рис. 4) видно, что «успокоить» процесс нагрева воды паром могут потери на нагрев банок и другие потери. Рассмотрим, как влияют потери на нагрев банок, т. е. загрузка автоклава, которые являются основными по технологии стерилизации, на передаточные функции системы.

Рассмотрим передаточную функцию преобразования Θ_δ в Θ_δ по структуре, приведенной на рис. 4. Передаточная функция замкнутого контура равна

$$\Phi_3 \left(\frac{\Theta_\delta}{\Theta_\delta} \right) = \frac{1}{\frac{m_\delta C_\delta}{\alpha_{\delta\delta} F_\delta} p + 1} = \frac{1}{T_{\delta\delta} p + 1},$$

что является передаточной функцией аperiодического звена с постоянной времени нагрева банок водой

$$T_{\delta\delta} = \frac{m_\delta C_\delta}{\alpha_{\delta\delta} F_\delta}.$$

Что касается соотношения массы банок и площади их поверхности в последней формуле для постоянной времени нагрева банок водой, то поскольку масса банок определяется произведением плотности содержимого банок на их объем, величина $T_{\text{бв}}$ зависит от соотношения объема и площади банок. Из геометрии плоских фигур и тел известно¹⁶, что для выпуклых многогранников, (т. е. таких форм контейнеров, как куб, параллелепипед, цилиндр), в которые помещаются банки, соотношение объема к площади прямо пропорционально параметрам многогранника. Поэтому говоря о загрузке автоклава, будем подразумевать прямую зависимость постоянной времени $T_{\text{бв}}$ и массы банок.

При малой загрузке $T_{\text{бв}} \ll 1$ получим почти усилительное звено (апериодическое звено с широкой полосой пропускания) $\Phi_3\left(\frac{\Theta_{\text{б}}}{\Theta_{\text{г}}}\right) \approx 1$, при большой загрузке $T_{\text{бв}} \gg 1$ получим интегрирующее звено $\Phi_3\left(\frac{\Theta_{\text{б}}}{\Theta_{\text{г}}}\right) \approx \frac{1}{T_{\text{бв}} p}$. Для нормальных (штатных) загрузок автоклава Б6-КАВ-2¹⁷ по технологической карте стерилизации [1] с параметрами

$$m_{\text{б}} C_{\text{б}} = 4,6 \cdot 10^2 \times 3,68 \cdot 10^3 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{град.}} \right]$$

$$\alpha_{\text{бв}} F_{\text{б}} = 1,45 \cdot 10^3 \times 3,87 \cdot 10^4 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{град.}} \right]$$

получим $T_{\text{бв}} \approx 30$ с, $\Phi_3\left(\frac{\Theta_{\text{б}}}{\Theta_{\text{г}}}\right)$ – апериодическое звено.

В дальнейшем для исследования устойчивости процесса с учетом введенной передаточной функции

$\Phi_3\left(\frac{\Theta_{\text{б}}}{\Theta_{\text{г}}}\right)$ с постоянной времени $T_{\text{бв}}$, характеризующей загрузку автоклава $m_{\text{б}}$ с некоторыми приведенными выше оговорками относительно связи $m_{\text{б}}$ и $F_{\text{б}}$, удобнее использовать структуру, представленную на рис. 4, т. к. в структуре рис. 1 придется выделить дополнительно из $\Phi_3\left(\frac{\Theta_{\text{б}}}{\Theta_{\text{г}}}\right)$ промежуточный сигнал $q_{\text{б}}$ с дифференциальной составляющей $m_{\text{б}} C_{\text{б}} p$, которая, кстати, улучшает устойчивость процесса. Используя структуру рис. 4 с учетом $\Phi_3\left(\frac{\Theta_{\text{б}}}{\Theta_{\text{г}}}\right)$, получим:

$$\Phi_3\left(\frac{\Theta_{\text{б}}}{Q_n}\right) = \frac{1}{m_{\text{б}} C_{\text{б}} p + m_{\text{б}} C_{\text{б}} p \Phi_3\left(\frac{\Theta_{\text{б}}}{\Theta_{\text{г}}}\right)}.$$

Воспользовавшись результатами исследований [12], получим, что при малой загрузке $\Phi_3\left(\frac{\Theta_{\text{б}}}{\Theta_{\text{г}}}\right) \approx 1$, тогда $\Phi_3\left(\frac{\Theta_{\text{б}}}{Q_n}\right) \approx \frac{1}{m_{\text{б}} C_{\text{б}} p + m_{\text{б}} C_{\text{б}} p}$ – интегрирующее звено, а в системе регулирования с обратной связью с ПИД-регулятором достаточно пропорциональной составляющей с небольшими включениями интегральной и дифференциальной составляющих.

При большой загрузке

$$\Phi_3\left(\frac{\Theta_{\text{б}}}{\Theta_{\text{г}}}\right) \approx \frac{1}{T_{\text{бв}} p} = \frac{\alpha_{\text{бв}} F_{\text{б}}}{m_{\text{б}} C_{\text{б}} p},$$

$$\Phi_3\left(\frac{\Theta_{\text{б}}}{Q_n}\right) \approx \frac{1}{m_{\text{б}} C_{\text{б}} p + \alpha_{\text{бв}} F_{\text{б}}} -$$

инерционное звено; регулируется с помощью П-регулятора.

¹⁶ Korn G. A., Aramanovich I. G., Korn T. M. [Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review](#). Mineola ; New York : Dover Publications, 2000. 1130 p.

¹⁷ [Вертикальные автоклавы Б6-КАВ-2 / Б6-КАВ-4](#). 2012.



При нормальной загрузке получим объект с $\Phi_3 \left(\frac{\Theta_\theta}{Q_n} \right)$ (1), имеющий реальное дифференцирующее, интегрирующее и апериодическое звенья, поэтому могут потребоваться в разной степени все составляющие ПИД-закона регулирования.

Предыдущие рассуждения по выбору составляющих ПИД-закона регулирования в зависимости от загрузки автоклава можно представить в виде матрицы экспертных оценок¹⁸. В данном случае она составляется для нормализованных весов j -тых составляющих ПИД-закона для каждой i -той загрузки q_{ij} , $\sum_{j=1}^3 q_{ij} = 1$ и нормализован-

ных весовых коэффициентов загрузки μ_i , $\sum_{i=1}^3 \mu_i = 1$ (таблица).

Для каждого j -того решения вычисляется показатель R_j как сумма произведений нормализованного веса j -того решения на соответствующий весовой коэффициент μ_i , причем показатели R_j получаются нормализованными: $\sum_{j=1}^3 R_j = 1$. Оптимальное решение определяется по максимальному значению R_j . В таком случае наиболее целесообразно применять пропорциональную составляющую ПИД-закона регулирования.

Таблица 1

Table 1

Матрица экспертных оценок
Matrix of expert opinions

Загрузка (i) / Load (i)	Составляющие (j) ПИД-закона и соответствующие нормализованные веса q_{ij} / Components (j) of the PID-law and the corresponding normalized weights q_{ij}			Вес коэффициента μ_i / Weight of coefficient μ_i
	П / P	И / I	Д / D	
Малая $T_{\theta\theta} \ll 1$ с / Small $T_{\theta\theta} \ll 1$ sec	0,6	0,2	0,2	0,1
Нормальная $T_{\theta\theta} \approx 30$ с / Normal $T_{\theta\theta} \approx 30$ sec	0,5	0,4	0,1	0,7
Большая $T_{\theta\theta} \gg 1$ с / Big $T_{\theta\theta} \gg 1$ sec	0,6	0,2	0,2	0,2
Показатель $R_j = \sum_{i=1}^3 \mu_i q_{ij}$ / Indicator $R_j = \sum_{i=1}^3 \mu_i q_{ij}$	0,53	0,34	0,13	

¹⁸ Системный анализ и принятие решений : словарь-справочник / Под ред. В. Н. Волковой, В. Н. Козлова. М. : Высшая школа. 2004.

Обсуждение и заключения

Для качественного исследования вопросов управляемости и устойчивости приближенной модели теплового процесса нагрева воды паром в автоклаве в зависимости от параметров процесса необходимо совместное представление модели как во временной (в пространстве состояний), так и в частотной (в виде передаточных функций) областях с анализом соотношения параметров в виде неравенств. Для выбора регулятора процесса удобно применять матрицу экспертных оценок.

Результаты исследования послужат материалом для разработки реальной

модели процесса автоклавирования с учетом статических и динамических характеристик измерительных, преобразовательных и исполнительных элементов, исследования влияния и компенсации инерционностей и нелинейностей реальных элементов с последующей разработкой автоматизированной системы управления процессом автоклавирования. Результаты работы могут быть использованы для исследования общих и прикладных проблем оптимального управления¹⁹ как в пищевой, так и в других отраслях промышленности, например, в производстве строительных материалов [13] и резинотехнических изделий [4; 9].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Структурно-параметрическая идентификация модели процесса стерилизации консервов в автоклавах периодического действия / Е. В. Выскубов [и др.] // Известия вузов. Пищевая технология. 1996. № 1-2. С. 48–50. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/strukturno-parametricheskaya-identifikatsiya-modeli-protsesta-sterilizatsii-konservov-v-avtoklavah-periodicheskogo-deystviya>
2. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. О проблематике синтеза координирующих систем автоматического управления // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. Т. 128, № 3. С. 172–180. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-problematike-sinteza-koordiniruyuschih-sistem-avtomaticheskogo-upravleniya>
3. Мокрушин С. А. Стерилизация консервной продукции // Автоматизация и производство. 2010. № 1'10. С. 30–31. URL: <http://www.owen.ru/37588154>
4. Киргин Д. С. Алгоритмы управления технологическим процессом вулканизации установок автоклав // Вестник ИРГТУ. 2011. Т. 55, № 8. С. 195–199. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algorithm-upravleniya-tehnologicheskim-protsessom-vulkanizatsii-ustanovki-avtoklav>
5. Управление процессами тепловой обработки пищевых продуктов / С. А. Мокрушин [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6. URL: <http://www.science-education.ru/106-7935>
6. Сопоставление модернизированного и традиционного способов стерилизации консервов / А. В. Кайченев [и др.] // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 3. С. 560–565. URL: http://vestnik.mstu.edu.ru/v16_3_n53/560_565_kayche.pdf
7. Мокрушин С. А., Охупкин С. И., Хорошавин В. С. Исследование процесса стерилизации консервной продукции с целью дальнейшей автоматизации // Научный журнал НИУ ИТМО (Сер. «Процессы и аппараты пищевых производств»). 2015. № 4. С. 62–72. URL: http://processes.ihbt.ifmo.ru/ru/article/14223/issledovanie_processa_sterilizatsii_konservnoy_produkcii_s_celyu_dalneyshy_avtomatizatsii.htm
8. Клименко О. М., Трегуб В. Г. Математичне моделювання періодичних процесів в автоклавах з протитиском // Наукові праці НУХТ. 2014. Т. 20, № 6. С. 14–20. URL: http://library.nuft.edu.ua/Naukovi%20praci/T%2020%20_%206.pdf
9. Taricco T. Autoclave cure systems // ASM International, Engineered Materials Handbook. 1987. Т. 1. С. 645–648. URL: https://scholar.google.ru/scholar?hl=ru&as_sdt=0%2C5&q=todd+taricco+autoclave&oeq=
10. Modeling sterilization process of canned foods using artificial neural networks / E. C. Gonçalves // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2005. Т. 44, № 12. С. 1269–1276. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0255270105000644>
11. Хорошавин В. С., Зотов А. В., Мокрушин С. А. Общий подход к представлению динамики процесса в пространстве состояний // Advance Science. 2017. № 2. URL: [http://advanced-science.ru/assets/mgr/docs/2\(2017\)/Технические/horoshavin-k-pechati-ispr.pdf](http://advanced-science.ru/assets/mgr/docs/2(2017)/Технические/horoshavin-k-pechati-ispr.pdf)



12. Пикина Г. А., Бурцева Ю. С. Беспoisковая настройка линейных регуляторов на минимум квадратичного критерия // Теплоэнергетика. 2014. № 3. С. 23–27. URL: http://tepen.ru/uploads/archive/2014/03_14.pdf

13. Alonso A. A., Banga J. R., Perez-Martin R. Modeling and adaptive control for batch sterilization // Computers & Chemical Engineering. 1998. Т. 22, №. 3. С. 445–458. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(97\)00250-0](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(97)00250-0)

Поступила 06.02.2018; принята к публикации 02.04.2018; опубликована онлайн 20.09.2018

Об авторах:

Мокрушин Сергей Александрович, ассистент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36), Researcher ID: G-6566-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6319-9809>, mokrushin@vyatsu.ru

Хорошавин Валерий Степанович, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: G-5298-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4355-3866>, khoroshavin@vyatsu.ru

Охапкин Сергей Иванович, заведующий кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36), кандидат технических наук, доцент, Researcher ID: G-4896-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5372-3139>, ohapkin@vyatsu.ru

Зотов Александр Викторович, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36), кандидат технических наук, Researcher ID: G-4912-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9007-9861>, zotov@vyatsu.ru

Грудинин Виктор Степанович, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36), кандидат технических наук, доцент, Researcher ID: G-5550-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1615-6195>, grudinin@vyatsu.ru

Заявленный вклад соавторов:

С. А. Мокрушин – модель процесса и обзор литературы; В. С. Хорошавин – постановка задачи и выбор методов решения; С. И. Охапкин – анализ материалов по теме исследования; А. В. Зотов – анализ управляемости; В. С. Грудинин – анализ устойчивости.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Asmaev M. P., Lebed B. N., Vyskubov Ye. V. [Structural-parametric identification of the model of the process of canning sterilization in batch autoclaves]. *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya* = Proceedings of High Schools. Food Technology. 1996; 1–2:48–50. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/strukturno-parametricheskaya-identifikatsiya-modeli-protsesta-sterilizatsii-konservov-v-avtoklavah-periodicheskogo-deystviya> (In Russ.)

2. Filimonov A. B., Filimonov N. B. Concerning the problems of synthesis of coordinated systems of automatic control. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. 2012; 128(3):172–180. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-problematike-sinteza-koordiniruyuschih-sistem-avtomaticheskogo-upravleniya> (In Russ.)

3. Mokrushin S. A. Sterilization of canning products. *Avtomatizatsiya i proizvodstvo* = Automation and Production. 2010; 1(10):30–31. Available at: <http://www.owen.ru/37588154> (In Russ.)

4. Kirgin D. S. Control algorithms for the technological process of vulcanization of autoclave installation. *Vestnik IrGTU* = Irkutsk State Technical University Bulletin. 2011; 55(8):195–199. Available at: <https://>

cyberleninka.ru/article/n/algoritmy-upravleniya-tehnologicheskimi-protsessami-vulkanizatsii-ustanovki-avtoklav (In Russ.)

5. Mokrushin S. A., Khoroshavin V. S., Filatova Ye. S., Rusyaeva T. L. Management of food processing processes. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* = Modern Problems of Science and Education. 2012; 6. Available at: <http://www.science-education.ru/106-7935> (In Russ.)

6. Kaychenov A. V., Vlasov A. V., Vlasova A. R., Grokhovskiy V. A., Kuranova L. K. Comparison of modernized and traditional ways of sterilization of canned food. *Vestnik MGTU* = Bauman Moscow State Technical University Bulletin. 2013; 16(3):560–565. Available at: http://vestnik.mstu.edu.ru/v16_3_n53/560_565_kayche.pdf (In Russ.)

7. Mokrushin S. A., Ohapkin S. I., Khoroshavin V. S. Investigation of the process of sterilization of canning products for the purpose of further automation. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Ser. "Protsessy i apparaty pishchevyykh proizvodstv"* = Scientific Journal NRU ITMO. Series "Processes and Food Production Equipment". 2015; 4:62–72. Available at: http://processes.ihbt.ifmo.ru/ru/article/14223/issledovanie_protsessa_sterilizatsii_konservnoy_produkcii_s_celyu_dalneyshey_avtomatizatsii.htm (In Russ.)

8. Klymenko O., Tregub V. Mathematical modeling of periodic processes in counterpressure autoclaves. *Naukovi pratsi NUKhT* = Scientific Works of National University of Food Technologies. 2014; 20(6):14–20. URL: http://library.nuft.edu.ua/Naukovi%20praci/T%202020%20_%206.pdf (In Ukr.)

9. Taricco T. Autoclave cure systems. *ASM International, Engineered Materials Handbook*. 1987; 1:645–648. Available at: https://scholar.google.ru/scholar?hl=ru&as_sdt=0%2C5&q=todd+taricco+autoclave&eq=

10. Gonçalves E. C., Minim A., Coimbra J. S. R., Minim V. P. R. Modeling sterilization process of canned foods using artificial neural networks. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2005; 44(12):1269–1276. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0255270105000644>

11. Khoroshavin V. S., Zotov A. V., Mokrushin S. A. General approach to the representation of the dynamics of the process in the state space. *Advance Science*. 2017; 2. Available at: [http://advanced-science.ru/assets/mgr/docs/2\(2017\)/Tekhnicheskie/horoshavin-k-pechati-ispr.pdf](http://advanced-science.ru/assets/mgr/docs/2(2017)/Tekhnicheskie/horoshavin-k-pechati-ispr.pdf) (In Russ.)

12. Pikina G. A., Burtseva Yu. S. Non-search tuning of linear regulators to a minimum of the quadratic criterion. *Teploenergetika* = Heat Power Engineering. 2014; 3:23–27. Available at: http://tepen.ru/uploads//archive/2014/03_14.pdf (In Russ.)

13. Alonso A. A., Banga J. R., Perez-Martin R. Modeling and adaptive control for batch sterilization. *Computers & Chemical Engineering*. 1998; 22(3):445–458. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(97\)00250-0](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(97)00250-0)

Received 06.02.2018; revised 02.04.2018; published online 20.09.2018

About authors:

Sergey A. Mokrushin, Assistant, Chair of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia), Researcher ID: G-6566-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6319-9809>, mokrushin@vyatsu.ru

Valeri S. Khoroshavin, Professor, Chair of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: G-5298-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4355-3866>, khoroshavin@vyatsu.ru

Sergey I. Ohapkin, Head, Chair of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Researcher ID: G-4896-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5372-3139>, ohapkin@vyatsu.ru

Alexander V. Zotov, Associate Professor, Chair of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: G-4912-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9007-9861>, zotov@vyatsu.ru

Victor S. Grudinin, Associate Professor, Chair of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Researcher ID: G-5550-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1615-6195>, grudinin@vyatsu.ru

Authors' contribution:

S. A. Mokrushin – process model and literature review; V. S. Khoroshavin – statement of the problem and the choice of methods of solution; S. I. Ohapkin – analysis of materials on the research topic; A. V. Zotov – controllability analysis; V. S. Grudinin – stability analysis.

All authors have read and approved the final version of the paper.



Защитная эффективность водорастворимых ингибиторов коррозии

С. М. Гайдар¹, Р. К. Низамов¹, М. И. Голубев²,
И. Г. Голубев^{3*}

¹ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»
(г. Москва, Россия)

²Мытищинский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (г. Москва, Россия)

³ФГБНУ «Росинформагротех» (пос. Правдинский, Россия)

*golubev@rosinformagrotech.ru

Введение. В результате коррозионных повреждений сельскохозяйственных и лесохозяйственных машин увеличиваются расходы на поддержание их работоспособности. Замедлить или приостановить процесс коррозии можно посредством водорастворимых ингибиторов, многие из которых, однако, имеют недостатки, такие как малоэффективность или токсичность. Целью настоящей работы является исследование защитной эффективности водных растворов эфира борной кислоты и триэтаноламина, а также разработка рекомендаций по их использованию для противокоррозионной защиты сельскохозяйственных и лесохозяйственных машин при подготовке к длительному хранению.

Материалы и методы. Защитные композиции были подготовлены путем растворения эфира борной кислоты и триэтаноламина в дистиллированной и технической воде при комнатной температуре. Для исследования использованы водные растворы с концентрацией водорастворимых ингибиторов 5–50 г/л (0,5–5 масс. %). Для оценки их защитной эффективности был применен метод линейного поляризационного сопротивления. В ходе электрохимических исследований использован измерительный комплекс фирмы Solartron (Великобритания). Ускоренные коррозионные испытания проводились на стальных пластинках в гигростате Г-4 по ГОСТ 9.054-75. «Эффект последствия» водорастворимых ингибиторов коррозии оценивался по защитной эффективности остаточной пленки.

Результаты исследования. Изучено влияние концентрации эфира борной кислоты и триэтаноламина в водных растворах на их защитные свойства. Установлено, что эфир борной кислоты и триэтаноламина замедляет анодную реакцию. Анализ результатов исследований показал, что при повышении концентрации водорастворимых ингибиторов коррозии в технической воде скорость коррозии стального электрода снижается. Наиболее заметно это снижение при изменении концентрации в диапазоне 10–50 г/л. С ростом концентрации в растворе эфира борной кислоты и триэтаноламина до 50 г/л их защитная эффективность изменяется на 6–14 %. Получена оптимальная концентрация ингибитора в композиции – 10 г/л. При коррозионных испытаниях стальных пластин защитная эффективность раствора с концентрацией 10 г/л водорастворимого ингибитора составила > 70 %. При попадании

© Гайдар С. М., Низамов Р. К., Голубев М. И., Голубев И. Г., 2018



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

атмосферных осадков на образцы защитная эффективность растворов снижалась до 20–25 %. При испытаниях в закрытом неотапливаемом помещении на стальных образцах в течении года следов коррозии не обнаружено.

Обсуждение и заключения. Исследования показали, что эфир борной кислоты и триэтаноламина является водорастворимым ингибитором коррозии анодного типа. С ростом концентрации водорастворимых ингибиторов коррозии в технической воде скорость коррозии стального электрода снижается. Оптимальная концентрация эфира борной кислоты и триэтаноламина в защитном растворе должна составлять 10 г/л. При коррозионных испытаниях стальных пластин защитная эффективность раствора водорастворимого ингибитора составляла > 70 %. В условиях прямого попадания атмосферных осадков на образцы защитная эффективность растворов снижалась до 20–25 %. При испытаниях в закрытом неотапливаемом помещении на стальных образцах в течении года не наблюдалось следов коррозии. Таким образом, эфир борной кислоты и триэтаноламина эффективен для защиты от атмосферной коррозии в условиях закрытого помещения. На открытых площадках его рекомендуют применять для защиты машин от коррозии при кратковременном хранении. Определена область применения водорастворимого ингибитора при постановке сельскохозяйственных и лесохозяйственных машин на длительное хранение, в том числе предложено совместить стадии очистки машин от загрязнений и консервации их поверхностей для защиты от коррозии. Статья будет полезна специалистам в области защиты лесо- и сельскохозяйственной техники от коррозии при постановке на длительное хранение.

Ключевые слова: сельскохозяйственная машина, лесохозяйственная машина, коррозия, скорость коррозии, консервационный состав, водорастворимый ингибитор, эфир борной кислоты и триэтаноламина, поляризационная кривая, защитная эффективность

Для цитирования: Защитная эффективность водорастворимых ингибиторов коррозии / С. М. Гайдар [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 429–444. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.429-444>

Protective Efficiency of Water-Soluble Corrosion Inhibitors

S. M. Gaidar¹, R. K. Nizamov¹, M. I. Golubev²,
I. G. Golubev^{3*}

¹*Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia)*

²*Mytishchi branch of Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)*

³*Rosinformagrotekh Federal State Budget Scientific Institution (Pravdinskiy, Russia)*

*golubev@rosinformagrotech.ru

Introduction. As a result of damage to agricultural and forestry machines from corrosion, the costs of maintaining their performance are increasing. The use of water-soluble inhibitors can slow or halt the destructive process. However, many of the inhibitors have disadvantages, for example, flammability or toxicity. The purpose of this work is to study the protective effectiveness of aqueous solutions of boric acid ester and triethanolamine and to develop recommendations for their use for anticorrosive protection of agricultural and forestry machinery in long-term storage.

Materials and Methods. Protective compositions were prepared by dissolving boric acid ester and triethanolamine in distilled and industrial water at room temperature. Aqueous solutions with a concentration of water-soluble inhibitors of 5–50 g/l (0.5–5 mass %) were used for research. The linear polarization resistance method was used to assess their



protective efficiency. Solartron (UK) measuring complex was used for electrochemical studies. Accelerated corrosion tests were carried out on steel plates according to GOST 9.054-75 in the g-4 humidistat. The aftereffect of water-soluble corrosion inhibitors was evaluated by the residual film protective efficiency.

Results. The influence of the concentration of the ester of boric acid and triethanolamine in aqueous solutions for their protective properties is studied. It was found that boric acid and triethanolamine slow the anode reaction. The analysis of the research results has showed that the corrosion rate of the steel electrode decreases with increasing the concentration of water-soluble inhibitor in process water. This decrease is the most noticeable when the concentration in the range of 10–50 g/l with an increase in the concentration in the solution of boric acid and triethanolamine to 50 g/l, their protective efficiency varies by 6–14 %. The optimal concentration of the inhibitor in the composition is obtained, which is 10 g/l during corrosion tests of steel plates, the protective efficiency of the solution with a concentration of 10 g/l of the water-soluble inhibitor was more than 70 %. In case of precipitation on the samples, the protective efficiency of the solutions decreased to 20–25 %. When tested in a closed unheated room on steel samples during the year there were no traces of corrosion.

Conclusions. The study demonstrates that boric acid and triethanolamine is a water-soluble inhibitor of anodic corrosion. When the concentration of water-soluble inhibitor in process water increases, the corrosion rate of the steel electrode decreases. Optimum concentration of ester of boric acid and triethanolamine in the protective solution should be 10 g/l. For corrosion tests of steel plates, the shielding effectiveness of a solution of water-soluble inhibitor was more than 70 %. In the conditions of direct exposure to atmospheric precipitation on the samples of the protective efficiency of the solutions decreased to 20–25 %. When tested in a closed unheated room on steel samples there were no traces of corrosion during the year. Thus, the ester of boric acid and triethanolamine is effective to protect against atmospheric corrosion in a closed room. It is recommended to apply it for protecting cars against corrosion at short-term storage on open platforms. The application field of water-soluble inhibitor when agricultural and forestry machines are retained for long-term storage is defined; combine stages of cleaning cars from pollution and preserving their surfaces for protection against corrosion are offered. The article will be useful to specialists in the field of protection of agricultural machinery from corrosion.

Keywords: agricultural and forestry machines, corrosion, corrosion rate, conservation compositions, water-soluble inhibitors, boric acid ester and triethanolamine, polarization curves, protective efficiency

For citation: Gaidar S. M., Nizamov R. K., Golubev M. I., Golubev I. G. Protective Efficiency of Water-Soluble Corrosion Inhibitors. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):429–444. DOI: <https://doi.org/0236-2910.028.201803.429-444>

Введение

На многих предприятиях и в организациях агропромышленного и лесного комплексов не соблюдаются правила хранения машин, некачественно выполняется их противокоррозионная защита. Большая часть сельскохозяйственных и лесохозяйственных машин длительное время хранится на открытых площадках, в результате чего детали подверга-

ются коррозии. Наиболее подвержены коррозионным разрушениям резьбовые соединения, зубья звездочек, втулочно-роликовые цепи и др.¹⁻³ [1] (рис.1).

Для противокоррозионной защиты машин в России и за рубежом разработаны и выпускаются различные консервационные составы [2–5]. Одним из требований, которые положены в основу разработки перспективных консер-

¹ Гайдар С. М. [Технология хранения сельскохозяйственной техники](#). М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2017. 2016 с.

² Черноиванов В. И., Северный А. Э., Зазуля А. Н. [Сохраняемость и противокоррозионная защита техники в сельском хозяйстве](#). М. : ГОСНИТИ, 2010. 266 с.

³ Пучин Е. А., Гайдар С. М. [Хранение и противокоррозионная защита сельскохозяйственной техники](#). М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2011. 511 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19518421>



Р и с. 1. Коррозионные разрушения зубьев звездочек и втулочно-роликовых цепей
F i g. 1. Corrosion destruction of teeth of sprockets and bushing-roller chains

вационных материалов, должна быть их эффективная защитная способность⁴ [6]. Для этих целей перспективными являются пассиваторы и ингибиторы [7–12], однако многие из них имеют недостатки. В России и за рубежом для защиты деталей машин от коррозии применяются водорастворимые ингибиторы⁵ [13–16]. В качестве водорастворимого ингибитора предложен эфир борной кислоты и триэтаноламина. Синтез эфира происходит при реакции конденсации между борной кислотой и триэтаноламином. Целью данной работы является исследование защитной эффективности водных растворов эфира борной кислоты и триэтаноламина, а также разработка рекомендаций по их использованию для противокоррозионной защиты сельскохозяйственных и лесохозяйственных машин при постановке на длительное хранение.

Обзор литературы

Замедлить коррозию поверхностей деталей машин можно путем затруднения анодной или катодной реакций пассиваторами и ингибиторами [7–12]. К ним относятся нитрит натрия, хроматы и дихроматы натрия и калия и др. В то же время следует отметить, что пассиваторы имеют недостатки: в частности, они токсичны. Большой интерес для защиты машин от коррозии, в том числе в закрытых помещениях, представляют водорастворимые ингибиторы; они пожаробезопасны и нетоксичны. В России и за рубежом в качестве водорастворимых ингибиторов широкое применение получили органические соединения и их смеси, которые воздействуют на скорость катодной и анодной реакций⁶ [13–14]. Основу таких ингибиторов составляют фосфаты этаноламинов, полифосфат натрия и другие соединения⁷.

⁴ Голубев М. И. [Методические подходы к выбору консервационных материалов для противокоррозионной защиты лесных машин при их хранении](#) // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК : мат-лы IX Междунар. науч.-практ. конф. «ИнформАгро-2017». 2017. С. 517–521.

⁵ Гайдар С. М. [Теория и практика создания ингибиторов коррозии для консервации сельскохозяйственной техники](#) : монография. М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2011. 304 с.

⁶ Там же.

⁷ Там же.



В последние годы, в том числе за рубежом, особое внимание в исследованиях уделяется ингибиторам коррозии на основе аминов [15–18]. В работе В. И. Левашовой, И. В. Янгировой и Е. В. Казаковой установлено, что использование борорганических соединений в качестве компонентов ингибиторов коррозии позволяет увеличить защитный эффект композиции, а также снизить себестоимость ингибитора за счет уменьшения затрат на синтез [16].

В работах С. М. Гайдара и Ю. И. Кузнецова⁸ [17–18] рассмотрены результаты коррозионных и электрохимических исследований структурных особенностей поверхностных слоев на металлах, защищаемых различными физико-химическими методами. В работах В. И. Вигдоровича и соавт. изучены кинетика и механизм электродных реакций при коррозии ряда металлов, покрытых масляными пленками в различных средах [19–20]. В работе В. В. Быкова, М. И. Голубева и Е. Г. Кузнецовой приведены результаты электрохимических исследований консервационных составов на основе растительных и минеральных масел [21]. В результате выполненного обзора установлено, что эфир борной кислоты и триэтанолamina обладает более высокими защитными свойствами, чем соответствующие эфиры борной кислоты и аминоспиртов [22–23]. Его более высокая защитная способность по сравнению с аминоспиртами объясняется образованием на поверхности металла более плотной молекулярной пленки, обладающей большей защитной способностью [24]. Таким образом, эфир борной кислоты и триэтанолamina можно использовать как водорастворимый ингибитор для защиты машин от атмосферной коррозии при их кратковременном и длительном хранении.

Материалы и методы

Для получения исследуемого раствора эфир борной кислоты и триэтанолamina был растворен в водопровод-

ной и дистиллированной воде при комнатной температуре. В ходе исследований использованы композиции концентрацией (С) 5–50 г/л (0,5–5,0 масс. %). Для оценки их защитных свойств был использован метод линейного поляризационного сопротивления. С помощью коррозиметра «Эксперт-001» была наложена поляризация 10 мВ на рабочий электрод, а также измерен ток коррозии. Были использованы электроды из стали Ст3, зачищенные и обезжиренные ацетоном перед опытом. Продолжительность испытаний в ингибированных растворах и при измерении эффекта последствия составляла от 5 мин до 24 ч. Электрохимические исследования проводились на измерительном комплексе фирмы Solartron (Великобритания), включающем анализатор импеданса SI 1255 и потенциостат SI 1287. Для опытов была использована трехэлектродная электрохимическая ячейка из стекла «Пирекс», у которой анодное и катодное пространство разделено шлифом. В качестве рабочего электрода служила углеродистая сталь Ст3. Вспомогательным электродом служила гладкая платина, в качестве электрода сравнения был использован насыщенный хлоридсеребряный электрод. Электроды выдерживались в растворе 10–15 мин после их погружения для установления квазистационарного потенциала.

Потенциалы были пересчитаны по нормальной водородной шкале. Для пересчета данных в весовые единицы проводилась экстраполяция линейных тафелевых катодных и анодных участков на потенциал коррозии с последующей оценкой тока коррозии использовалась формула

$$K = \gamma i_{\text{кор}}$$

где K – скорость коррозии (г/м²час); γ – электрохимический эквивалент железа с учетом его перехода в раствор (окис-

⁸ Там же.

ление) в виде Fe^{2+} (г/А·час); $i_{кор}$ – ток коррозии (А/м²).

Поляризация проводилась сразу после установления квазистационарного потенциала рабочего электрода в растворе. Если на катодной поляризационной кривой отсутствовали четкие протяженные тафелевские участки, $i_{кор}$ оценивали по точке пересечения соответствующего участка анодной поляризационной кривой с прямой, параллельной оси токов и выходящей из ординаты $E_{кор}$. Поляризационные измерения проводились в водопроводной воде с добавлением ВИК заданной концентрации.

Для ускоренных коррозионных испытаний, которые проводились в водных средах, были использованы прямоугольные пластины размером 60×30×3 мм⁹. Перед опытами они были зачищены, отполированы, обезжирены ацетоном и спиртом, высушены и взвешены на аналитических весах с точностью измерения до $1 \cdot 10^{-4}$ г. При опытах объем раствора составлял не менее 15 см³ на 1 см² площади образца. Продолжительность опытов составляла 14 сут. После экспозиции образцы были протравлены, промыты водой, высушены фильтровальной бумагой и обработаны напильником.

Скорость коррозии (K) оценивали по потерям массы образцов по формуле (2):

$$K = \frac{\Delta m}{S\tau} \quad (2)$$

где Δm – потери массы образцов в процессе эксперимента, г; S – видимая площадь поверхности образца, м²; τ – время экспозиции, час.

Эффективность ВИК оценивали по защитному действию (Z) по формуле (3):

$$Z = \frac{K_0 - K_{инг}}{K_0} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где K_0 и $K_{инг}$ – скорость коррозии в неингибированном и ингибированном растворах соответственно.

Защитные свойства ингибитора оценивались по результатам ускоренных коррозионных испытаний, проводимых в соответствии с ГОСТ 9.054-75¹⁰ в гигростате Г-4 с автоматическим регулированием параметров влажности и температуры, с периодической конденсацией влаги на образцах. Площадь коррозионного поражения определялась по ГОСТ 9.041-74¹¹. Эффект последствия ВИК оценивался по защитной эффективности остаточной пленки ингибированного раствора на образце после сушки с последующей 14-дневной экспозицией в водопроводной и дистиллированной воде [25]. Натурные испытания образцов проводились в условиях открытой атмосферы и в неотапливаемом помещении.

Результаты исследования

Испытания СтЗ в ингибированных растворах по методу линейного поляризационного сопротивления показали уменьшение скорости коррозии в течение 30 мин и последующей ее стабилизацией, что связано с формированием на электроде оксидной пленки с участием ВИК. В ходе противокоррозионной защиты сельскохозяйственных и лесохозяйственных машин при постановке на хранение на стадии очистки или межоперационной консервации не предусмотрен длительный контакт с ингибированным водным раствором. Поэтому важен так называемый «эффект последствия», который пока-

⁹ Там же.

¹⁰ ГОСТ 9.054-75. Единая система защиты от коррозии и старения. Консервационные масла, смазки и ингибированные пленкообразующие нефтяные составы. Методы ускоренных испытаний защитной способности.

¹¹ ГОСТ 9.509-89. Единая система защиты от коррозии и старения. Средства временной противокоррозионной защиты. Методы определения защитной способности.



зывает эффективность влияния предварительного контакта металлической поверхности с водным раствором ингибитора на протекание коррозии на ней. Исследования показали, что после выдерживания образцов в ингибированных водных растворах в течение 24 ч наблюдается сначала резкое уменьшение скорости коррозии стали, а затем ее стабилизация. Изменение концент-

рации ВИК в композиции от 5 до 10 г/л практически не сказывается на изменении скорости коррозии стали. С повышением концентрации водорастворимых ингибиторов коррозии до 50 г/л в воде их защитная эффективность изменяется на 6–14 % (табл. 1)

Анализ результатов электрохимических измерений (табл. 2) и поляризационных кривых (рис. 2) показал,

Таблица 1

Table 1

Зависимость защитной эффективности ингибитора от концентрации в растворе технической воды и продолжительности испытаний Ст3 по методу линейного поляризационного сопротивления

Dependence of inhibitor protective effectiveness on concentration in the process water solution and duration of St3 steel tests by linear polarization resistance method

Продолжительность испытаний от начала коррозионного процесса, мин / Duration of tests from the beginning of corrosion process, min	Концентрация ингибитора, г/л / Inhibitor concentration, g/l		
	5	10	50
	Z	Z	Z
5	65	65	79
10	66	67	82
20	68	70	85
30	70	71	86
60	74	74	85
120	77	80	84
180	79	81	85
240	80	81	84
300	81	82	85
360	82	84	85
1 440	88	89	92

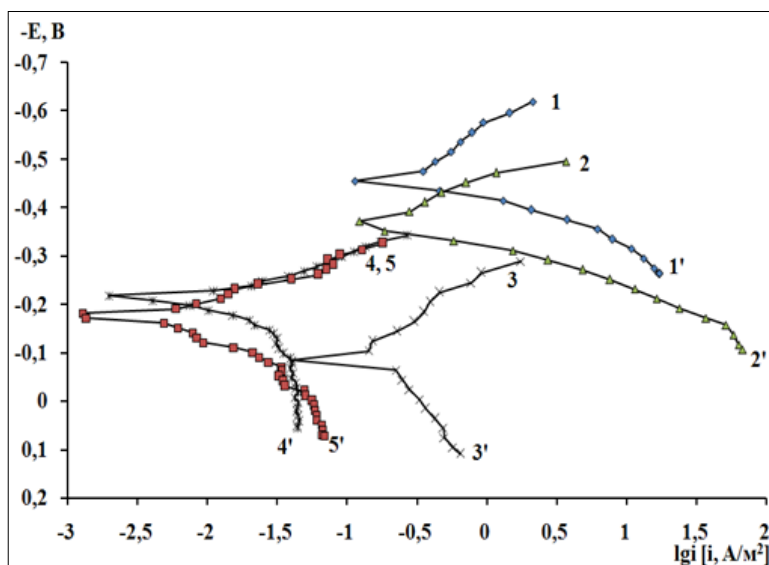
Таблица 2

Table 2

Результаты электрохимических измерений скорости коррозии стали Ст3 в ингибированных ВИК водных растворах

Results of electrochemical measurements of corrosion rate of St3 steel in inhibited of water-soluble inhibitor aqueous solutions

Концентрация, г/л / Concentration, g/l	$-E_{кор}$, В / $-E_{кор}$, V	$i_{кор}$, А/м ² / $i_{кор}$, A/m ²	b_k , мВ / b_k , mV	b_a , мВ / b_a , mV	$K_{з/х} \cdot 10^{-4}$, кг/м ² ч / $K_{з/х} \cdot 10^{-4}$, kg/m ² h	Z, %
1	0,37	0,177	120	60	1,84	30
5	0,09	0,141	180	200	1,46	44
10	0,21	0,006	70	100	0,07	97
50	0,18	0,004	70	100	0,04	98



Р и с. 2. Катодные (1–5) и анодные (1'–5') поляризационные кривые стали Ст3 в технической воде (1, 1'), ингибированной ВИК (2, 2'–5, 5'). Концентрация ВИК, г/л: 2, 2'–1,0; 3, 3'–5,0; 4, 4'–10,0; 5, 5'–50,0

F i g. 2. Cathode (1–5) and anode (1'–5') polarization curves of St3 steel in process water (1, 1'), inhibited of water-soluble inhibitor (2, 2'–5, 5'). Water-soluble inhibitor concentration, g/l: 2, 2'–1,0; 3, 3'–5,0; 4, 4'–10,0; 5, 5'–50,0

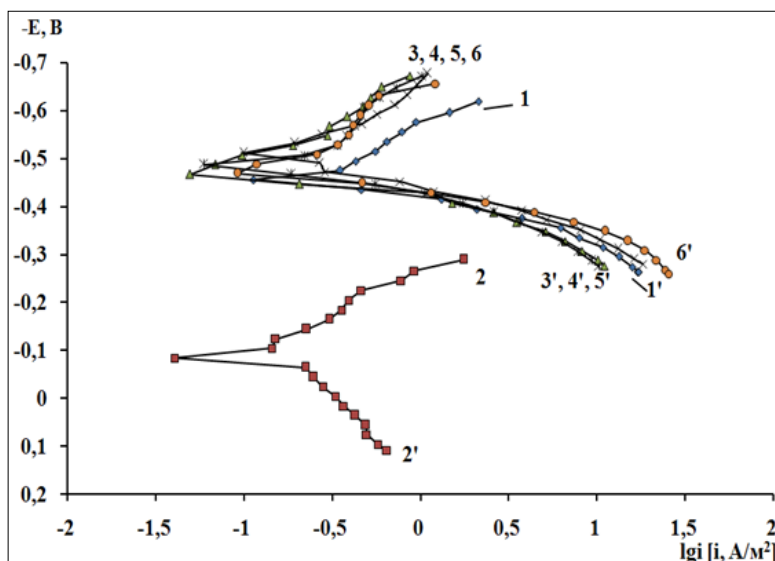
что с повышением концентрации ВИК в технической воде скорость коррозии стального электрода снижается. Наиболее заметно это снижение при изменении концентрации в диапазоне 10–50 г/л. Установлено, что эфир борной кислоты и триэтаноламина является ингибитором анодного типа.

Исследования показали, что при кратковременном контакте металлической поверхности с ингибированным водным раствором обеспечивается высокий «эффект последействия» (рис. 3). Анализ поляризационных кривых показал, что для получения высокого «эффекта последействия» достаточен предварительный пятиминутный контакт стальных пластин с водным раствором, содержащим 5–10 г/л исследуемого водорастворимого ингибитора. Таким образом, при проведении лабораторных исследований необходим только контакт металлических образцов с ингибированным водным раство-

ром в течение 5 мин, а при натурных испытаниях достаточно лишь ополаскивания металлических поверхностей.

Коррозионные испытания образцов из Ст3 показали, что оптимальная концентрация ВИК в растворе технической воды составляет 10 г/л. Использование более высоких концентраций ингибитора в растворах нецелесообразно, т. к. при этом не происходит существенного повышения их защитных свойств. При испытаниях в технической воде защитная эффективность выше, чем в дистиллированной, что объясняется различием pH воды, а также структурой и концентрацией солей (табл. 3).

При коррозионных испытаниях исследована зависимость продолжительности соприкосновения стальных поверхностей с ингибированными растворами с последующим определением скорости протекания коррозионных процессов. Увеличение продолжительности предварительной выдержки



Р и с. 3. Катодные (1–6) и анодные (1'–6') поляризационные кривые стали Ст3 в технической воде (1, 1'); ингибированной ВИК (2, 2'–5, 5'); выдержанные в ингибированном растворе, час: 3, 3'–0,083; 4, 4'–1; 5, 5'–2; 6, 6'–24

Fig. 3. Cathode (1–6) and anode (1'–6') polarization curves of St3 steel in industrial water (1, 1'); inhibited of water-soluble inhibitor (2, 2'–5, 5'); decorated in inhibited solution, hour: 3, 3'–0,083; 4, 4'–1; 5, 5'–2; 6, 6'–24

Таблица 3

Table 3

Защитная эффективность ВИК при выдерживании образцов в течении часа в растворах дистиллированной и технической воды (%)

Protective efficacy of water-soluble inhibitor while maintaining the samples for one hour in solutions of distilled water and process water (%)

Номер п/п / Number	Концентрация ингибитора в растворе, г/л / concentration of inhibitor in solution, g/l	Вода / Water	
		Дистиллированная / Distilled	Техническая / Technical
1	5	34	53
2	10	35	61
3	50	27	65
4	100	27	65

стальных пластин в ингибированных растворах не приводит к существенному возрастанию их защитной эффективности (табл. 4)

Наибольший эффект последствия наблюдается при однократном окунании стальных пластин в водные

растворы, ингибированные ВИК. Оптимальная концентрация ВИК составляет в этом случае 10 г/л (табл. 5).

По данным ускоренных коррозионных испытаний в гистростате Г-4, защитная эффективность ингибиторов особенно заметно повышается при

Т а б л и ц а 4

Table 4

Защитная эффективность ВИК при выдерживании образцов в растворе технической воды (%)

Protective efficacy of water-soluble inhibitor while maintaining the samples in the solution of process water (%)

Номер п/п / Number	Концентрация ингибитора в растворе, г/л / Concentration of inhibitor in solution, g/l	Продолжительность выдерживания образцов в растворе, час / Holding time of samples in solution, hour	
		1	24
1	5	53	54
2	10	61	62
3	50	65	66
4	100	65	66

Т а б л и ц а 5

Table 5

Защитная эффективность ВИК при окунании образцов в раствор технической воды (%)

Protective efficacy of water-soluble inhibitor when dipping the samples in a solution of process water (%)

Номер п/п / Number	Концентрация ингибитора в растворе, г/л / Concentration of inhibitor in solution, g/l	Количество окунаний образцов в раствор, разы / Number of immersion of samples in solution	
		1	2
1	5	71	68
2	10	75	70
3	50	76	71
4	100	73	73

увеличении их концентрации в диапазоне от 5 до 10 г/л. (табл. 6). Увеличение продолжительности выдерживания стальных образцов в ингибированных растворах приводит к незначительному увеличению защитной эффективности. После выдерживания стальных образцов в ингибированных растворах в течение 1 ч оптимальной концентрацией ВИК в технической воде следует считать 10 г/л. Дальнейшее ее повышение не приводит к существенному повышению защитных свойств ингибированных растворов.

Натурные испытания стальных образцов проводились в условиях открытой атмосферы и в закрытом неотапливаемом помещении. Перед испытаниями сталь-

ные пластины выдерживались в течение 1 ч в водном растворе с концентрацией ингибитора 10 г/л. При испытаниях в условиях открытой атмосферы через 9 мес на стальных образцах появились следы коррозии. По нашему мнению, это связано с тем, что с течением времени происходит смывание защитной пленки атмосферными осадками. При испытаниях в условиях неотапливаемого помещения следов коррозии на образцах в течение 1 года визуально не наблюдалось (рис. 4).

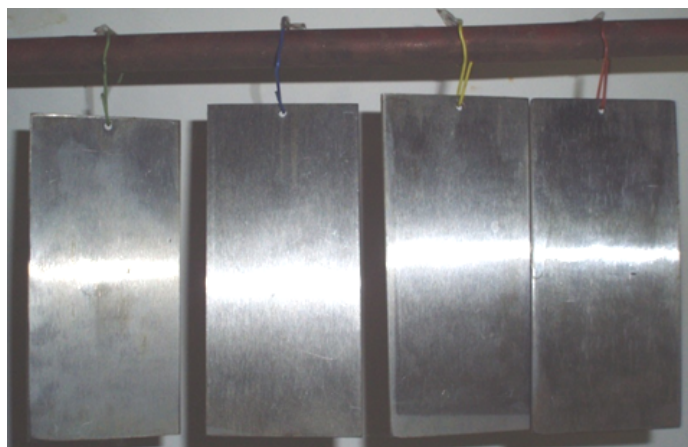
Таким образом, при подготовке сельскохозяйственных и лесохозяйственных машин к длительному хранению можно использовать водорастворимый ингибитор в моющих растворах



Зависимость защитной эффективности ВИК от их концентрации и продолжительности выдерживания образца в растворе технической воды (%)

Dependence of protective efficiency of water-soluble inhibitor on their concentration and duration of exposure of the sample in process water solution (%)

Номер п/п / Number	Концентрация ингибитора в растворе, г/л / Concentration of inhibitor in solution, g/l	Продолжительность выдерживания образца в растворе, ч / Duration of sample retention in solution, h	
		1	24
1	5	69	73
2	10	72	76
3	15	72	77
4	20	72	78
5	25	72	79
6	30	73	80
7	35	73	80
8	40	74	81
9	45	74	81
10	50	74	81



Р и с. 4. Внешний вид образцов после натурных испытаний

F i g. 4. Appearance of samples after full-scale tests

и совмещать стадию очистки машин от загрязнений и консервацию их поверхностей для защиты от коррозии.

Обсуждение и заключения

Исследования показали, что эфир борной кислоты и триэтаноламина является ВИК анодного типа. С ростом концентрации ВИК в технической воде

скорость коррозии стального электрода снижается. Оптимальная концентрация эфира борной кислоты и триэтаноламина в защитном растворе должна составлять 10 г/л. В ходе коррозионных испытаний стальных пластин защитная эффективность раствора водорастворимого ингибитора составляла более

70 %. В условиях прямого попадания атмосферных осадков на образцы защитная эффективность растворов снижалась до 20–25 %. При испытаниях в закрытом неотапливаемом помещении на стальных образцах в течение 1 года не наблюдалось следов коррозии. Таким образом, эфир борной кислоты и триэтаноламина эффективен для защиты от атмосферной коррозии в условиях закрытого помещения. На

открытых площадках его рекомендуется применять для защиты машин от коррозии при кратковременном хранении. Предложено применять водорастворимый ингибитор при подготовке сельскохозяйственных и лесохозяйственных машин к длительному хранению, в том числе следует совмещать стадии очистки машин от загрязнений и консервации их поверхностей для защиты от коррозии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Быков В. В., Голубев М. И.** Мониторинг условий хранения машин лесного хозяйства // Наука в центральной России. 2014. Т. 9, № 3. С. 14–18. URL: <http://vniitin.ru/wp-content/uploads/2018/05/%E2%84%963-2014.pdf>
2. К вопросу эффективности хранения сельскохозяйственной техники / Л. Г. Князева [и др.] // Наука в центральной России. 2017. Т. 30, № 6. С. 37–49.
3. Устройство для приготовления защитных составов при консервации сельскохозяйственной техники / Е. Б. Миронов [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2016. Т. 26, № 4. С. 490–498. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.026.201604.490-498>
4. **Гайдар С. М., Пыдрин А. В., Карелина М. Ю.** Технология консервации автотракторных дизелей рабоче-консервационным составом // Актуальные направления научных исследований XXI века : теория и практика. 2015. Т. 3, № 1 (12). С. 130–144. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23272122>
5. **Gaidar S. M., Nizamov R. K., Golubev M. I.** Conception of corrosion inhibiting factors creation with the usage of nanotechnological approach // Scientific Israel – Technological Advantages. 2012. Vol. 14, no. 3. P. 88–91. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28978056>
6. **Гайдар С. М., Низамов Р. К., Голубев М. И.** Концепция создания ингибиторов коррозии с использованием нанотехнологических подходов. Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2012. Т. 90, № 7. С. 140–142. URL: <http://les-vest.msfu.ru/contentst.shtml>
7. Теория и практика создания ингибиторов атмосферной коррозии / С. М. Гайдар [и др.] // Техника и оборудование для села. 2012. № 4. С. 8–10. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17683616>
8. **Петровская Е. А., Гайдар С. М.** Влияние полифункциональных ингибиторов на коррозионную стойкость низкоуглеродистых сталей в условиях агрессивных сред в АПК // Доклады Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2016. № 288-4. С. 258–261. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32548863>
9. **Бережная А. Г., Иващенко О. А., Чернявина В. В.** Подсолнечный и рапсовый лецитины как ингибиторы коррозии стали // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 8 (ч. 3). С. 365–369. URL: <http://www.applied-research.ru/ru/article/view?id=10035>
10. Влияние состава ингибирующей композиции на защитные свойства при углекислотной коррозии стали / А. Г. Бережная [и др.] // Коррозия: материалы, защита. 2015. № 9. С. 32–35. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24105466>
11. Application of ifhan-118 volatile inhibitor to protect agricultural equipment against atmospheric corrosion / V. I. Vigdorovich [et al.] // Russian Agricultural Sciences. 2016. Vol. 42, no. 2. P. 196–199. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068367416020208>
12. Патент 2597442 Российская Федерация. Ингибитор коррозии металлов / С. М. Гайдар, М. Ю. Карелина, А. В. Пыдрин, Д. И. Петровский, Е. А. Петровская, Е. В. Быкова,



К. В. Быков, М. И. Голубев, А. Е. Шлыков. Оpubл. 15.04.2015. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/259/2597442.html>

13. Кузнецов Ю. И. Органические ингибиторы коррозии: где мы находимся? Обзор. Ч. II. Пассивация и роль химической структуры карбоксилатов // Коррозия: материалы, защита. 2018. № 2. С. 1–12. URL: <http://i.uran.ru/webcab/system/files/journalspdf/korroziya-materialy-zashchita/korroziya-materialy-zashchita-2017-n-1/20171.pdf>

14. Консервационные составы на основе водорастворимых ингибиторов коррозии / Е. Г. Кузнецова [и др.] // Наука в центральной России. 2013. № 5. С. 43–47. URL: [http://nf-innovate.com/content/files/ncr/ncr%20\(13\)-15/ncr%205-13/КУЗНЕЦОВА%20Е.Г.,%20КНЯЗЕВА%20Л.Г.,%20ПРОХОРЕНКОВ%20В.Д.,%20ГАЙДАР.pdf](http://nf-innovate.com/content/files/ncr/ncr%20(13)-15/ncr%205-13/КУЗНЕЦОВА%20Е.Г.,%20КНЯЗЕВА%20Л.Г.,%20ПРОХОРЕНКОВ%20В.Д.,%20ГАЙДАР.pdf)

15. Гайдар С. М., Петровский Д. И., Посунько И. А. Борные производные аминов в качестве водорастворимых ингибиторов коррозии // Коррозия: материалы, защита. 2017. № 12. С. 27–35. URL: <http://i.uran.ru/webcab/system/files/journalspdf/korroziya-materialy-zashchita/korroziya-materialy-zashchita-2017-n12/201712.pdf>

16. Левашова В. И., Янгирова И. В., Казакова Е. В. Обзор ингибиторов коррозии на основе борорганических соединений // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 10–17. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=15408>

17. Kuznetsov Yu. I. Organic corrosion inhibitors: where are we now? A review. Part IV. Passivation and the role of mono- and diphosphonates // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2017. Vol. 6, no. 4. P. 384–427. DOI: <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2017-6-4-3>

18. Kuznetsov Yu. I. Organic corrosion inhibitors: where are we now? A review. Part II. Passivation and the role of chemical structure of carboxylates // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2016. Vol. 5, no. 4. P. 282–318. URL: https://www.researchgate.net/publication/310433287_Organic_corrosion_inhibitors_where_are_we_now_A_review_Part_II_Passivation_and_the_role_of_chemical_structure_of_carboxylates

19. 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, no. 7. P. 1157–1165. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070205116070170>

20. Oil-based preservative materials for protection of copper against corrosion in atmospheres containing SO₂ / V. I. Vigdorovich [et al.] // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2015. Vol. 4, no. 3. P. 210–220. DOI: <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2015-4-3-210-220>

21. Быков В. В., Голубев М. И., Кузнецова Е. Г. Результаты электрохимических исследований консервационных составов на основе растительных и минеральных масел // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 119. С. 39–42. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23766478>

22. Защитная эффективность водорастворимых ингибиторов коррозии при консервации сельскохозяйственной техники / Е. Г. Кузнецова [и др.] // Техника в сельском хозяйстве. 2012. № 6. С. 23–25. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21628102>

23. Кинетика и механизм электродных реакций, протекающих в процессах коррозии ряда металлов, покрытых масляными пленками, в кислых и нейтральных хлоридных средах / В. И. Вигдорич [и др.] // Коррозия: материалы, защита. 2015. № 4. С. 22–30. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23250202>

24. Патент 2355820 Российская Федерация. Водорастворимый ингибитор коррозии металлов / С. М. Гайдар. Заявл. 4.11.2008; опубл. 20.05.09. Бюл. № 14. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2355820>

25. Защитная эффективность ингибированных масляных пленок при коррозии углеродистой стали в растворах NaCl, содержащих сернистую кислоту / П. Н. Бернацкий [и др.] // Коррозия: материалы, защита. 2015. № 10. С. 24–31. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24295022>

Поступила 24.04.2018; принята к публикации 20.06.2018; опубликована онлайн 20.09.2018

Об авторах:

Гайдар Сергей Михайлович, заведующий кафедрой материаловедения и технологии машиностроения, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: I-4723-2018; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4290-2961>, techmash@rgau-msha.ru

Низамов Руслан Каримович, ассистент кафедры материаловедения и технологии машиностроения, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), кандидат технических наук, Researcher ID: I-4768-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1671-6970>, techmash@rgau-msha.ru

Голубев Михаил Иванович, доцент кафедры ЛТ-4, Мытищинский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (141005, Россия, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1), кандидат технических наук, Researcher ID: Q-7109-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7693-8818>, mgolubev@mgul.ac.ru

Голубев Иван Григорьевич, заведующий отделом научно-информационного обеспечения инновационного развития АПК, ФГБНУ «Росинформагротех» (141260, Россия, пос. Правдинский, ул. Лесная, д. 60), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: I-3905-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3754-0380>, golubev@rosinformagrotech.ru

Заявленный вклад соавторов:

С. М. Гайдар – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, проведение теоретических и экспериментальных исследований; патентный анализ, формирование выводов, исследования и доработка текста; Р. К. Низамов – проведение экспериментальных исследований, обработка данных; М. И. Голубев – проведение экспериментальных исследований; литературный анализ, перевод на английский, доработка текста; И. Г. Голубев – критический анализ, обобщение результатов исследований, обзор российских и зарубежных исследований по теме статьи, подготовка начального варианта текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Bykov V. V., Golubev M. I. Monitoring of the storage conditions of forestry machines. *Nauka v tsentralnoy Rossii* = Science in Central Russia. 2014; 9(3):14–18. Available at: <http://vniit.ru/wp-content/uploads/2018/05/%E2%84%963-2014.pdf> (In Russ.)
2. Knyazeva L. G., Petrashev A. I., Prokhorenkov V. D., Klepikov V. V. To the question of efficiency of storage of agricultural machinery. *Nauka v tsentralnoy Rossii* = Science in Central Russia. 2017; 30(6):37–49. (In Russ.)
3. Mironov E. V., Lisunov Ye. A., Krupin A. E., Tarukin E. M. A device for making protective compounds at the agricultural equipment conservation. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2016; 26(4):490–498. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.026.201604.490-498> (In Russ.)
4. Gaidar S. M., Pydrin A. V., Karelina M. Yu. Preservation technology automotive diesel engines-preserved composition. *Aktualnyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* = Actual Directions of Scientific Researches of 21st Century: Theory and Practice. 2015; 3(1):130–144. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23272122> (In Russ.)
5. Gaidar S. M., Nizamov R. K., Golubev M. I. Conception of corrosion inhibiting factors creation with the usage of nanotechnological approach. *Scientific Israel – Technological Advantages*. 2012; 14(3):88–91. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28978056>
6. Gaidar S. M., Nizamov R. K., Golubev M. I. Concept of creating corrosion inhibitors using nanotechnology approaches. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* =



Moscow State Forest University Bulletin – Forest Bulletin. 2012; 90(7):140–142. Available at: <http://les-vest.msfu.ru/contentst.shtml> (In Russ.)

7. Gaidar S. M., Nizamov R. K., Guryanov S. A., Golubev M. I. Theory and practice of creating atmospheric corrosion inhibitors. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Areas. 2012; 4:8–10. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17683616> (In Russ.)

8. Petrovskaya E. A., Gaidar S. M. Influence of multifunctional inhibitors on corrosion resistance of low-carbon steels in aggressive environments in agriculture. *Doklady Timiryazevskoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Reports of Timiryazev Agricultural Academy. 2016; 288-4:258–261. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32548863> (In Russ.)

9. Berezhnaya A. G., Ivashchenko O. A., Chernyavina V. V. Sunflower and rapeseed lecithins as corrosion inhibitors of steel. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy* = International Journal of Applied and Fundamental Research. 2016; 8(3):365–369. Available at: <http://www.applied-research.ru/ru/article/view?id=10035> (In Russ.)

10. Berezhnaya A. G., Chernavina V. V., Kiyantsa E. A., Mishurov V. I., Markosyan A. A. Influence of the composition of the inhibiting composition on the protective properties of in carbon-dioxide steel corrosion. *Korroziya: materialy, zashchita* = Corrosion: materials, protection. 2015; 9:32–35. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24105466> (In Russ.)

11. Vigdorovich V. I., Knyazeva L. G., Zazulya A. N., Kuznetsova E. G., Andreev N. N., Uryadnikov A. A., Dorokhov A. V. Application of Ifhan-118 volatile inhibitor to protect agricultural equipment against atmospheric corrosion. *Russian Agricultural Sciences*. 2016; 42(2):196–199. Available at: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068367416020208>

12. Russian Federation Patent 2597442. Metal Corrosion Inhibitor. Gaidar S. M., Karelina M. Yu., Pydrin A. V., Petrovskiy D. I., Petrovskaya Ye. A., Bykova Ye. V., Bykov K. V., Golubev M. I., Shlykov A. Ye. Published 15.04.2015. Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/259/2597442.html> (In Russ.)

13. Kuznetsov Yu. I. Organic corrosion inhibitors: where are we now? A review. Part IV. Passivation and the role of mono- and diphosphonates. *Korroziya: materialy, zashchita* = Corrosion: Materials, Protection. 2018; 2:1–12. Available at: <http://i.uran.ru/webcab/system/files/journalspdf/korroziya-materialy-zashchita/korroziya-materialy-zashchita-2017-n-1/20171.pdf> (In Russ.)

14. Kuznetsova E. G., Knyazeva L. G., Prokhorenkov V. D., Gaidar S. M. Conservation compositions based on water-soluble corrosion inhibitors. *Nauka v Tsentralnoy Rossii* = Science in Central Russia. 2013; 5:43–47. Available at: [http://nf-innovate.com/content/files/ncr/ncr%201\(13\)-15/ncr%205-13/KV3HEIIOBA%20E.G.%20KNYZEBA%20L.G.%20IPOXOPEHKOB%20B.D.%20GAYDAR.pdf](http://nf-innovate.com/content/files/ncr/ncr%201(13)-15/ncr%205-13/KV3HEIIOBA%20E.G.%20KNYZEBA%20L.G.%20IPOXOPEHKOB%20B.D.%20GAYDAR.pdf) (In Russ.)

15. Gaydar S. M., Petrovskiy D. I., Posunko I. A. Boric derivatives of amines as a water-soluble inhibitors of corrosion. *Korroziya: materialy, zashchita* = Corrosion: Materials, Protection. 2017; 12:27–35. Available at: <http://i.uran.ru/webcab/system/files/journalspdf/korroziya-materialy-zashchita/korroziya-materialy-zashchita-2017-n12/201712.pdf> (In Russ.)

16. Levashova V. I., Yangirova I. V., Kazakova Ye. V. Review of corrosion inhibitors based on boron compounds. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* = Modern Problems of Science and Education. 2014; 6:10–17. Available at: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=15408> (In Russ.)

17. Kuznetsov Yu. I. Organic corrosion inhibitors: where are we now? A review. Part IV. Passivation and the role of mono- and diphosphonates. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2017; 6(4):384–427. DOI: <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2017-6-4-3>

18. Kuznetsov Yu. I. Organic corrosion inhibitors: where are we now? A review. Part II. Passivation and the role of chemical structure of carboxylates. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2016; 5(4):282–318. Available at: https://www.researchgate.net/publication/310433287_Organic_corrosion_inhibitors_where_are_we_now_A_review_Part_II_Passivation_and_the_role_of_chemical_structure_of_carboxylates

19. Vigdorovich V. I., Knyazeva L. G., Kuznetsova E. G., Tsygankova L. E., Uryadnikov A. A., Shel N. V. 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. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070205116070170>

20. Vigdorovich V. I., Shel N. V., Tsygankova L. E., Bernatsky P. N. Oil-based preservative materials for protection of copper against corrosion in atmospheres containing SO₂. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2015; 4(3):210–220. DOI: <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2015-4-3-210-220>
21. Bykov V. V., Golubev M. I., Kuznetsova Ye. G. Results of electrochemical studies of preservative compositions based on vegetable and mineral oils. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2015; 119:39–42. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23766478> (In Russ.)
22. Kuznetsova E. G., Prokhorenkov V. D., Knyazeva L. G., A. I. Petrashev, Gaidar S. M. Protective efficacy of water soluble corrosion inhibitors in conservation of agricultural machinery. *Tekhnika v selskom khozyaystve* = Machinery in Agriculture. 2012; 6:23–25. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21628102> (In Russ.)
23. Vigdorovich V. I., Tsygankova L. E., Shel N. Oh. Knyazeva L. G., Uryadnikov A. A., Kuznetsova E. G. Kinetics and mechanism of electrode reactions occurring in the corrosion processes of a number of metals coated with oil films in acidic and neutral chloride media. *Korroziya: materialy, zashchita* = Corrosion: Materials, Protection. 2015. 4:22–30. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23250202> (In Russ.)
24. Russian Federation Patent 2355820. Water-soluble corrosion inhibitor of metals. Author: Gaidar S. M. Declared 4.11.2008; published 20.05.09. Bulletin no. 14. Available at: <http://www.freepatent.ru/patents/2355820> (In Russ.)
25. Bernatsky P. N., Shel N. O., Vigdorovich V. I., Tsygankova L. E., Kotina A. Yu. Protective efficiency of inhibited oil films during corrosion of carbon steel in NaCl solutions containing sulfuric acid. *Korroziya: materialy, zashchita* = Corrosion: Materials, Protection. 2015; 10:24–31. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24295022> (In Russ.)

Received 24.04.2018; revised 20.06.2018; published online 20.09.2018

About authors:

Sergey M. Gaidar, Head, Chair of Materials Science and Machine Building Technology, Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: I-4723-2018; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>, techmash@rgau-msha.ru

Ruslan K. Nizamov, Assistant, Chair of Materials Science and Machine Building Technology Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: I-4768-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1671-6970>, techmash@rgau-msha.ru

Mikhail I. Golubev, Associate Professor, LT-4 Chair, Mytishchi branch of Bauman Moscow State Technical University (1 1st Institutskaya St. Mytishi 141005, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: Q-7109-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7693-8818>, mgolubev@mgul.ac.ru

Ivan G. Golubev, Head, Department of Scientific and Information Support of Innovative Development, Federal State Budget Scientific Institution “Rosinformagrotekh” (60 Lesnaya St., Pravdinskiy 141260, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: I-3905-2018; <https://orcid.org/0000-0002-3754-0380>, golubev@rosinformagrotech.ru

Authors' contribution:

S. M. Gaidar – scientific management, formulation of the basic concept of the study, theoretical and experimental studies, patent analysis, conclusions, research and revision of the text; R. K. Nizamov – experimental studies, data processing; M. I. Golubev – experimental studies, literary analysis, English translation, text revision; I. G. Golubev – critical analysis, generalization of research results, review of Russian and foreign research on the topic of the article, preparation of the initial version of the text.

All authors have read and approved the final version of the paper.



Определение эксплуатационных показателей трактора «Беларус-922» при работе на смесевом топливе

С. А. Плотников^{1*}, Ш. В. Бузиков¹, В. С. Товстыка²,
П. Н. Черемисинов¹

¹ ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»
(г. Киров, Россия)

² УО «Белорусская государственная орденов
Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени
сельскохозяйственная академия»

(г. Горки, Беларусь)

*PlotnikovSA@bk.ru

Введение. Актуальность исследования обусловлена необходимостью изучения влияния смесового топлива, состоящего из дизельного топлива и рапсового масла, на эксплуатационные показатели трактора при выполнении сельскохозяйственных операций. Целью исследования является получение количественных показателей трактора «Беларус-922» с применением смесового топлива, состоящего из дизельного топлива и рапсового масла, при выполнении сельскохозяйственных операций. **Материалы и методы.** Для достижения цели в производственных условиях проведены эксплуатационные исследования трактора с установленным на него комплектом приборов и оборудования.

Результаты исследования. Впервые получены количественные эксплуатационные показатели трактора «Беларус-922» при его работе на чистом дизельном или смесовом топливе, состоящем из 60 % дизельного топлива и 40 % рапсового масла, во время выполнения вспашки и предпосевной обработки почвы. Анализ данных показал, что изменение удельных эксплуатационных показателей трактора при выполнении сельскохозяйственных операций во время его работы на смесовом и дизельном топливе является неоднозначным. В ходе вспашки увеличились следующие значения: G_t – с 11,86 до 12,54 кг/га, количество NO_x – с 344,4 до 373,2 г/га, CO – с 136,9 до 137,1 г/га; при этом количество C уменьшилось с 11,2 до 8,04 г/га. Во время выполнения предпосевной обработки почвы значения G_t и NO_x увеличились с 4,61 до 4,86 кг/га и с 137,9 г/га до 151 г/га соответственно; CO и C уменьшились с 60,7 до 45,6 г/га и с 6,52 до 4,04 г/га соответственно.

Обсуждение и заключения. Полученные результаты доказывают целесообразность применения смесового топлива для улучшения эксплуатационных показателей трактора «Беларус-922» при выполнении сельскохозяйственных операций.

Ключевые слова: эксплуатационные показатели, смесовое топливо, рапсовое масло, тяговые испытания, агротехнические требования

Для цитирования: Определение эксплуатационных показателей трактора «Беларус-922» при работе на смесовом топливе / С. А. Плотников [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 445–459. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.445-459>



Благодарности: Авторы выражают признательность и благодарность доктору технических наук, профессору, заведующему кафедрой тракторов, автомобилей и машин для агрообустройства УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» А. Н. Карташевичу за оказанную помощь в получении экспериментального материала. Работа выполнена при финансовой поддержке ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет».

Determination of Operational Parameters for Belarus 922 Tractor Running on Mixed Fuel

S. A. Plotnikov^{1*}, S. V. Buzikov¹, V. S. Taustyka²,
P. N. Cheremisinov¹

¹Vyatka State University (Kirov, Russia)

²Belarus State Agricultural Academy (Gorki, Belarus)

*PlotnikovSA@bk.ru

Introduction. The paper explores an impact of mixed fuel on the performance of the tractor in the process of agricultural work. The aim of the study is to obtain quantitative indicators of Belarus 922 tractor. The mixed fuel consists of diesel and rapeseed oil.

Materials and Methods. The operational research of the tractor with the installed set of instruments and equipment was carried out in the conditions of agricultural production.

Results. We obtained quantitative performance of Belarus 922 tractor running on pure diesel oil and on mixed fuel consisting of 60 % diesel and 40 % of rapeseed oil in plowing the soil and in processing before sowing. The analysis of the data showed a change in the specific performance indicators of the tractor running on the mixed and diesel fuel during agricultural processing. When plowing G_t value increased from 11.86 to 12.54 kg/ha, the amount of NO_x increased from 344.4 to 373.2 g/ha, CO value increased from 136.9 to 137.1 g/ha, C value decreased from 11.2 to 8.04 g/ha. When processing the soil before sowing G_t value increased from 4.61 to 4.86 kg/ha and NO_x value from 137.9 g/ha to 151 g/ha, CO value decreased from 60.7 to 45.6 g/ha and C value decreased from 6.52 to 4.04 g/h.

Conclusions. The test results demonstrate the expediency of using mixed fuel to improve the performance of Belarus 922 tractor in agricultural production.

Keywords: performance indicators, mixed fuel, rapeseed oil, traction tests, agrotechnical requirements

For citation: Plotnikov S. A., Buzikov S. V., Tovstika V. S., Cheremisinov P. N. Determination of Operational Parameters for Belarus 922 Tractor Running on Mixed Fuel. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):445–459. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.445-459>

Acknowledgements: The authors express their gratitude to A. N. Kartashevich, Professor, D.Sc. (Engineering), Head of Chair of Tractors, Cars and Machines for Environmental Engineering of the Belarus State Agricultural Academy for the rendered help in obtaining experimental material. The work was carried out with financial support from the Vyatka State University.

Введение

В 2000–2010-е гг. происходит стремительное развитие стандартов, ограничивающих выбросы вредных веществ в атмосферу автотракторными двигателями. Каждые 3–4 года требования к составу отработавших газов

ужесточаются. В настоящее время российские, белорусские и европейские производители двигателей руководствуются нормами выбросов, заложенными в стандартах Euro, Tier, Stage и ГОСТ [1]. Закрепленный этими нормативными документами уровень вы-



бросов токсичных компонентов замеряется в ходе стендовых испытаний двигателей в строго определенных режимах и условиях окружающей среды [2].

Такой подход к анализу уровня экологических показателей двигателей не позволяет всесторонне оценить действительный объем выбросов токсичных веществ в атмосферу. Поскольку токсичные компоненты оказывают вредное воздействие на здоровье человека и на изменения климата, измерение реального уровня выбросов вредных веществ в атмосферу, производимых двигателями внутреннего сгорания в условиях эксплуатации, является крайне важным [3].

Мониторинг экологических показателей двигателей тяжелых грузовиков во время их эксплуатации начал проводиться после введения стандарта EURO-6 в 2013 г. Согласно данному стандарту, экологические показатели транспортного средства, которое введено в эксплуатацию, должны замеряться периодически в течение жизненного цикла машины с использованием портативной системы анализа токсичных компонентов отработавших газов (ПСАТОГ) [4].

В Европейском Союзе начиная с 2017 г. легковые автомобили, также в течение жизненного цикла, проходят тесты, целью которых является измерение уровня выбросов в реальных условиях эксплуатации. Для внедорожной техники возможно применение метода, используемого при испытаниях тяжелых грузовиков. В то же время вследствие большого разнообразия внедорожной техники и условий ее эксплуатации требуется совершенствование имеющихся методик. С целью распространения ПСАТОГ была запущена пилотная программа¹, цель которой – контроль

уровня выбросов токсичных компонентов внедорожной техникой. Ожидается, что в 2019 г. использование ПСАТОГ для внедорожной техники будет законодательно закреплено на территории ЕС. Соответственно, через некоторое время использование данных систем станет обязательным и на территории Таможенного Союза².

Несмотря на отсутствие законодательной базы, которая регламентировала бы использование ПСАТОГ для внедорожной техники, в этой области ведутся активные исследования с использованием различного оборудования и методов оценки³ [2; 4].

Обзор литературы

В проведенных исследованиях при использовании альтернативного топлива на экскаваторе с дизельным двигателем средние выбросы токсичных компонентов (NO_x и CO) колебались в пределах от 0,04 до 5,7, от 12,6 до 81,8 и от 7,9 до 285,7 г/кг топлива соответственно. Массовые выбросы C при работе экскаватора сократились на 20 % [5].

В Федеральном университете Святой Марии на динамометрическом стенде были проведены испытания двух двигателей сельскохозяйственного назначения при использовании дизельного топлива (ДТ) и этанола на частотах 1 200–2 300 мин⁻¹. В результате были получены данные, свидетельствующие об уменьшении мощности двигателя и увеличении удельного расхода топлива при работе на этаноле [6].

Анализ работы дизельного двигателя сельскохозяйственного трактора с использованием ДТ S500 (B5) и смеси с 3 % (ED3), 6 % (ED6), 9 % (ED9), 12 % (ED12) и 15 % (ED15) этанола показал, что при использовании B5 и ED3 значения крутящего момента и мощности двигателя не отличались; при исполь-

¹ Brooks P. A. [Certified Mail an Empfänger](#). P. 1–6.

² [Real-world exhaust emissions from modern diesel cars : technical report](#) / V. Franco [et al.]. Beijing ; Berlin ; Brussels ; San Francisco ; Washington, 2014. P. 53.

³ Там же.

зовании ED3 расход топлива был ниже на 5,92 %. При использовании ED12 мощность уменьшилась на 2,97 % по сравнению с B5, расход топлива не изменился. На ED15 мощность снизилась на 6,3 %, а расход топлива возрос на 3,77 %, как и на B5. С увеличением содержания этанола в B5 произошло снижение запаса скорости и индекса эластичности двигателя, а значение крутящего момента двигателя стало выше [7].

При испытании трактора на растительном масле (PM) при частоте вращения коленчатого вала двигателя в диапазоне 2 400–1 100 мин⁻¹ были получены данные, свидетельствующие об уменьшении значения крутящего момента на 4,21–14,48 %, и об увеличении среднего коэффициента дымности [8].

Использование смеси ДТ и рапсового масла на одноцилиндровом дизельном двигателе при частоте вращения коленчатого вала (KB) 1 500 мин⁻¹ с холодной и горячей рециркуляцией выхлопных газов показало снижение NO_x на 20 % [9].

Применение касторового масла с его содержанием в смеси 5 %, 25 %, 50 % биодизеля (B50) и 100 % биодизеля (B100) в качестве топлива для трактора сельскохозяйственного назначения показало увеличение удельного расхода топлива [10].

Исследования на тракторе Zetor Forterra 8641 с применением 100 % метилового эфира PM и 100 % гидрогенизированного масла показали, что рабочие параметры двигателя существенно не изменились при использовании данных видов топлива [11]; использование бутанола на том же тракторе с содержанием его в смеси с ДТ 10, 30 и 50 % [12] способствовало увеличению расхода топлива.

Использование топливной смеси, состоящей из 50 % PM и 50 % спирта,

привело к снижению общего количества выбросов токсичных компонентов по сравнению с обычным дизелем [13].

Использование чистого биодизельного топлива марки B100 в тракторном двигателе, установленном на стенде, способствовало снижению мощности и крутящего момента на 9 % и 7 % соответственно, а также увеличению удельного расхода топлива на 13 % [14].

Экспериментальные исследования на тракторе КЛААС Арес 557ATX, целью которых было определение мощности двигателя, крутящего момента, расхода топлива и токсичности отработавших газов на двух различных видах топлива (гидрированных растительных маслах и ДТ), показали уменьшение средней эффективной мощности и крутящего момента на 5,0 % по сравнению с работой на ДТ. Часовой расход топлива уменьшился приблизительно на 1 % по сравнению с работой на ДТ, а удельный расход топлива увеличился в среднем на 4,1 %. Снижение NO_x составило 11,8 %, снижение CO и CO_2 – 14,5 и 5,2 % соответственно⁴.

Исследование влияния биодизельного топлива на показатели работы и состав выхлопных газов 4-цилиндрового дизельного двигателя мощностью 48 кВт показало увеличение мощности двигателя, удельного расхода топлива и тепловой эффективности, а также снижение выбросов и температуры выхлопных газов [15].

Использование биодизельного топлива из микроводорослей *Chlorella protothecoides* (ГЦН-B20) на сельскохозяйственном тракторном двигателе мощностью 25,8 кВт показало, что существенной разницы между показателями производительности двигателя нет, но в то же время значительно снижается уровень выбросов CO и CO_2 [16].

Применение отходов растительного масла (ВТО) на 3-цилиндровом 4-такт-

⁴ [Investigation in tractor CLAAS ARES 557ATX operating parameters using hydrotreated vegetable oil fuel](#) / K. Sondors [et al.] // Engineering for Rural Development. 2014. P. 62–68.



ном тракторном двигателе мощностью 48 кВт способствовало уменьшению крутящего момента на 0,09–3,00 % в зависимости от цикла [8].

По сравнению с нефтяным дизельным топливом использование масла сои (B100) и оливкового масла (B100) привело к снижению мощности, крутящего момента, а также удельного и часового расхода топлива дизелем [17].

Исследования характеристик тракторного двигателя на смесевом топливе (СТ) CSO-B20 показали, что выбросы, температура выхлопных газов и термический КПД снизились, но увеличился удельный расход СТ [18].

Влияние биодизельного топлива, произведенного из отходов растительного масла (ВТО) и его смесей с ДТ, на работу тракторного двигателя заключается в изменении крутящего момента и мощности, удельного расхода топлива, термического КПД, а также выбросов NO_x и твердых частиц (ТЧ) [19].

Измерение параметров двигателя сельскохозяйственного трактора мощностью 53 кВт, работающего на топливных смесях B5, B20, B40, B60, B80 и B100, показало, что с повышением уровня биодизеля в смеси наблюдается увеличение расхода топлива, снижение энергопотребления и повышение тепловой эффективности двигателя [20].

Б. Гокалп и соавт. в своей работе исследуют свойства соевого метилового эфира (МСП) и его сочетания с ДТ в смеси в объемах 5 %, 20 % и 50 %. Полученные учеными результаты свидетельствуют о том, что использование биодизельного топлива приводит к снижению дымности до 74 %, удельного расхода топлива до 12 % и выбросов CO при использовании B5 и B100 до 3 % и 52 % соответственно [21].

Анализ влияния ДТ (B0) и трех различных смесей биодизельного топлива на основе РМ (B10, B20, B30) на эксплуатационные характеристики трактора показывает, что расход топлива снижается на 2–4 % [22].

Исследование производительности дизельного двигателя трактора ВАЛМЕТ 85 мощностью 58,2 кВт, работающего на минеральном дизельном и смесевом минеральном биодизельном топливе B2 (98 % минерального ДТ и 2 % биодизеля), B5 (95 % минерального ДТ и 5 % биодизеля), B20 (80 % минерального ДТ и 20 % биодизеля), и B100 (100 % биодизеля), свидетельствует об увеличении термического КПД [23].

К. Нил, Д. Джонсон и Дж. Уордлоу сравнили мощность, топливную экономичность и выбросы NO_x при эксплуатации трактора мощностью 23,9 кВт на СТ, состоящем из 20 % биодизеля (B20) и 80 % ДТ, с аналогичными параметрами при использовании СТ (B100) в двух нагрузочных режимах работы. Отмечено, что крутящий момент и мощность во втором случае снизились [24].

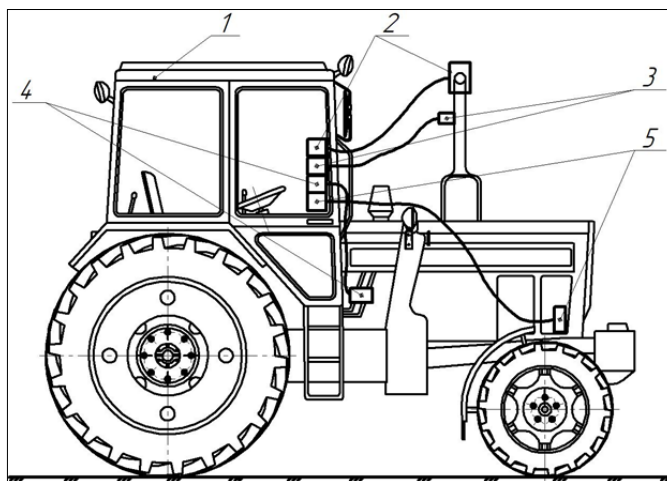
Сравнительные экспериментальные исследования эффективности использования топлива и оценка выбросов выхлопных газов среди различных смесей биодизельного топлива для различных полевых операций в производстве сельскохозяйственных культур, таких как посев сои с использованием трехметровой сеялки, свидетельствуют о снижении массовой эмиссии NO_x в атмосферу [25].

Использование метилового эфира РМ (биодизель) и обычного ДТ, а также смеси из них, на двух сельскохозяйственных тракторах показывает линейные уменьшения выбросов вредных веществ в зависимости от уровня смеси [26].

Материалы и методы

Для проведения исследований на трактор «Беларус-922» с дизельным двигателем марки Д-245.5 были установлены приборы и оборудование, общий вид и перечень которых представлен на рис. 1 и в табл. 1.

Исследования проводились на опытном поле УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия».



Р и с. 1. Общий вид трактора с установленным оборудованием: 1 – трактор «Беларус-922»; 2 – дымомер; 3 – газоанализатор; 4 – объемный датчик расхода дизельного топлива; 5 – тахометр
 Fig. 1. General view of the tractor with installed equipment: 1 – Belarus 922 tractor; 2 – opacimeter; 3 – gas analyzer; 4 – volumetric sensor of diesel fuel consumption; 5 – tachometer

Т а б л и ц а 1
 Table 1

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

Измеряемый параметр / Measured parameter	Наименование прибора или оборудования / The name of the device or equipment	Марка прибора / Device model	Класс точности (погрешность) / Accuracy class (deviation)
Дымность отработавших газов / Opacity of exhaust gases	Дымомер / Opacimeter	MDO 2 LON	1,5 %
Токсичность отработав- ших газов / Toxicity of exhaust gases	Газоанализатор / Gas analyzer	MGT 5	±
Расход топлива / Fuel consumption	Объемный датчик расхода дизельного топлива / Volu- metric sensor of diesel fuel consumption	ДРТ-5 с терми- налом СКРТ 31 / DRT-5 with SKRT 31 terminal	±
Частота вращения ко- ленчатого вала / The fre- quency of rotation of the crankshaft	Тахометр / Tachometer	AVL DISpeed 492	±

Работа трактора в промышленных условиях исследовалась при выполнении двух сельскохозяйственных операций: вспашки и предпосевной обработки почвы. При выполнении вспашки в состав машинотракторного агрегата (МТА) входили трактор «Беларус-922»

и трехкорпусный плуг ПЛН-3-3,5, а при выполнении предпосевной обработки почвы – трактор «Беларус-922» и комбинированный агрегат АКШ-3,6-01.

Испытания трактора с плугом ПЛН-3-35 проводились в следующих полевых условиях: уклон поля – менее



0,3°; влажность почвы – 17,3 %; твердость почвы – 199,7 Н/см²; предшествующая обработка – стерня. Испытания с агрегатом АКШ-3,6-01 проводились после вспашки на этом же участке поля, но при более высокой влажности почвы – 18,8 %⁵⁻⁶ (рис. 2).

Перед началом испытаний трактор был укомплектован в соответствии с требованиями завода-изготовителя; было установлено требуемое давление в шинах, проверена высота почвозацепов, трактор был прогрет под нагрузкой в течение 30 мин. ДТ и смазочные материалы, применяемые в тракторе при испытаниях, соответствовали эксплуатационной документации на трактор⁷⁻⁹.

При проведении испытаний трактора с плугом ПЛН-3-35 и агрегатом АКШ-3,6-01 устанавливались скорости движения, соответствующие агротехническим требованиям¹⁰. Для этого поддерживалась постоянная частота вращения коленчатого вала дизеля на уровне 1 800 мин⁻¹ при вспашке и 1 700 мин⁻¹ при работе с агрегатом АКШ-3,6-01. Вспашка проводилась на 3 передаче 1 диапазона, а работа с агрегатом АКШ-3,6-01 – на 2 передаче 1 диапазона с включенным мультипликатором. Все испытания проводились в пятикратной повторности опытов.

Для определения реальной скорости трактора был размечен зачетный



Р и с. 2. Трактор «Беларус-922» с комбинированным агрегатом АКШ-3,6-01

F i g. 2. Belarus 922 tractor with AKSh-3,6-01 aggregate combined tillage

⁵ Коробейников А. Т., Лихачев В. С., Шолохов В. Ф. [Испытания сельскохозяйственных тракторов](#). М. : Машиностроение, 1985. 240 с.

⁶ Барский И. Б., Анилович В. Я., Кутьков Г. М. [Динамика трактора](#). М. : Машиностроение, 1973. 280 с.

⁷ [Руководство по эксплуатации «Беларус 812/822/912/922» 822-0000010РЭ: утв. ПО «Минский тракторный завод»](#). Минск, 1999. 339 с.

⁸ ГОСТ 30745-2001 (ИСО 789-9-90). [Тракторы сельскохозяйственные. Определение тяговых показателей](#). 2002. 12 с.

⁹ [Тракторные дизели : справочник](#). / Под ред. Б. А. Взорова [и др.]. М. : Машиностроение, 1981. 585 с.

¹⁰ ГОСТ 30745-2001 (ИСО 789-9-90). [Тракторы сельскохозяйственные. Определение тяговых показателей](#). 2002. 12 с.

участок длиной 200 м; фиксировалось время движения трактора при прохождении этого участка.

Средняя скорость трактора рассчитывалась по формуле¹¹:

$$V_{cp} = \frac{S}{t}, \quad (1)$$

где S – длина зачетного участка, км; t – время одной повторности опыта, ч.

Частота вращения КВ трактора измерялась и контролировалась тахометром AVL DISpeed 492. Дымность и токсичность ОГ замерялись во время движения и фиксировались в протоколе при помощи дымомера MDO-2 LON и газоанализатора MGT-5 соответственно. Расходы ДТ и СТ измерялись расходомером ДРТ-5 с терминалом СКРТ 31.

Согласно техническим характеристикам, часовая производительность МТА с плугом ПЛН-3-35 при скорости движения $V_p = 8,7$ км/ч составляет 0,94 га/ч, а производительность МТА с АКШ-3,6-01 при $V_p = 9,6$ км/ч – 2,61 га/ч^{12–13}. Методика проведения эксперимента не предусматривала замеры на холостых поворотах и во время остановок с работающим двигателем, поэтому расчет погектарного расхода топлива проводился по следующей формуле:

$$G'_m = \frac{G_m}{W_q}, \quad (2)$$

где G'_m – погектарный расход топлива, кг/га; G_m – часовой расход топлива, кг/ч; W_q – часовая производительность трактора, га/ч.

Для расчета погектарных выбросов токсичных компонентов использовались аналогичные формулы:

$$E'_C = \frac{E_C}{W_q}, \quad (3)$$

$$E'_{NOx} = \frac{E_{NOx}}{W_q}, \quad (4)$$

$$E'_{CO} = \frac{E_{CO}}{W_q}, \quad (5)$$

где E'_C , E'_{NOx} , E'_{CO} – погектарные выбросы C , NO_x и CO , г/га; E_C , E_{NOx} , E_{CO} – часовые выбросы C , NO_x и CO , г/ч.

Во время проведения экспериментальных исследований осуществлялась одновременная запись всех контролируемых параметров, что позволило повысить объективность данных. Величина предельных ошибок при однократных измерениях и наибольшая возможная статистическая ошибка среднего арифметического отклонения при многократных номерах величин определялись по известным методикам¹⁴.

Результаты исследования

В табл. 2 представлены количественные значения эксплуатационных показателей трактора при работе на ДТ и СТ, состоящем из 60 % ДТ и 40 % РМ.

Проведенный анализ полученных данных свидетельствует о том, что часовой расход топлива при работе трактора на вспашке на СТ, состоящем из 60 % ДТ и 40 % РМ, увеличился на 5,74 % по сравнению с работой на чистом ДТ; на предпосевной обработке почвы это увеличение составило 5,57 %. Выбросы токсичных компонентов при работе с ПЛН-3-35 и с АКШ-3,6-01 снизились при работе трактора на СТ на 59,8 % и 61 % соответственно. Также при работе с АКШ наблюдалось снижение выбросов CO на 33,1 %, однако в обоих случаях при работе на СТ возросли выбросы NO_x . На вспашке это увеличение

¹¹ Коробейников А. Т., Лихачев В. С., Шолохов В. Ф. [Испытания сельскохозяйственных тракторов](#). М.: Машиностроение, 1985. 240 с.

¹² Там же.

¹³ ГОСТ 30745-2001 (ИСО 789-9-90). Тракторы сельскохозяйственные. Определение тяговых показателей. 2002. 12 с.

¹⁴ Там же.



Таблица 2

Table 2

Количественные значения эксплуатационных показателей трактора «Беларус-922»

The quantitative values of operational parameters of Belarus-922 tractor

Сельскохозяйственная машина / Agricultural machinery	Состав топлива / Fuel composition	Частота вращения коленчатого вала двигателя трактора n , мин ⁻¹ / Engine crankshaft rotational speed n , rpm	Часовой расход топлива G_r , кг/ч / Hour fuel consumption G_r , kg/h	Часовой выброс сажи E_C , г/ч / Hour discharge of soot E_C , g/h	Часовой выброс оксидов азота E_{NOx} , г/ч / Hour emission of nitrogen oxides E_{NOx} , g/h	Часовой выброс монооксида углерода / Hour release of carbon monoxide E_{CO} , г/ч	Средняя скорость трактора V_{cp} , км/ч / Average speed of the tractor V_{cp} , km/h
ПЛН-3-35 / PLN-3-35	ДТ / Diesel fuel	1 800	11,15	10,53	323,8	128,7	8,781
	60 % ДТ + 40 % РМ / 60 % Diesel fuel + 40 % Rapeseed oil	1 800	11,79	6,59	350,8	128,9	8,776
АКШ-3,6-01 / AKSH-3,6-01	ДТ / Diesel fuel	1 700	12,02	17,01	360,12	158,43	9,614
	60 % ДТ + 40 % РМ / 60 % Diesel fuel + 40 % Rapeseed oil	1 700	12,69	10,56	394,2	119,02	9,609

составило 8,3 %, а на предпосевной обработке почвы – 9,5 %.

В табл. 3 представлены количественные данные удельных эксплуатационных показателей работы трактора

при выполнении разных сельскохозяйственных операций.

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы. Погектарный расход топлива при ра-

Таблица 3

Table 3

Удельные эксплуатационные показатели работы трактора «Беларус-922»

The specific operational characteristics of Belarus 922 tractor

Сельскохозяйственная машина / Agricultural machinery	Состав топлива / Fuel composition	Погектарный расход топлива, кг/га / Per-hectare fuel consumption G'_m , kg/ha	Погектарный выброс сажи, г/га / Per-hectare carbon black emission E'_C , g/ha	Погектарный выброс оксидов азота, г/га / Per-hectare emissions of nitrogen oxides E'_{NOx} , g/ha	Погектарный выброс монооксида углерода, г/га / Per-hectare emissions of carbon monoxide E'_{CO} , g/ha
ПЛН-3-35 / PLN-3-35	ДТ / Diesel fuel	11,86	11,2	344,4	136,9
	60 % ДТ + 40 % РМ / Diesel fuel + 40 % Rapeseed oil	12,54	8,04	373,2	137,1
АКШ-3,6-01 / AKSH-3,6-01	ДТ / Diesel fuel	4,61	6,52	137,9	60,7
	60 % ДТ + 40 % РМ / Diesel fuel + 40 % Rapeseed oil	4,86	4,04	151	45,6

боте трактора на СТ, состоящем из 60 % ДТ и 40 % РМ, по сравнению с 100 % ДТ увеличился как при работе с плугом – с 11,86 до 12,54 кг/га, так и при работе с АКШ-3,6-01 – с 4,61 до 4,86 кг/га. Выбросы *C* снизились с 11,2 до 8,04 г/га на вспашке и с 6,52 до 4,04 г/га на предпосевной обработке почвы. Выбросы NO_x при работе трактора как на вспашке, так и на предпосевной обработке почвы увеличились с 344,4 до 373,2 г/га и с 137,9 до 151 г/га соответственно. Выбросы *CO* при выполнении вспашки незначительно увеличились – с 136,9 до 137,1 г/га, а при выполнении предпосевной обработки почвы снизились с 60,7 до 45,6 г/га. Увеличение погектарного расхода СТ трактора при выполнении рассматриваемых сельскохозяйственных операций свидетельствует о том, что исследуемое топливо имеет меньшую удельную теплоту сгорания по сравнению с чистым ДТ. Снижение выбросов *C* обусловлено меньшим по массе количеством атомов углерода, содержащегося в молекулах СТ, по сравнению с 100 % ДТ. Большее количество выбросов NO_x объясняется наличием в СТ атомов оксигенатной добавки в виде РМ. При выполнении вспашки трактор эксплуатируется с большей нагрузкой, следовательно, двигатель работает при меньших зна-

чениях коэффициента избытка воздуха смеси, что приводит к некоторому увеличению выбросов *CO* (в отличие от предпосевной обработки почвы), по сравнению с чистым ДТ.

Обсуждение и заключения

1. В результате исследования впервые были получены количественные значения эксплуатационных показателей трактора «Беларус-922» при его работе на СТ во время выполнения вспашки и предпосевной обработки почвы.

2. Определены зависимости влияния СТ на эксплуатационные показатели трактора при выполнении агротехнических операций.

3. Исследованиями доказано, что применение СТ в полевых условиях позволило однозначно снизить выбросы сажи и – при определенных условиях – монооксида углерода.

4. Полученные результаты доказывают целесообразность дальнейшего применения СТ в качестве моторного топлива с целью улучшения эксплуатационных показателей при выполнении сельскохозяйственных операций.

5. Полученные данные свидетельствуют о возможности использования СТ в качестве топлива для тракторов разных марок и тяговых классов, а также для выполнения других агротехнических операций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Non road engines conformity testing based on PEMS: lessons learned from the European pilot program / P. Bonnel [et al.]. Luxembourg : Publications Office of the European Union. 2013. P. 45. DOI: <https://doi.org/10.2789/18679>
2. Exhaust emission tests from non-road vehicles conducted with the use of PEMS analyzers / J. Merkisz [et al.] // Eksploatacja i Niezawodnosc. Maintenance and Reliability. 2013. Vol. 15, no. 4. P. 364–368. URL: <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-f83556b7-4117-4b0e-8f71-b123ceb52467>
3. Reckleben Y., Trefflich S., Thomsen H. Auswirkung der Abgasnormen auf den Kraftstoffverbrauch von Traktoren im praktischen Einsatz // Landtechnik. Agricultural Engineering. 2013. Vol. 68, no. 5. P. 322–326. DOI: <http://dx.doi.org/10.15150/lt.2013.245>
4. Comparison of real-world emissions of B20 biodiesel versus petroleum diesel for selected nonroad vehicles and engine tiers / H. Frey [et al.] // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2008. Vol. 2058, Issue 1. P. 33–42. DOI: <https://doi.org/10.3141/2058-05>



5. Real world emissions of in use off-road vehicles in Mexico / M. Zavala [et al.] // Journal of the Air & Waste Management Association. 2017. Vol. 67, no. 9. P. 958–972. DOI: <https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1310677>
6. Performance of an agricultural engine using mineral diesel and ethanol fuels / M. S. Farias [et al.] // Ciência Rural. 2017. Vol. 47, no. 3. e20151387. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20151387>
7. Performance of an agricultural engine using blends of diesel and ethanol / J. S. Estrada [et al.] // Ciência Rural. 2016. Vol. 46, no. 7. P. 1200–1205. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20150469>
8. An investigation of engine and fuel system performance in a diesel engine operating on waste cooking oil / Y. Ulusoy [et al.] // International Journal of Green Energy. 2014. Vol. 13, Issue 1. P. 40–48. DOI: <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.909360>
9. Emission reductions studies of a biodiesel engine using EGR and SCR for agriculture operations in developing countries / C. Solaimuthu [et al.] // Applied Energy. 2015. Vol. 138. P. 91–98. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.023>
10. Tractor performance in function of storage period and different proportions of biodiesel and diesel / M. C. J. Oliveira [et al.] // Australian Journal of Crop Science. Vol. 9, Issue 10. 2015. P. 909–914. URL: <https://search.informit.com.au/documentSummary;dn=659741743754818;res=IELHSS>
11. Comparison of the operating characteristics of the internal combustion engine using rapeseed oil methyl ester and hydrogenated oil / M. Pexa [et al.] // Agronomy Research. 2015. Vol. 13, no. 2. P. 613–620. URL: https://www.researchgate.net/profile/Stepanka_Hornickova/publication/281894273_Comparison_of_the_operating_characteristics_of_the_internal_combustion_engine_using_rapeseed_oil_methyl_ester_and_hydrogenated_oil/links/56acea1c08ae19a385140346/Comparison-of-the-operating-characteristics-of-the-internal-combustion-engine-using-rapeseed-oil-methyl-ester-and-hydrogenated-oil.pdf
12. Influence of butanol and FAME blends on operational characteristics of compression ignition engine / J. Čedík [et al.] // Agronomy Research. 2015. Vol. 13, no. 2. P. 541–549. URL: http://agronomy.emu.ee/vol132/13_2_31_B5.pdf
13. **Kardas P., Wrobel R.** The analysis of the manufacturing and using alternative fuel – a mixture of rapeseed oil and alcohol // Journal of Ecological Engineering. 2014. Vol. 15, no 1. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993.1084161>
14. **Bietresato M., Friso D.** Durability test on an agricultural tractor engine fuelled with pure biodiesel (B100) // Turkish Journal of Agriculture and Forestry. 2014. Vol. 38, no. 2. P. 214–223. DOI: <https://doi.org/10.3906/tar-1302-51>
15. Effects of fossil diesel and biodiesel blends on the performances and emissions of agricultural tractor engines / M. D. Tomić [et al.] // Thermal Science. 2017. Vol. 17, no. 1. P. 263–278. DOI: <https://doi.org/10.2298/TSCI111122106T>
16. **Al-lwayzy S. H., Yusaf T.** Chlorella protothecoides microalgae as an alternative fuel for tractor diesel engines // Energies. 2013. Vol. 6. P. 766–783. DOI: <https://doi.org/10.3390/en6020766>
17. **Volpato C. E. S.** Analysis of effective power and reduced, rotational force, specific and hourly consumption of fuel, efficiency term-mechanics and volumetric for an agricultural tractor fed with fossil diesel and two types of biofuels // American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting. 2013. Vol. 5. DOI: <http://dx.doi.org/10.13031/aim.20131619419>
18. **Al-lwayzy S. H., Yusaf T., Jensen T.** Evaluating tractor performance and exhaust gas emissions using biodiesel from cotton seed oil // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2012. Vol. 36. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/36/1/012042>
19. Use of waste cooking oil biodiesel in a tractor DI diesel engine / A. Mohebbi [et al.] // Journal of Food, Agriculture and Environment. 2012. Vol. 10, no. 2. P. 1290–1297. URL: https://www.researchgate.net/profile/Samad_Jafarmadar/publication/266890415_Use_of_waste_cooking_oil_biodiesel_in_a_tractor_DI_diesel_engine/links/549a57320cf2fedbc30cb46a.pdf
20. Performance of an agricultural tractor engine in dynamometer with chicken oil biodiesel and binary mixtures with diesel oil / D. A. Fiorese [et al.] // Ciência Rural. 2012. Vol. 42, no. 4. P. 660–666. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782012000400013>

21. **Gokalp B., Buyukkaya E., Soyhan H. S.** Performance and emissions of a diesel tractor engine fueled with marine diesel and soybean methyl ester // Biomass and Bioenergy. 2011. Vol. 35, no. 8. P. 3575–3583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.05.015>
22. Determination of the effect of biodiesel use on power take-off performance characteristics of an agricultural tractor in a test laboratory /Aybek A. // Turkish Journal of Agriculture and Forestry. 2011. Vol. 35, Issue 2. P. 103–113. DOI: <https://doi.org/10.3906/tar-0907-242>
23. Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel / R. L. Barbosa // Ciência e Agrotecnologia. 2008. Vol. 32, no 5. P. 1588-1593. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542008000500035>
24. **Neel C., Johnson D., Wardlow G.** Performance, efficiency, and NO_x emissions of a compact diesel tractor fueled with D2, B20, and B100 under steady-state loads // American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2008. 2008. Vol. 3. P. 1517–1525. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.24617>
25. Fuel efficiency and exhaust emissions for biodiesel blends in an agricultural tractor / Y. X. Li [et al.] // Canadian Biosystems Engineering. 2005. Vol. 48. P. 2.15–2.22. URL: https://www.researchgate.net/profile/Neil_Mclaughlin2/publication/228412224_Fuel_efficiency_and_exhaust_emissions_for_biodiesel_blends_in_an_agricultural_tractor/links/54d8f6a00cf25013d040a8fc/Fuel-efficiency-and-exhaustemissions-for-biodiesel-blends-in-an-agricultural-tractor.pdf
26. Exhaust emissions and health effects of particulate matter from agricultural tractors operating on rapeseed oil methyl ester / J. Krahel [et al.] // AOCS, journal of the American Oil Chemists Society. 2002. Vol. 79, no. 7. P. 717–724. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11746-002-0548-9>

Поступила 15.03.2018; принята к публикации 14.05.2018; опубликована онлайн 20.09.2018

Об авторах:

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

Бузиков Шамиль Викторович, заведующий кафедрой машин и технологии деревообработки, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36), кандидат технических наук, Researcher ID: I-3817-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3769-3253>, ShamilVB@mail.ru

Товстыка Виктор Станиславович, доцент кафедры тракторов, автомобилей и машин для природообустройства, УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» (213407, Республика Беларусь, г. Горки, ул. Мичурина, д. 5), кандидат технических наук, Researcher ID: G-4055-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6609-0481>, viktor-tos@mail.ru

Черемисинов Павел Николаевич, аспирант кафедры машин и технологии деревообработки, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36), Researcher ID: F-7902-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6555-2004>, Pavlon-ch@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

С. А. Плотников – формулировка и постановка задачи; Ш. В. Бузиков – введение и обзор литературы по зарубежным источникам, обсуждение и выводы по результатам исследований; В. С. Товстыка – методическое и материальное обеспечение проведения исследований; П. Н. Черемисинов – проведение исследований.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



REFERENCES

1. Bonnel P., Perujo A., Provenza A., Villafierte M. Non road engines conformity testing based on PEMS: Lessons learned from the European pilot program. European commission (EC). Joint research centre, Institute for energy and transport (IET). JRC Scientific and policy reports. Nr. EUR 26438 EN. 2013. P. 45. DOI: <https://doi.org/10.2789/18679>
2. Merksiz J., Lijewski P., Fuc P., Weymann P. Exhaust emission tests from non-road vehicles conducted with the use of PEMS analyzers. *Eksploatacja i niezawodność* = Maintenance and reliability. 2013; 15(4):364–368. Available at: <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-f83556b7-4117-4b0e-8f71-b123ceb52467>
3. Reckleben Y., Trefflich S., Thomsen H. Auswirkung der Abgasnormen auf den Kraftstoffverbrauch von Traktoren im praktischen Einsatz. *LANDTECHNIK – Agricultural Engineering*. 2013; 68(5):322–326. DOI: <https://doi.org/10.15150/lt.2013.245>
4. Frey H., Rasdorf W., Kim K., Pang S. H., Lewis P. Comparison of real-world emissions of B20 biodiesel versus petroleum diesel for selected nonroad vehicles and engine tiers. *Transportation Research Record: Journal of The Transportation Research Board*. 2008; 2058(1):33–42. DOI: <https://doi.org/10.3141/2058-05>
5. Zavala M., Huertas J. I., Prato D., Jazcilevich A., Aguilar A., Balam M., Misra C., Molina L. T. Real world emissions of in use off-road vehicles in Mexico. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2017; 84. DOI: <https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1310677>
6. Farias M. S., Schlosser J. F., Russini A., Frantz U. G., Estrada J. S. Performance of an agricultural engine using mineral diesel and ethanol fuels. *Ciência Rural*; 2017; 47(3):20151387. DOI: dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20151387
7. Estrada J. S., Schlosser J. F., Farias M. S., Rodrigues F. A., Martini A. T., Santos G. O. Performance of an agricultural engine using blends of diesel and ethanol. *Ciência Rural*. 2016; 46(7):1200–1205. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20150469>
8. Ulusoy Y., Arslan R., Kaplan C., Bolat A., Cedden H., Kaya A., Günc G. Investigation of engine and fuel system performance in a diesel engine operating on waste cooking oil. *International Journal of Green Energy*. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.909360>
9. Solaimuthu C., Ganesan V., Senthilkumar D., Ramasamy K. K. Emission reductions studies of a biodiesel engine using EGR and SCR for agriculture operations in developing countries. *Applied Energy*. 2015; 138:91–98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.023>
10. Oliveira M. C. J., Lopes A., de Lima L. P., Neves M. C. T., Yamaguti P. S., Lira T. A. M., Moreti T. C. F., Koike G. H. A. Tractor performance in function of storage period and different proportions of biodiesel and diesel. *Australian Journal of Crop Science*. 2015; 9(10):909–914. Available at: <https://search.informit.com.au/documentSummary;dn=659741743754818;res=IELHSS>
11. Pexa M., Čedík J., Mařík J., Hönig V., Horníčková Š., Kubín K. Comparison of the operating characteristics of the internal combustion engine using rapeseed oil methyl ester and hydrogenated oil. *Agronomy Research*. 2015; 13(2):613–620. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Stepanka_Hornickova/publication/281894273_Comparison_of_the_operating_characteristics_of_the_internal_combustion_engine_using_rapeseed_oil_methyl_ester_and_hydrogenated_oil/links/56acea1c08ae19a385140346/Comparison-of-the-operating-characteristics-of-the-internal-combustion-engine-using-rapeseed-oil-methyl-ester-and-hydrogenated-oil.pdf
12. Čedík J., Pexa M., Mařík J., Hönig V., Horníčková Š., Kubín K. Influence of butanol and FAME blends on operational characteristics of compression ignition engine. *Agronomy Research*. 2015; 1(2):541–549. Available at: http://agronomy.emu.ee/vol132/13_2_31_B5.pdf
13. Kardas P., Wrobel P. The analysis of the manufacturing and using alternative fuel - A mixture of rapeseed oil and alcohol. *Journal of Ecological Engineering*. 2014; 15(1):1–5. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993.1084161>

14. Bietresato M., Friso D. Durability test on an agricultural tractor engine fuelled with pure biodiesel (B100). *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 2014; 38(2):214–223. DOI: <https://doi.org/10.3906/tar-1302-51>
15. Tomić M. D., Savin L. D., Mičić R. D., Simikić M. D., Furman T. F. Effects of fossil diesel and biodiesel blends on the performances and emissions of agricultural tractor engines. *Thermal Science*. 2017; 17(1):263–278. DOI: <https://doi.org/10.2298/TSCI111122106T>
16. Al-lwayzy S. H., Yusaf T. *Chlorella protothecoides* microalgae as an alternative fuel for tractor diesel engines. *Energies*. 2013; 6:766–783. DOI: <https://doi.org/10.3390/en6020766>
17. Volpato C. E. S. Analysis of effective power and reduced, rotational force, specific and hourly consumption of fuel, efficiency term-mechanics and volumetric for an agricultural tractor fed with fossil diesel and two types of biofuels. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting*. ASABE. 2013; 5:3745–3751. DOI: <http://dx.doi.org/10.13031/aim.20131619419>
18. Al-lwayzy S. H., Yusaf T., Jensen T. Evaluating tractor performance and exhaust gas emissions using biodiesel from cotton seed oil. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2012; 36. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/36/1/012042>
19. Mohebbi A., Komariade M. H., Jafarmadar S., Pashai J. Use of waste cooking oil biodiesel in a tractor DI diesel engine. *Journal of Food, Agriculture and Environment*. 2012; 10(2):1290–1297. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Samad_Jafarmadar/publication/266890415_Use_of_waste_cooking_oil_biodiesel_in_a_tractor_DI_diesel_engine/links/549a57320cf2fedbc30cb46a.pdf
20. Fiorese D. A., Dallmeyer A., Romano L., Schlosser J. F., Machado P. M. Performance of an agricultural tractor engine in dynamometer with chicken oil biodiesel and binary mixtures with diesel oil. *Ciência Rural*. 2012. 42(4):660–666. DOI: <http://doi.org/10.1590/S0103-84782012000400013>
21. Gokalp B., Buyukkaya E., Soyhan H. S. Performance and emissions of a diesel tractor engine fueled with marine diesel and soybean methyl ester. *Biomass and Bioenergy*. 2011; 35(8):3575–3583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.05.015>
22. Aybek A., Başer E., Arslan S., Üçgül M. Determination of the effect of biodiesel use on power take-off performance characteristics of an agricultural tractor in a test laboratory. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 2011; 35(2):103–113. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.3906/tar-0907-242>
23. Barbosa R. L., Silva F. M., Salvador N., Volpato C. E. S. Comparative performance of a cycle diesel engine using diesel and biodiesel mixtures. *Ciência e Agrotecnologia*. 2008; 32(5):1588–1593. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542008000500035>
24. Neel C., Johnson D., Wardlow G. Performance, efficiency, and NO_x emissions of a compact diesel tractor fueled with D2, B20, and B100 under steady-state loads. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting*. ASABE. 2008; 3:1517–1525. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.24617>
25. Li Y. X., McLaughlin N. B., Patterson B. S., Burtt S. D. Fuel efficiency and exhaust emissions for biodiesel blends in an agricultural tractor. *Canadian Biosystems Engineering. Le Genie des biosystems au Canada*. 2005; 48:2.15–2.22. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Neil_McLaughlin2/publication/228412224_Fuel_efficiency_and_exhaust_emissions_for_biodiesel_blends_in_an_agricultural_tractor/links/54d8f6a0cf25013d040a8fc/Fuel-efficiency-and-exhaustemissions-for-biodiesel-blends-in-an-agricultural-tractor.pdf
26. Krah J., Bünger J., Schröder O., Munack A., Knothe G. Exhaust emissions and health effects of particulate matter from agricultural tractors operating on rapeseed oil methyl ester. *Journal of the American Oil Chemists Society*. 2002; 7(7):717–724. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11746-002-0548-9>

Received 15.03.2018; revised 14.05.2018; published online 20.09.2018

*About authors:*

Sergey A. Plotnikov, Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia), Ph.D. (technics), Researcher ID: R-8491-2016, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8887-4591>, PlotnikovSA@bk.ru

Shamil V. Buzikov, Head, Department of Machinery and Wood Technology, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia), Ph.D. (technics), Researcher ID: I-3817-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3769-3253>, ShamilVB@mail.ru

Viktar S. Taustyka, Associate Professor, Chair of Tractors, Vehicles and Machinery for Environmental Engineering, Belarus State Agricultural Academy (5 Michurina St., Gorki 213407, Belarus), Ph.D. (technics), Researcher ID: G-4055-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6609-0481>, viktor-tos@mail.ru

Pavel N. Cheremisinov, Post-Graduate Student, Chair of Machines and Wood Technology, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia), Researcher ID: F-7902-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6555-2004>, Pavlon-ch@mail.ru

Authors' contribution:

S. A. Plotnikov – formulation and statement of the problem; S. V. Buzikov – introduction and literature review according to foreign sources, the discussion and findings of the research; V. S. Taustyka – methodological and material support of studies; P. N. Cheremisinov – research.

All authors have read and approved the final version of the paper.

Информация для авторов и читателей

1. Редакция журнала «Вестник Мордовского университета» принимает оригинальные научные статьи на русском и английском языках, соответствующие профилю Журнала и отражающие результаты теоретических и/или экспериментальных исследований авторов (кандидатов и докторов наук, преподавателей и аспирантов) по следующим направлениям:

01.04.00 Физика

05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление

05.20.00 Процессы и машины агроинженерных систем

Журнал приветствует статьи, содержащие материал о значительных достижениях в указанных направлениях. Не допускается направление в редакцию ранее 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».

2. Особое внимание следует уделить качеству перевода. Желательно, чтобы он был выполнен носителем английского языка.

3. Необходимо указать **УДК**.

4. **Заголовок статьи** должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного научного исследования. *Приводится на русском и английском языках.*

5. **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 заключения (Discussion and Conclusions).

Приводится на русском и английском языках.

6. **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.*

7. **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.*

8. **Основной текст** статьи излагается на русском или английском языках.

1) Введение (1–2 стр.) – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

2) Обзор литературы (1–2 стр.). Необходимо описать основные (последние по времени) исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы; выделение нерешенных вопросов в пределах общей проблемы, которым посвящена статья.

3) Материалы и методы (1–2 стр.). 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 исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно приведенные данные. **Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.**



5) Обсуждение и заключения. 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.

9. **Список использованных источников** (оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 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.*

10. **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, Researcher ID, ORCID, электронная почта, телефон, почтовый адрес для отправки авторского экземпляра. *Приводится на русском и английском языках.*

11. **Заявленный вклад соавторов.** В конце рукописи необходимо включить примечания, в которых разъясняется фактический вклад каждого соавтора в выполненную работу. *Приводится на русском и английском языках.*

При подаче статьи в редакцию автор соглашается с положениями размещенного на сайте лицензионного договора.

В журнале «Вестник Мордовского университета» принято «двустороннее слепое» рецензирование (рецензент и автор не знают имен друг друга).

Рецензент на основании анализа статьи принимает решение о рекомендации ее к публикации (без доработки или с доработкой) или ее отклонении. В случае несогласия автора статьи с замечаниями рецензента его мотивированное заявление рассматривается редакционной коллегией.

Политика редакционной коллегии журнала базируется на современных юридических требованиях в отношении клеветы, авторского права, законности и плагиата, поддерживает Кодекс этики научных публикаций, сформулированный Комитетом по этике научных публикаций, и строится с учетом этических норм работы редакторов и издателей, закрепленных в Кодексе поведения и руководящих принципах наилучшей практики для редактора журнала и Кодексе поведения для издателя журнала, разработанных Комитетом по публикационной этике (COPE).

Допускается свободное воспроизведение материалов журнала в личных целях и свободное использование в информационных, научных, учебных и культурных целях в соответствии со ст. 1273 и 1274 гл. 70 ч. IV Гражданского кодекса РФ. Иные виды использования возможны только после заключения соответствующих письменных соглашений с правообладателем.

Электронные версии статей размещаются на сайте Научной электронной библиотеки. Журнал распространяется по подписке, заявкам высших учебных заведений, учреждений образования и отдельных лиц, а также путем рассылки номеров наложенным платежом.

Вдовин Сергей Михайлович – главный редактор. Тел.: +7 (8342) 24-48-88.

Сенин Петр Васильевич – заместитель главного редактора. Тел.: +7 (8342) 23-32-60.

Гордина Светлана Викторовна – ответственный секретарь. Тел.: +7 (8342) 48-14-24.

Information for authors and readers of the journal

1. "Mordovia University Bulletin" accepts scholarly articles and debatable academic materials in Russian, English from holders of the following degrees: Ph.D., D.Sc., lecturer, postgraduate student. Articles should conform to the subject of the journal and report on the results of theoretical and/or experimental studies of the authors.

The journal covers the following specialties:

01.04.00 Physics

05.13.00 Computer Science, Computer Engineering and Computer Facilities and Management

05.20.00 Processes and machines of argoengineering systems

Submission of a manuscript implies that the work described has not been published previously. In the case of simultaneous submission of manuscripts to several journals, the published article may later be retracted (i.e. withdrawn from the press). Monitoring of unauthorized citations is provided by services "AntiPlagiat" and "CrossCheck". The journal gives preference to the articles with containing significant advances in considered areas of science.

2. If you translate your text into English, please do so in correct English (either American or British usage is accepted, but not a mixture of both).

3. It is necessary to indicate the **UDC** code.

4. The title of the article should be short and informative (less than 10 words) and should convey your essential points clearly.

The title is to be provided in Russian and English.

5. **The abstract** plays a role of an enhanced title. The abstract should state briefly the purpose of the research, the principal results and major conclusions (200-250 words). It consists of 4 distinct parts:

1) Introduction

2) Materials and Methods

3) Results

4) Discussion and Conclusions

The abstract is to be provided in Russian and English.

6. The structure of the paper should contain the list of **keywords** (5–10 words) *in Russian and English*. They should reflect basic statements, results achieved and the terminology of the investigation.

7. **Acknowledgements**. List in this section those individuals who provided help during the research (e.g., providing language help, writing assistance or proof reading the article, etc.). *The acknowledgements are to be provided in Russian and English.*

8. **The main body** of the article should be presented in Russian or in English.

1) Introduction (1–2 pp.) is the challenge of the problem treated, its relevance, its connection with the chief tasks to be solved, its importance for the development of a definite area of science or for practical activity.

2) Literature Review (1–2 pp.). It is necessary to describe the recent principal studies and publications relied upon by the author; modern views on the issue; difficulties in the development of the subject; the allotment of the outstanding issues within the general problem of the article.

3) Materials and Methods (1–2 pp.). This section describes the process of the experiment, using techniques and equipment; provides detailed information about the target of research; indicates the sequence of research and justifies the choice of methods used (observation, survey, test, experiment, laboratory experience, analysis, modeling, learning and generalization, etc).

4) Results. In this section should be presented systematic analytical and statistical material. The research results should be described adequately, so that the reader can trace the process and assess the validity of the conclusions made by the author. This is the main section, which aims to prove a working hypothesis (or hypotheses) by analysis, synthesis and data clarification.

5) Discussion and Conclusions. The conclusion must contain a brief summary of research results. The main points of the work must be repeated. It is better to present any repetition of the material with new formulations. It is necessary to compare the results with the target, indicated at the beginning of the article. In conclusion, the results are to be summarized from a theoretical and practical point of view; the main directions for further research are indicated in this area.

9. **Bibliography**. The bibliography should be drawn up strictly according to the GOST P 7.0.5-2008 and in uniform format.

It would be desirable to refer to papers published in indexed journals with impact factor.

It is advisable to refer to 30–40 sources.

Citations of articles published in "Mordovia University Bulletin" should include author, title, volume number, year, page number, DOI and/or URL.



10. **About authors:** first name, last name, the name of the institution, the address of the institution, the place where the project occurred, the position and academic title of the author, Researcher ID, ORCID, e-mail, phone number, postal address for delivery of obligatory copy (*in Russian and English*).

11. **Authors' contribution.** At the end of the manuscript, authors should explain in the notes the actual contribution of each collaborator in the work performed. The order of the authors and co-authors of the article must be consistent in itself (*in Russian and English*).

The author agrees to the terms of the enclosed license agreement by submission of the article.

The journal has adopted a "double blind" reviewing (reviewer and author are not familiar with each other).

A reviewer analyses an article and decides recommending it for publication (after revision of without it), additional reviewing or refusing of it. In case of noncompliance of an author with the comment of a reviewer, they can address a motivated statement to editorial council.

Editorial staff's policy is based on modern legal requirements concerning libel, copyright, legitimacy, plagiarism, ethical principles, kept in community of leading scientific issues publishers. Journal's editorial policy is based upon traditional ethical principles of Russian academic periodicals; it supports Academic Periodicals Ethical Codex, stated by Committee on Publication Ethics (Russia, Moscow) and it is formed in account of standards of ethics of editors' and publishers' work confirmed by Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors and Code of Conduct for Journal Publishers, developed by Committee on Publication Ethics (COPE).

Free reproduction of journal's material is allowed for personal purposes. Free use is permitted for informational, academic, educational and cultural purposes in compliance of paragraphs 1273 and 1274 of chapter 70, part IV of Civil Codex of Russia. Other types of use are possible only after making agreements in writing with copyright holder.

Electronic copies of the journal with full text of the articles in PDF are in free access at the website of Academic Electronic Library. The journal is distributed by subscription, requests of universities, educational institutions and individuals and pay-on-delivery mailing.

Sergey M. Vdovin – Editor in Chief. Tel.: +7 (8342) 24-48-88.

Petr V. Senin – Deputy Editor in Chief. Tel.: +7 (8342) 23-32-60.

Svetlana V. Gordina – Executive Editor. Tel.: +7 (8342) 48-14-24.



Редакторы – *Л. А. Пудовкина, С. А. Сечнев*
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 06.09.2018 г. Дата выхода в свет 28.09.2018 г.

Формат $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 13,98.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 250 экз. Заказ № 1488. Свободная цена.

Адрес типографии: 430005, 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»)



Editors *L. A. Pudovkina, S. A. Sechnev*
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 06.09.2018. Date of publishing 28.09.2018.

Sheet size $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Conventional printed sheets 13,98.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 250 copies. Order no. 1488. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)