

DOI: 10.15507/2658-4123.029.201901 ISSN 2658-4123 (Print), 2658-6525 (Online)

Том 29, № 1. 2019

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

16+



Vol. 29, no. 1. 2019

SCIENTIFIC JOURNAL
Founded in January 1990
Issued quarterly

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

DOI: 10.15507/2658-4123

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

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

Предыдущее название (до 2019 года):
Вестник Мордовского университета

The previous name until beginning of 2019:
Mordovia University Bulletin

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

Индексируется и архивируется в Web of Science Core Collection (ESCI),
Российском индексе научного цитирования (РИНЦ),
а также EBSCO, 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 № ФС77-74640 от 24.12.2018 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
Тел./факс: +7 (8342) 48-14-24

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

© ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», 2019

Научный журнал «Инженерные технологии и системы»

публикует оригинальные научные исследования, способствующие развитию науки в области инженерных систем и технологий.

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

01.04.01 Приборы и методы экспериментальной физики

01.04.05 Оптика

01.04.13 Электрофизика, электрофизические установки

05.20.01 Технологии и средства механизации сельского хозяйства

05.20.02 Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве

05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве

Редакция журнала осуществляет научное рецензирование (двустороннее слепое) всех поступающих в редакцию статей 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 копии рецензий авторам представленных материалов и в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении соответствующего запроса.

Журнал индексируется и архивируется в базах данных:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

EBSCO

ResearchBib

SHERPA/ReMeO

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



“Engineering Technologies and Systems” Journal

accepts unpublished earlier original research results promoting the development of science in the field of engineering system and technologies.

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Technologies and Means of Agricultural Mechanization

Electrotechnologies and Electrical Equipment in Agriculture

Technologies and Means of Maintenance in Agriculture

To provide complex expert evaluation, all manuscripts undergo “double-blind” review. All reviewers are acknowledged experts in the areas they are responsible for. Reviews are stored in the publishing house and publishing office during five years.

The Editorial staff sends copies of reviews to the authors of the accepted materials and to the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation when requested.

The journal is indexed and archived by databases:

Web of Science Core Collection (ESCI)

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 “Engineering Technologies and Systems” journal are available under Creative Commons “Attribution” 4.0 license



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Гордина Светлана Викторовна – *ответственный секретарь*, член Европейской ассоциации научных редакторов (EASE), 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)

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)

Маргулис Виктор Александрович – 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)

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

Ницев 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-Бадех 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)

Шिशелова 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)

Svetlana V. Gordina – *Executive Editor*, Member of European Association of Science Editors (EASE), 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 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)

Viktor A. Margulis – 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 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

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Харманда Г., Антибас И. Р., Дьяченко А. Г. Метод обратного оптимального фактора безопасности для оптимизации топологии на основе надежности применительно к свободным вибрирующим структурам.....	8
Минаев В. А., Сычев М. П., Вайц Е. В., Бондарь К. М. Системно-динамическое моделирование сетевых информационных операций.....	20
Ширяев В. Д., Шагилова Е. В. Простейшая дифференциальная игра на плоскости с четырьмя участниками.....	40
Фаддеев А. О., Павлова С. А., Невдах Т. М. Математические модели и программные средства оценки напряженно-деформированного состояния литосферы Земли.....	51
Калякулин С. Ю., Кузьмин В. В., Митин Э. В., Сильдин С. П., Тюрбеева Т. Б. Разработка математической модели детали на основе моделей графических систем.....	67

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Джабборов Н. И., Захаров А. М., Зыков А. В. Метод определения показателей оценки эффективности обработки картофеля аэродинамическим способом.....	77
Сибирёв А. В., Аксенов А. Г., Мосяков М. А. Результаты экспериментальных исследований сепарации вороха лука-севка на прутковом элеваторе с асимметрично установленными встряхивателями.....	91

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Сафонов В. В., Остриков В. В., Венскаяйтис В. В., Сафонов К. В., Азаров А. С. Синтез и изучение свойств стабилизатора металлического порошка в смазочной композиции.....	108
Игнатов В. И., Дорохов А. С., Герасимов В. С., Денисов В. А. Методика определения величины утилизационного сбора для выведенной из эксплуатации самоходной техники.....	124
Информация для авторов и читателей (на рус. яз.).....	140
Информация для авторов и читателей (на англ. яз.).....	142

CONTENTS

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

Kharmanda G., Antypas I. R., Dyachenko A. G. Inverse Optimum Safety Factor Method for Reliability-Based Topology Optimization Applied to Free Vibrated Structures.....	8
Minaev V. A., Sychev M. P., Vaitis E. V., Bondar K. M. System-Dynamic Modeling of Network Information Operations.....	20
Shiryayev V. D., Shagilova E. V. A Simplest Differential Game on a Plane with Four Participants.....	40
Faddeev A. O., Pavlova S. A., Nevdakh T. M. Mathematical Models and Evaluation Software for Stress-Strain State of the Earth's Lithosphere.....	51
Kalyakulin S. Yu., Kuzmin V. V., Mitin E. V., Suldin S. P., Tyurbeeva T. B. Developing a Mathematical Model of a Part Based on Graphics System Models.....	67

TECHNOLOGIES AND MEANS OF AGRICULTURAL MECHANIZATION

Dzhabborov N. I., Zakharov A. M., Zykov A. V. Method to Determine the Efficiency Assessment Indicators of Potato Treatment by the Aerodynamic Method.....	77
Sibirev A. V., Aksenov A. G., Mosyakov M. A. The Results of the Experimental Study of Onions Separation Using a Rod Elevator with Asymmetric Installed Burners.....	91

TECHNOLOGIES AND MEANS OF MAINTENANCE IN AGRICULTURE

Safonov V. V., Ostrikov V. V., Venskaytis V. V., Safonov K. V., Azarov A. S. The Synthesis and Study of Metal Powder Stabilizer Properties in Lubrication Compositions.....	108
Ignatov V. I., Dorokhov A. S., Gerasimov V. S., Denisov V. A. The Principles for Determining Recycling Fee on Decommissioned Equipment.....	124
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in Russian)</i>	140
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in English)</i>	142

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

УДК 515.1:004.9

DOI: 10.15507/2658-4123.029.201901.008-019



Inverse Optimum Safety Factor Method for Reliability-Based Topology Optimization Applied to Free Vibrated Structures

G. Kharmanda¹, I. R. Antypas^{2*}, A. G. Dyachenko²

¹*National Institute of Applied Sciences of Rouen
(Saint-Étienne-du-Rouvray, France)*

²*Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia)*

**imad.antypas@mail.ru*

Introduction. The classical topology optimization leads to a prediction of the structural type and overall layout, and gives a rough description of the shape of the outer as well as inner boundaries of the structure. However, the probabilistic topology optimization (or reliability-based topology optimization) model leads to several reliability-based topologies with high performance levels. The objective of this work is to provide an efficient tool to integrate the reliability-based topology optimization model into free vibrated structure.

Materials and Methods. The developed tool is called inverse optimum safety method. When dealing with modal analysis, the choice of optimization domain is highly important in order to be able to eliminate material taking account of the constraints of fabrication and without affecting the structure function. This way the randomness can be applied on certain boundary parameters.

Results. Numerical applications on free vibrated structures are presented to show the efficiency of the developed strategy. When considering a required reliability level, the resulting topology represents a different topology relative to the deterministic resulting one.

Discussion and Conclusion. In addition to its simplified implementation, the developed inverse optimum safety factor strategy can be considered as a generative tool to provide the designer with several solutions for free vibrated structures with different performance levels.

Keywords: deterministic topology optimization, reliability-based topology optimization, modal analysis, optimum safety factor, optimization domain

For citation: Kharmanda G., Antypas I.R., Dyachenko A.G. Inverse Optimum Safety Factor Method for Reliability-Based Topology Optimization Applied to Free Vibrated Structures. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(1):8-19. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.008-019>

Acknowledgements: The research is done within the frame of the independent R&D. The authors would like to acknowledge Pr. Mathias Wallin from Lund University for his valuable discussion and comments in the optimization aspects.

© Kharmanda G., Antypas I. R., Dyachenko A. G., 2019



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

Метод обратного оптимального фактора безопасности для оптимизации топологии на основе надежности применительно к свободным вибрирующим структурам

Г. Харманда¹, И. Р. Антибас^{2*}, А. Г. Дьяченко²

¹Национальный институт прикладных наук Руана
(г. Сент-Этьен-дю-Рувре, Франция)

²ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Россия)

*imad.antypas@mail.ru

Введение. Классическая оптимизация топологии приводит к предсказанию структурного типа и общей компоновки и дает примерное описание как внешних, так и внутренних границ форм структуры. Однако вероятностная модель оптимизации топологии (или оптимизационная топология на основе надежности) приводит к нескольким вариантам решения надежности на основе топологии с высоким уровнем производительности. Цель данной статьи – создать эффективный инструмент для интеграции модели оптимизации топологии на основе надежности для свободных вибрирующих структур.

Материалы и методы. Разработанный инструмент называется методом обратной оптимальной безопасности. При использовании модального анализа выбор области оптимизации очень важен для обеспечения возможности снижения материалоемкости с учетом ограничений в изготовлении и без влияния на ее структурную функцию. Таким образом, случайность может быть применена к некоторым граничным параметрам.

Результаты исследования. Представлены численные приложения на свободных вибрирующих структурах, показывающие эффективность разработанной стратегии. При рассмотрении требуемого уровня надежности результирующая топология представляет другую топологию относительно детерминированной результирующей.

Обсуждение и заключение. В дополнение к своей упрощенной реализации разработанная обратная оптимальная стратегия фактора надежности может рассматриваться как генеративный инструмент, обеспечивающий проектировщику несколько вариантов решений для свободно вибрирующих конструкций с различными уровнями производительности.

Ключевые слова: оптимизация детерминированной топологии, оптимизация топологии на основе надежности, модальный анализ, оптимальный фактор безопасности, домен оптимизации

Для цитирования: Харманда Г., Антибас И. Р., Дьяченко А. Г. Метод обратного оптимального фактора безопасности для оптимизации топологии на основе надежности применительно к свободным вибрирующим структурам // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 1. С. 8–19. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.008-019>

Благодарности: Работа выполнена в рамках инициативной НИР. Авторы благодарят профессора Лундского университета Матиаса Валлина за его ценные замечания и комментарии в аспектах оптимизации.

Introduction

Topology optimization attempts to answer one of the first questions concerning the nature of the structure to fulfill the necessary technical specifications. The topology problem would then consist of determining the structure's general characteristics, and the goal of topology

optimization would be to make that initial choice as automatically as possible [1]. In addition, when using topology optimization concepts, both macroscopic structures and microscopic materials can be found. In other word, we determine not only the optimal spatial material layout distribution at the macroscopic structural scale, but also

the optimal local use of the cellular material at the microscopic scale¹.

In the literature, two main models of topology optimization can be distinguished: deterministic model and probabilistic (or reliability-based) one. In Deterministic Topology Optimization (DTO), a single solution for a given domain can be searched². However, the Reliability-Based Topology Optimization (RBTO) model developed in this paper can lead to several solutions with different advantages. It enables us to choose the best solution to fulfill the technical specifications. The structural weight of the resulting topologies obtained by this model is reduced in comparison to the DTO model. In addition, when using the RBTO model, the structure obtained is more reliable compared to deterministic topology for the same weight levels³. Two points of view are presented for the development of this model: topology optimization and reliability analysis. A literature review is established in the next section, to show the different advantages of the RBTO model.

Literature Review

The main difference between deterministic topology optimization and reliability-based topology optimization is to consider the hazards about the parameters having important roles for optimal topology. The main idea of the RBTO is based on the Reliability-Based Design Optimization (RBDO). In a RBDO problem, the uncertainties regarding the sizing variables are taken into account in order to ensure greater reliability of the proposed

solution. However, the RBTO seeks to provide designers with several solutions that have several reliability levels. This way the designer can select best solution. In the Reliability-Based Design Optimization (RBDO), several methods have been developed. The different developments can be classified in two points of view:

From point of view “topology optimization”, Kharmanda and Olhoff⁴ have elaborated an RBTO model with object of providing the designer with several reliability-based structures however in the classical topology optimization, the designer produces only one deterministic topology. It has been shown the importance of the RBTO model yields structures that are more reliable than those produced by deterministic topology optimization (for the same weight, see also⁵ [2; 3]). In the RBTO model reliability constraints have been introduced into deterministic topology optimization problem. The initial sensitivity analysis is used to identify random variables which have significant effect on the objective function and the limit state function used is a linear combination of the random variables. Therefore, the proposed approach is a heuristic strategy that aims to reduce mass while improving the reliability level of the structure without greatly increasing its weight. But the limit state function used by them was not based on failure criteria for the structure. This formulation considered uncertainty with respect to geometrical dimension and applied load only. Also their reliability analysis seems to be independent of the boundary and loading condition, so

¹ Xia L. Multiscale structural topology optimization. ISTE–Elsevier, 2016. Available at: <https://www.sciencedirect.com/book/9781785481000/multiscale-structural-topology-optimization>

² Zhang W., Zhu J., Gao T. Topology optimization in engineering structure design. ISTE–Elsevier, 2016. Available at: <https://www.sciencedirect.com/book/9781785482243/topology-optimization-in-engineering-structure-design>

³ Kharmanda G., El-Hami A. Biomechanics optimization, uncertainties and reliability. ISTE–Wiley, 2017. Available at: <http://ebook-dl.com/book/8163>

⁴ Kharmanda G., Olhoff N. Reliability-based topology optimization: Report. Aalborg: Aalborg University, 2001. Available at: <http://www.forskningsdatabasen.dk/en/catalog/2389380317>

⁵ Kharmanda G., Olhoff N. Reliability-based topology optimization as a new strategy to generate different structural topologies. In: E. Lund, N. Olhoff, J. Stegmsen (Eds.) 15th Nordic Seminar in Computational Methods. Aalborg: Aalborg University, 2002. p. 11-14. Available at: https://www.researchgate.net/publication/237295035_Reliability-Based_Topology_Optimization_as_a_New_Strategy_to_Generate_Different_Structural_Topologies

their results showed similar values for the uncertain variables for different structures. Next, Patel and Choi [4] used probabilistic neural networks in the case of highly non-linear or disjoint failure domain problems. This strategy has been efficiently applied on different truss structures. Recently, Wan et al. [5] developed a non-probabilistic reliability-based topology optimization method for detailed design of continuum structures, in which the unknown but bounded uncertainties (UBB) existing in material and external loads are considered simultaneously. Their results show that considering the UBB uncertainty effects during the whole procedure of topology optimization may have a significant influence on the final structural configurations.

From a point of view “reliability analysis”, the classical topology optimization is formulated as finding the stiffest structural layout with a volume constraint. Here, the feasibility of volume constraint is not critical in structural design problems. It is more important to consider the variations of the stiffness under uncertainties. To maintain the robustness of stiffness in the topology design, Bae and Wang [6] formulated the topology design optimization as volume minimization problem with a displacement constraint and applied the RBDO technique. They minimize the structural volume subject to linear limit state function. In the research of, the extension of the work of Bae and Wang for the geometrically non linear problems is studied or reformulated to avoid repetition. They minimize the structural volume subject to a nonlinear limit state function. Next, Patel et al. [7] have developed the Hybrid Cellular Automaton (HCA) method for structural synthesis of continuum material where the state of each cell

is defined by both density and strain energy. In⁶, a decoupled RBDO approach is employed such that the topology optimization is separate from the reliability analysis [7] showed the use of RBTO using the gradient free Hybrid Cellular Automata (HCA) method. Their formulation incorporates uncertainty with respect to material property also. They considered limit state function based on failure modes on the output displacements. Eom et al. [8] performed the RBTO model using bi-directional evolutionary structural optimization and the standard response surface method. Jalalpour and Tootkaboni [9] developed a computationally method for reliability-based topology optimization for continuum domains under material properties uncertainty.

Comparing both different points of view, RBTO methods from a point of view “reliability analysis” are inherently computationally expensive because of additional required system analysis associate with RBDO since a large number of design variables are associated with continuum topology optimization problems⁷.

So the point of view “topology optimization” seems to be interesting for topology designers because it provides several reliability-based structures relative the reliability index changes. It leads to different layout structures while the developments from a point of view “reliability analysis” leads to same layout structures with different densities that have no sense for the following optimization stages [10].

To perform the RBTO problems, different RBDO techniques can be used since we deal with different problem definition or philosophy. Several RBDO methods have been developed regarding to their use^{8, 9} [11]. For example, the OSF

⁶ Agarwal H. Reliability based design optimization: formulations and methodologies: Ph.D. Thesis. Notre Dame : University of Notre Dame, 2004. Available at: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2004PhDT.....148A>

⁷ Kharmanda G., El-Hami A. Biomechanics optimization, uncertainties and reliability. ISTE–Wiley, 2017. Available at: <http://ebook-dl.com/book/8163>

⁸ Ibid.

⁹ Yaich A., Kharmanda G., El Hami A., Walha L., Haddar A. Reliability based design optimization under fatigue damage constraints of structures subject to random vibrations. In: ECSO2017: European Conference on Stochastic Optimization. 2017. p. 20-22.

method as an efficient RBDO tool, has been simply implemented by performing two main stages [12]. The first stage is to find the failure point (design point) using a simple optimization process while the second stage consists of using the OSF formulations to find the optimum solution. In this work, for the RBTO model, the developed Inverse Optimum Safety (IOSF) method consists of first finding the configuration using Deterministic Topology Optimization (DTO). Next, the OSF formulations [12] are used with inverse derivative signs in order to provide several reliability-based topologies. The resulting topologies are controlled by a given design space (loading, material, geometry, meshing...). In the modal analysis, there is no applied loads. So the integration of topology optimization into free vibrated structures may lead to unrealistic topologies. Therefore, the choice of optimization domain is highly important in order to be able to eliminate material taking account of the constraints of fabrication and without affecting the structure function. For this purpose, several choices are carried out to demonstrate the importance of optimization domains relative to the static studies [3] where the used boundary conditions can lead to admissible topologies.

Materials and Methods

Deterministic Topology Optimization

The topology optimization problem relates to the minimization of the strain energy, subject to the limitation of the structural volume¹⁰. All the loading parameters and material properties are considered deterministic. The topology optimization problem is to minimize the compliance, subject to a target percentage value of volume f . This problem can be mathematically written as follows:

$$\begin{aligned} \min : & \text{Comp} \\ \text{s.t.} : & \frac{V}{V_0} \leq f, \end{aligned} \quad (1)$$

where *Comp* is the compliance considering the material densities in each element as optimization variables that belong to the interval [0, 1]. V_0 and V are the initial and current volume values. Formulation (1) is a basic form and can be used with several topology optimization methods such as SIMP (Solid Isotropic Microstructure with Penalty), homogenization approach, ... [13; 14].

Reliability-Based Topology Optimization

In deterministic structural optimization, the designer aims to reduce the construction cost without taking into account the effects of uncertainties concerning materials, geometry and loading. This way, the resulting optimal configurations may represent a lower reliability level and then leads to higher failure rate. The balance between the cost minimization and the reliability maximization is a great challenge for the designer. The importance of the reliability criteria on the deterministic design optimization is to improve the reliability level in the system without largely increasing its weight. Thus, when integrating the reliability concept into the sizing and shape optimization, the model is called Reliability-Based Design Optimization (RBDO), which allows us to design structures, which satisfy economy and safety requirements. But when coupling the reliability analysis with the topology optimization being considered non-quantitative of nature. The coupling model is called Reliability-Based Topology Optimization (RBTO) [15]. The purpose of the Reliability-Based Topology Optimization (RBTO) is to consider some uncertainties of the geometry or the loading of the structure, by introducing the reliability criteria in the optimization procedure. This integration takes into account the randomness of the applied loads and the geometry description. The RBTO problem is generally written as:

¹⁰ Rozvany G.I.N. Problem classes, solution strategies and unified terminology of FE-based topology optimization. In: Rozvany G.I.N., Olhoff N. (Eds.) *Topology Optimization of Structures and Composite Continua*. Dordrecht: Kluwer, 2000. p. 19-35.

$$\begin{aligned}
&\min : \text{Comp} \\
&s.t. : \beta \geq \beta_t \\
&\text{and} : \frac{V}{V_0} \leq f_t,
\end{aligned} \quad (2)$$

where β and β_t are the reliability index of the system and the target reliability index, respectively (for more information about reliability methods, see¹¹ [16]). The integration of reliability analysis into the topology optimization has been carried out by performing two decoupled problems for static studies [2]. However, in this work, an efficient method called Inverse Optimum Safety method, is developed and applied to free vibrated structures considering the design domain uncertainty.

$$u_i^* = \beta_t \sqrt{\frac{\left| \frac{\partial G}{\partial y_i} \right|}{\sum_{j=1}^n \left| \frac{\partial G}{\partial y_j} \right|}}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

where the sign of \pm depends on the sign of the derivative of the limit state function with respect to random vector y_i , i. e.,

$$\frac{\partial G}{\partial y_i} > 0 \Leftrightarrow u_i^* > 1. \quad (4)$$

Considering that the random variable vector follows the normal distribution law, the safety factor can be written as follows¹² [16]:

$$S_{f_i} = 1 + \gamma_i \cdot u_i^*, \quad i = 1, \dots, n, \quad (5)$$

where the variance coefficient γ_i relating the mean m_i and standard-deviation σ_i equals to: $\gamma_i = \sigma_i / m_i$.

However, the idea of the developed IOSF is to find a resulting deterministic topology P_y^* considered as a failure point, and next we seek a reliability-based topology P_x^* that should be more reliable than the first solution P_y^* as well as should respect a required reliability level β_t . So the failure point P_y^* is found by a DTO procedure and the reliability-based topologies P_x^* are found using the OSF formulations but with inverse derivative signs (formulation 4). This strategy generates several reliability-based topologies according to the reliability index values. The generation of several topologies is controlled by a sensitivity analysis being an efficient indicator to find the role of each parameter.

Results

In this section, the topology optimization is applied to a 2D cantilever beam (dimensions: 200 × 50 mm) to find the best distribution of material. The material in this beam is steel, which has a Young's modulus $E = 200\,000\text{ MPa}$ and a Poisson's ratio equal to: $\nu = 0.3$. The density of the material is $\rho = 7.190 \times 10\text{ Kg/mm}$. The behavior of the material is linear elastic isotropic. The objective is to perform topology optimization to obtain the best distribution of the materials. The topology optimization problem is to minimize the compliance of the structure, subject to the volume fraction 50 %. To carry out topology optimization, the meshing model is constructed using the nonlinear element (PLANE82 – 8-node) and the used method is the Optimality Criteria (OC) implemented in ANSYS Software.

When considering the modal studies, the choice of optimization domain is very important in order to be able to eliminate material taking account of the constraints of fabrication and without affecting the function of the resulting cantilever beam.

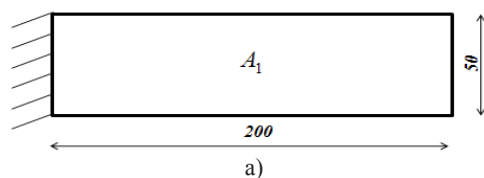
¹¹ Kharmanda G., Antypas I. Integration of reliability and optimization concepts into composite yarns. In: 10th International Scientific-Practical Conference of Current Status and Prospects of Agricultural Engineering, "INTERAGROMASH-2017". Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre; 2017. p. 174-176.

¹² Kharmanda G., El-Hami A. Biomechanics optimization, uncertainties and reliability. ISTE–Wiley, 2017. Available at: <http://ebook-dl.com/book/8163>

For this purpose, we optimize several cases in order to first demonstrate the importance of the initial design domain and then show the advantages and disadvantages of each model.

Model 1

Fig. 1, a–b respectively show the geometric model of the studied beam and the resulting topology, considering the entire geometry as an optimization domain A_1 (i. e. the domain to be optimized).



Model 2

Fig. 2, a shows the geometric model of the studied beam, considering middle part as the optimization domain A_1 and the upper and lower parts as the domain not to be optimized (A_2 and A_3). Fig. 2, b shows the corresponding resulting topology.

Model 3

Fig. 3 shows the geometric model of the studied beam, considering inner part as the optimization domain A_1 , the upper,

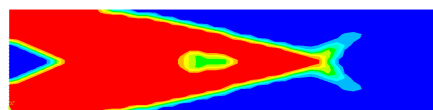


Fig. 1. Configurations of model 1 when considering deterministic topology optimization: a) a cantilever beam with a single optimized area; b) resulting topology

Р и с. 1. Конфигурация модели 1 при рассмотрении оптимизации детерминированной топологии: а) консольная балка с одной оптимизированной областью; б) результирующая топология

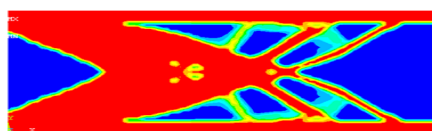
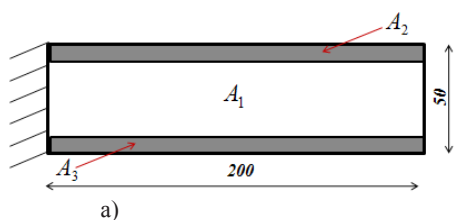


Fig. 2. Configurations of model 2 when considering deterministic topology optimization: a) a cantilever beam with double non-optimized areas; b) resulting topology

Р и с. 2. Конфигурация модели 2 при рассмотрении оптимизации детерминированной топологии: а) консольная балка с двойными неоптимизированными областями; б) результирующая топология

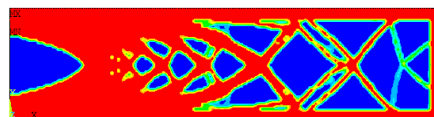
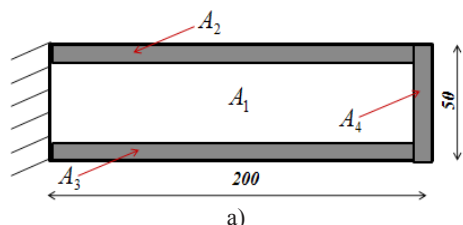


Fig. 3. Configurations of model 3 when considering deterministic topology optimization: a) a cantilever beam with triple non-optimized areas; b) resulting deterministic topology optimization

Р и с. 3. Конфигурация модели 3 при рассмотрении оптимизации детерминированной топологии: а) консольная балка с тройными неоптимизированными областями; б) результирующая оптимизация детерминированной топологии

lower and lateral parts as the domain not to be optimized (A_2 , A_3 and A_4).

Here, the dimensions (x_1 , x_2 , x_3) of non-optimized domain of the third model are considered as random variables (see fig. 4, a). At the initial point, these variables

equal to: 5 mm. The target reliability index is equal to $\beta_t = 3$ and that the proportion of the standard deviations compared to the average values is equal to¹³. Fig. 3, b and 4, b show the corresponding resulting DTO and RBTO configurations, respectively.

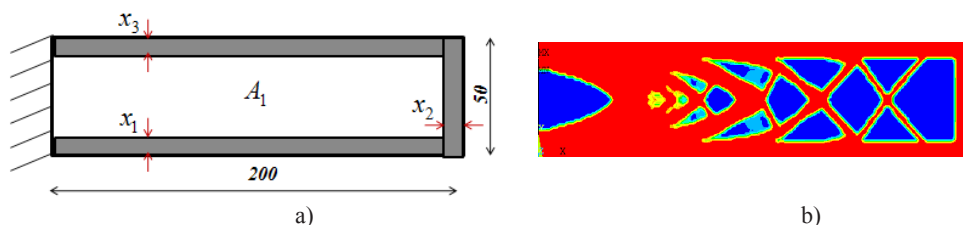


Fig. 4. Configurations of model 3 when considering reliability-based topology optimization: a) initial design with 3 random variables; b) resulting reliability-based topology optimization

Р и с. 4. Конфигурация модели 3 при рассмотрении оптимизации топологии на основе надежности: а) первоначальная конструкция с 3 случайными величинами; б) результирующая оптимизация топологии на основе надежности

Table 1
Таблица 1

Reliability-based topology optimization results
Результаты оптимизации топологии на основе надежности

Parameters / Параметры	Thickness of lower part x_1 / Толщина нижней части x_1	Thickness of lateral part x_2 / Толщина боковой части x_2	Thickness of upper part x_3 / Толщина верхней части x_3
Failure point P_y^* / Точка отказа P_y^*	5.00	5.00	5.00
Compliance $Comp$ / Соответствие $Comp$	1.37700	1.37766	1.37766
Compliance sensitivity $\partial C / \partial y_i$ / Соблюдение чувствительности $\partial C / \partial y_i$	-0.020	-0.018	-0.025
Normalized vector u_i^* / Нормализованный вектор u_i^*	1.683	1.626	1.877
Optimum safety factors S_{f_i} / Оптимальные факторы безопасности S_{f_i}	1.420	1.407	1.469
Optimum point P_x^* / Оптимальная точка P_x^*	7.10	7.03	7.35

¹³ Ibid.

Table 1 presents the different parameters concerning the failure point P_y^* and the optimum point P_x^* considering the target reliability index $\beta_t = 3$.

At the failure point P_y^* , the normalized vector u_i^* is evaluated according to formulation (3) considering the central finite difference technique to evaluate the required derivatives of the compliance $\partial C / \partial y_i$ ¹⁴. The safety factors S_{fi} are next computed according to formulation (5) and the corresponding reliability-based topology is finally evaluated at the optimum point P_x^* .

Discussion and Conclusion

According to our previous [2, 3], when considering a static case, the loading and the fixation can control the external geometrical boundaries. However, when considering the modal studies, the choice of optimization domain is very important in order to be able to eliminate material taking account of the constraints of fabrication and without affecting the function of the resulting structures. Three models with different optimization domains are studied to show the effect of the optimization domain choice.

For the first model, when considering the entire geometry as an optimization domain, the resulting topology changes totally the external geometry and then affects its function. Fig. 1, b shows that the cantilever beam length is reduced which can totally change the detailed design stage. Therefore, the initial design domain should be modified to attend the design objectives. For second model, the upper and lower parts are considered as non-optimized domains. This way the resulting topology is better than the first model but some other failure scenarios can occur at the right region. However, in the

third model, all free boundaries are considered as non-optimized domains. The resulting topology will not affect beam function. Here, the DTO algorithm leads to a single topology considering a given initial design space while the RBTO algorithm leads two several topologies relative to the reliability index values.

The main different between the IOSF and OSF method is to invert the sign of the derivatives is inverted. Here, the mean values are considered to be the failure point P_y^* , and the objective is to increase the reliability level starting from this point. The resulting DTO configuration leads to weak sections (fig. 3, b) and meets difficult fabrication constraints while the RBTO configuration (fig. 4, b) is much more reliable than that produced by DTO.

In general, the choice of the initial domain depends on the designer experience and may lead to several failure scenarios. A reliability concept can be integrated during the optimization process in order to control the resulting topology performance and to generate several reliability-based topologies. In this problem, when applying the IOSF method to obtain a layout which respects a required reliability level, a different topology is obtained. The advantage of this strategy is to produce different topology with additional computing cost regarding the reliability stage.

Thus, reliability-based topology optimization is able to generate multiple topologies, giving the designer a range of solutions by adding certain reliability constraints. The efficiency of the developed IOSF method is to perform the RBTO in a single loop relative to the previous method proposed by [2] which also needs double loops.

¹⁴ Ibid.

REFERENCES

1. Bendsøe M.P., Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1988; 71(2):197-224. DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/0045-7825\(88\)90086-2](https://dx.doi.org/10.1016/0045-7825(88)90086-2)
2. Kharmanda G., Olhoff N., Mohamed A., Lemaire M. Reliability-based topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2004; 26(5):295-307. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-003-0322-7>
3. Kharmanda G., Lambert S., Kourdi N., Daboul A., Elhami A. Reliability-based topology optimization for different engineering applications. *International Journal of CAD/CAM*. 2007. 7(1):61-69. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Ghias_Kharmanda/publication/259383338_Reliability-Based_Topology_Optimization_For_Different_Engineering_Applications/links/0a85e53c7adb1a24d6000000.pdf
4. Patel J., Choi S.-K. Classification approach for reliability-based topology optimization using probabilistic neural networks. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2012; 45(4):529-543. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-011-0711-2>
5. Wang L., Liu D., Yang Y., Wang X., Qiu Z. A novel method of non-probabilistic reliability-based topology optimization corresponding to continuum structures with unknown but bounded uncertainties. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2017; 326:573-595. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.08.023>
6. Bae K., Wang S. Reliability-based topology optimization. In: 9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. 2002. AIAA 2002-5542. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2002-5542>
7. Patel N.M., Renaud J.E., Agarwal H., Tovar A. Reliability based topology optimization using the hybrid cellular automaton method. In: 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. 2005. AIAA 2005-2134. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2005-2134>
8. Eom Y.-S., Yoo K.-S., Park J.-Y., Han S.-Y. Reliability-based topology optimization using a standard response surface method for three-dimensional structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2011; 43(2):287-295. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-010-0569-8>
9. Jalalpour M., Tootkaboni M. An efficient approach to reliability-based topology optimization for continua under material uncertainty. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2016; 53(4):759-772. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-015-1360-7>
10. 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 universiteta* = Vestnik of Don State Technical University. 2017; 17(2):46-55. DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-2-46-55>
11. 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*. 2018; 34(5):551-566. DOI: <https://doi.org/10.1017/jmech.2017.44>
12. Kharmanda G.M., Antypas I.R. Reliability-based design optimization strategy for soil tillage equipment considering soil parameter uncertainty. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Vestnik of Don State Technical University. 2016; 16(2):136-147. DOI: <https://doi.org/10.12737/19690>
13. Bendsøe M.P. Optimal shape design as a material distribution problem. *Structural Optimization*. 1989; 1(4):193-202. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01650949>
14. Bendsøe M.P., Sigmund O. Material interpolation schemes in topology optimization. *Archive of Applied Mechanics*. 1999; 69(9-10):635-654. DOI: <https://doi.org/10.1007/s004190050248>
15. Kharmanda G., Antypas I. Integration of reliability concept into soil tillage machine design. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Vestnik of Don State Technical University. 2015; 15(2):22-31. DOI: <https://doi.org/10.12737/11610>

16. 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>

Received 23.07.2018; revised 25.10.2018; published online 29.03.2019

About authors:

Ghias Kharmanda, Researcher, Mechanics Laboratory of Normandy, National Institute of Applied Sciences of Rouen (685 University Avenue, Saint-Étienne-du-Rouvray 76801, France), ResearcherID: O-6690-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8344-9270>, g.kharmanda@gmail.com

Imad R. Antypas, Associate Professor, Chair of Design Principles of Machines, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: O-4789-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8141-9529>, imad.antypas@mail.ru

Alexey G. Dyachenko, Associate Professor, Chair of Design Principles of Machines, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: O-4796-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9934-4193>, dyachenko_aleshka@bk.ru

Contribution of the authors:

G. Kharmanda – 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; I. R. Antypas – statement of the problem, definition of research methodology, collection and analysis of analytical and practical materials on the research topic; A. G. Dyachenko – 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Bendsoe M. P., Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1988. Vol. 71, Issue 2. P. 197–224. DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/0045-7825\(88\)90086-2](https://dx.doi.org/10.1016/0045-7825(88)90086-2)

2. Reliability-based topology optimization / G. Kharmanda [et al.] // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2004. Vol. 26, Issue 5. P. 295–307. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-003-0322-7>

3. Reliability-based topology optimization for different engineering applications / G. Kharmanda [et al.] // *International Journal of CAD/CAM*. 2007. Vol. 7, no. 1. P. 61–69. URL: https://www.researchgate.net/profile/Ghias_Kharmanda/publication/259383338_Reliability-Based_Topology_Optimization_For_Different_Engineering_Applications/links/0a85e53c7adb1a24d6000000.pdf

4. Patel J., Choi S.-K. Classification approach for reliability-based topology optimization using probabilistic neural networks // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2012. Vol. 45, Issue 4. P. 529–543. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-011-0711-2>

5. A novel method of non-probabilistic reliability-based topology optimization corresponding to continuum structures with unknown but bounded uncertainties / L. Wang [et al.] // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2017. Vol. 326. P. 573–595. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.08.023>

6. Bae K., Wang S. Reliability-based topology optimization // 9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. 2002. AIAA 2002-5542. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2002-5542>

7. Reliability based topology optimization using the hybrid cellular automaton method / N. M. Patel [et al.] // 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. 2005. AIAA 2005-2134. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2005-2134>

8. Reliability-based topology optimization using a standard response surface method for three-dimensional structures / Y.-S. Eom [et al.] // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2011. Vol. 43, Issue 2. P. 287–295. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-010-0569-8>
9. **Jalalpour M., Tootkaboni M.** An efficient approach to reliability-based topology optimization for continua under material uncertainty // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2016. Vol. 53, Issue 4. P. 759–772. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-015-1360-7>
10. **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>
11. Reliability based design optimization for multiaxial fatigue damage analysis using robust hybrid method / A. Yaich [et al.] // Journal of Mechanics. 2018. Vol. 34, Issue 5. P. 551–566. DOI: <https://doi.org/10.1017/jmech.2017.44>
12. **Харманда М. Г., Антибас И. Р.** Стратегия оптимизации проектирования надежности почвообрабатывающей техники с учетом параметрической неопределенности почвы // Вестник Донского государственного технического университета. 2016. Т. 16, № 2. С. 136–147. DOI: <https://doi.org/10.12737/19690>
13. **Bendsøe M. P.** Optimal shape design as a material distribution problem // Structural Optimization. 1989. Vol. 1, Issue 4. P. 193–202. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01650949>
14. **Bendsøe M. P., Sigmund O.** Material interpolation schemes in topology optimization // Archive of Applied Mechanics. 1999. Vol. 69, Issue 9–10. P. 635–654. DOI: <https://doi.org/10.1007/s004190050248>
15. **Харманда М. Г., Антибас И. Р.** Интеграция концепции надежности в проектирование почвообрабатывающих машин // Вестник Донского государственного технического университета. 2015. Т. 15, № 2. С. 22–31. DOI: <https://doi.org/10.12737/11610>
16. **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>

Поступила 23.07.2018; принята к публикации 25.10.2018; опубликована онлайн 29.03.2019

Об авторах:

Харманда Гиас, исследователь, лаборатория механики Нормандии, Национальный институт прикладных наук Руана (76801, Франция, г. Сент-Этьен-дю-Рувре, Авеню-дель-Университе, д. 685), доктор философии по техническим наукам, ResearcherID: O-6690-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8344-9270>, g.kharmanda@gmail.com

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

Дьяченко Алексей Геннадьевич, доцент кафедры основ конструирования машин, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), кандидат технических наук, ResearcherID: O-4796-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9934-4193>, dyachenko_aleshka@bk.ru

Заявленный вклад соавторов:

Г. Харманда – научное руководство, постановка задачи, определение методологии исследования, критический анализ и доработка решения, компьютерная реализация решения задачи; И. Р. Антибас – анализ теоретических и практических материалов по теме исследования; А. Г. Дьяченко – анализ научных источников по теме исследования, критический анализ и доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Системно-динамическое моделирование сетевых информационных операций

**В. А. Минаев^{1*}, М. П. Сычев¹, Е. В. Вайц¹,
К. М. Бондарь²**

¹ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана» (г. Москва, Россия)

²ФГКОУ ВО «Дальневосточный юридический институт МВД РФ» (г. Хабаровск, Россия)

*m1va@yandex.ru

Введение. В Доктрине информационной безопасности Российской Федерации основными негативными факторами, влияющими на состояние информационной безопасности, названы информационно-технические и информационно-психологические воздействия. Поэтому моделирование, оценка и прогнозирование информационных воздействий на социальные группы и организация соответствующего информационного противодействия являются актуальными задачами управления.

Материалы и методы. Рассмотрены системно-динамические модели информационных воздействий в социальных сетях и группах. Обосновано их применение с целью противодействия информационному терроризму и экстремизму. Дано описание в виде потоковых диаграмм в обозначениях системной динамики. Приведены системы дифференциальных уравнений. Проведены эксперименты с моделями с применением перспективной имитационной платформы Anylogic.

Результаты исследования. Произведено сравнение агентной и системно-динамической модели, показавшее высокую степень их согласования между собой и со статистическими данными. С использованием реальных данных на основе метода кластерного анализа выделены типологические группы в выборочной совокупности поселений России с различающимся средним временем распространения информационных воздействий. Успешно апробированы системно-динамические модели распространения информационных воздействий в социальных сетях и в студенческой среде с использованием постулата Гиббса.

Обсуждение и заключение. Показана высокая согласованность результатов моделирования с эмпирическими данными (коэффициенты детерминации не менее 90 %). Модели позволяют осуществлять прогноз информационного воздействия и информационного противодействия, проигрывать различные сценарии динамики указанных процессов.

Ключевые слова: имитационное моделирование, терроризм, экстремизм, информационное воздействие, информационное противодействие, управление, социальная сеть, топология, типология, кластерный анализ

Для цитирования: Системно-динамическое моделирование сетевых информационных операций / В. А. Минаев [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 1. С. 20–39. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.020-039>



System-Dynamic Modeling of Network Information Operations

V. A. Minaev^{1*}, M. P. Sychev¹, E. V. Vaits¹, K. M. Bondar²

¹*Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)*

²*Far Eastern Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russia (Khabarovsk, Russia)*

*m1va@yandex.ru

Introduction. Information-technical and information-psychological influences are the main negative factors affecting the information security according to the Information Security Doctrine of the Russian Federation. Therefore, modeling, evaluating and forecasting information influences on social groups and organizing adequate information counteraction are urgent tasks of management.

Materials and Methods. The system-dynamic models of information influences in social networks and groups are considered. Their application for purposes of counteraction to information terrorism and extremism is proved. The description in the form of flowcharts is given. Systems of differential equations are presented. Experiments with models using the advanced simulation platform Anylogic have been carried out.

Results. In a sample of Russian settlements based on the cluster analysis there have been found homogeneous typological groups that differ in the average time of disseminating information in social networks. Based on Gibbs's Postulate, the system-dynamic model of information influences on students has been successfully tested.

Discussion and Conclusion. The high consistency of simulation results with empirical data (determination coefficients of at least 90 %) is shown. Models allow forecasting the information influence and information counteraction and playing different scenarios for the dynamics of these processes.

Keywords: simulation modeling, terrorism, extremism, information influence, information counteraction, management, social network, topology, typology, cluster analysis

For citation: Minaev V.A., Sychev M.P., Vaits E.V., Bondar K.M. System-Dynamics Modeling of Network Information Operations. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(1):20-39. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.020-039>

Введение

Основными негативными факторами, влияющими на состояние информационной безопасности России, в новой Доктрине информационной безопасности Российской Федерации названы информационно-технические (ИТВ) и информационно-психологические воздействия (ИПВ)¹. Так, в Доктрине отмечается наращивание рядом зарубежных стран возможностей информационно-технического воздействия (ИТВ) на информационную инфраструктуру в отношении российских государственных органов, научных организаций и предприятий

оборонно-промышленного комплекса. В частности, возрастают масштабы компьютерной преступности, прежде всего в кредитно-финансовой сфере; увеличивается количество все более изощренных преступлений, связанных с неприкосновенностью частной жизни, личной и семейной тайны при обработке персональных данных.

Одновременно в Доктрине указывается на расширение масштабов использования зарубежными спецслужбами информационного воздействия, направленного на дестабилизацию внутриполитической и социально-экономиче-

¹ Доктрина информационной безопасности Российской Федерации : утв. Указом Президента РФ № 646 от 5 декабря 2016 г. № 646. URL: <http://base.garant.ru/71556224>

ской ситуации в различных регионах мира и приводящего к подрыву суверенитета и нарушению территориальной целостности других государств. Россия не является исключением.

В Доктрине отмечено, что:

- в целях размыывания традиционных российских духовно-нравственных ценностей наращивается информационное воздействие на население России, в первую очередь на молодежь;

- террористические и экстремистские организации широко используют механизмы информационного воздействия на индивидуальное, групповое и общественное сознание для нагнетания межнациональной и социальной напряженности, разжигания этнической и религиозной ненависти либо вражды, пропаганды экстремистской идеологии.

Обзор литературы

К настоящему времени актуализировались интенсивные исследования в области анализа, моделирования и прогнозирования негативных информационных воздействий (ИВ) и информационных противодействий (ИПД) им [1–4].

Появились новые научные работы, отражающие распространение таких воздействий с помощью компьютерных сетей в различных социальных средах (школьных, студенческих, фанатских и др.); различных поселениях: мегаполисах с их специфическими малыми группами, несущими опасность для молодых людей (группы самоубийц, этнические криминальные группы, ругеры, диггеры, зацеперы в метро и др.); малых и моногородах (с тотальной безработицей и аморальными образцами поведения среди взрослых) [5].

Вышеизложенное позволяет заключить, что моделирование, оценка и прогнозирование информационных воздействий на социальные группы и организация соответствующего информационного противодействия являются актуальными задачами управления.

К настоящему моменту создана обширная научная база в сфере моделирования информационных воздействий на социальные группы во времени, позволяющая исследовать информационное «заражение» в зависимости от влияния различных внешних и внутренних факторов [1–5].

Разработаны и исследованы различные типы моделей в сфере информационного воздействия: топологические, факторные, регрессионные, вероятностные и др., которые составляют основу для дальнейшего совершенствования инструментария моделирования в сфере информационного воздействия на социум.

В то же время наиболее интересные с практической точки зрения имитационные методы моделирования информационных воздействий на социальные группы и соответствующего информационного противодействия, позволяющие проигрывать различные сценарии проведения информационных операций, в России недостаточно развиты; слабо ведется разработка необходимого комплекса моделей.

Материалы и методы

Исходя из вышеизложенного, можно выделить два важных направления разработки моделей информационных операций, связанных с ИТВ с одной стороны и с ИПВ – с другой. Кроме того, процесс моделирования был бы неполон, если бы не рассматривались модели противодействия ИТВ и ИПВ. В табл. 1 показана степень разработанности названных моделей информационных операций, оцененная в ходе экспертного опроса по 10-балльной шкале (в нем участвовали 45 квалифицированных экспертов).

В данной статье рассмотрены базовые модели в последних двух направлениях (менее разработанных) и некоторые результаты их применения.

Созданы и реализованы математические модели, позволяющие имити-

Степень разработанности моделей информационных операций

Readiness level of information operation models

Модели информационных операций / Models of information operations	Модели ИТВ / Models of informational and technical impacts (ITI)	Модели противодействия ИТВ / Models of ITI counteraction	Модели ИПВ / Models of informational and psychological impacts (IPI)	Модели противодействия ИПВ / Models of IPI counteraction
Степень разработанности моделей (баллы) / Level of models readiness (in points)	7	5	5	3

ровать ИПВ и ИПД в социальных сетях и при непосредственном общении индивидов в разнообразных общественных группах. При этом применяется перспективная программная платформа имитационного моделирования Anylogic, на основе которой реализованы модели с высокими коэффициентами объясняемости (не менее 85–90 %) между эмпирическими и модельными данными [6].

Созданная методологическая и методическая база позволяет расширить поле исследований информационных воздействий и создания моделей информационных взаимодействий при проявлениях экстремизма, терроризма и агрессивного поведения социальных групп, включая обучающихся в образовательных организациях. Для этого необходимо решить три основные задачи:

- обосновать и построить базу данных, позволяющую по сетевому информационному контенту распознавать и визуализировать ситуации возникновения агрессивного поведения тех или иных групп населения. К настоящему времени разработаны современные методы анализа контента, позволяющие выявлять инициаторов такого контента

и сетевые узлы, которые с инициаторами связаны;

- изучить и спрогнозировать динамику «заражения» обучающихся стереотипами агрессивного поведения. Для этого целесообразно комплексно использовать методы системно-динамического, агентного и дискретно-событийного моделирования²;

- создать распределенную информационно-аналитическую систему (ИАС) мониторинга агрессивного поведения в регионах Российской Федерации с выделением в указанной системе региональных ситуационных центров, где происходила бы оперативная обработка информации и принятие специалистами решений по возникающим случаям «экстремального напряжения» в социальной среде, включая ее молодежную часть.

По сути, речь идет о построении глобальной информационной системы мониторинга в масштабах страны, которая дает возможность:

- обеспечения своего развития путем включения в нее (по мере готовности и необходимости) модулей мониторинга проявлений экстремизма, терроризма и других социально опас-

² Маликов Р. Ф. Практикум по имитационному моделированию сложных систем в среде AnyLogic 6 : учеб. пособ. Уфа : Изд-во БГПУ, 2013. 296 с.

ных явлений, а также модулей подготовки управленческих решений для региональных органов власти и силовых структур при реагировании на подобные явления и ситуации;

- использования перспективных программно-математических средств и методов при реализации механизмов комплексного реагирования на проявления агрессивного поведения;

- надежной защиты центров информационного доступа и коммуникационных каналов ИАС.

Учитывая масштабность и острую социальную необходимость реализации на современном уровне механизмов комплексного реагирования на проявления агрессивного поведения (данная проблема, судя по мировым трендам, может только усиливаться), создание высокоорганизованной ИАС связано с привлечением для ее развития высокопрофессиональных специалистов из разных сфер деятельности (математиков, психологов, педагогов, психиатров, представителей информационной сферы, специалистов в области защиты информации и др.).

Приведем необходимые определения, относящиеся к предмету, цели и задачам данной статьи.

Уточняя терминологию работы С. П. Расторгуева и М. В. Литвиненко³, определим *сетевые информационные операции* как комплекс взаимосвязанных целенаправленных действий информационного характера, осуществляемых в компьютерных сетях и массмедиа посредством межличностных контактов и ориентированных на решение задач

по перепрограммированию, блокированию, генерации информационных процессов как в технической, так и в гуманитарной сферах.

Системно-динамическое моделирование – метод моделирования и имитации сложных динамических систем, характеризующихся разветвленными, как правило, нелинейными связями [7]. Системная динамика как новое направление в области моделирования получила свое развитие благодаря:

- успехам в области анализа и проектирования сложных систем управления;

- прогрессу в сфере компьютерного моделирования и вычислительных методов.

Базовые работы в этом направлении относятся к исследованиям Дж. Форрестера конца 50-х – начала 60-х гг. XX в., посвященных анализу промышленных предприятий⁴, развитию городов⁵ и мировой динамике⁶.

К настоящему времени построением системно-динамических моделей в области информационной безопасности занимаются различные зарубежные научные коллективы: в Университете Карнеги (Меллон, США)⁷, Оборонном научно-техническом университете Народно-освободительной армии Китая [8], Высшей школе информационной безопасности (Южная Корея) [9], Флоридском Атлантическом университете (США) [10] и в других научных центрах мира.

Созданные за рубежом модели успешно применяются на практике, однако требуют концептуальной и методи-

³ Расторгуев С. П., Литвиненко М. В. Информационные операции в сети Интернет / Под общ. ред. А. Б. Михайловского. М. : АНО ЦСОиП, 2014. 128 с.

⁴ Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятия (индустриальная динамика) / Пер. с англ. ; общ. ред. и предисл. Д. Гвишиани. М. : Прогресс, 1971. 340 с.

⁵ Форрестер Дж. Динамика развития города / Пер. с англ. М. Орловой ; под ред. Ю. Иванилова, А. Иванова, Р. Оганова ; предисл. Ю. Козлова. М. : Прогресс, 1974. 286 с.

⁶ Форрестер Дж. Мировая динамика / Пер. с англ. А. Ворощука, С. Пегова ; послесл., коммент. Н. Моисеева. М. : Наука, 1978. 384 с.

⁷ Management and education of the risk of insider threat (MERIT): system dynamics modeling of computer system sabotage / D. M. Cappelli [et al.]. Pittsburg : Carnegie Mellon University. Software Engineering Institute, 2006. 34 p. URL: [https://www.semanticscholar.org/paper/Management-and-Education-of-the-Risk-of-Insider-\(-\)-Cappelli/7fbad6a22afe183e63fb1bb8834e7de05a5d4d94](https://www.semanticscholar.org/paper/Management-and-Education-of-the-Risk-of-Insider-(-)-Cappelli/7fbad6a22afe183e63fb1bb8834e7de05a5d4d94)

ческой доработки и дополнительных исследований для решения задач анализа, оценки, прогнозирования и управления в сфере информационных воздействий и информационного противоборства.

В основе моделей системной динамики лежат общие структурные элементы, пригодные для моделирования многих систем⁸⁻¹⁰:

– *уровни* – управляемые объекты, отображаемые переменными, значения которых представляют интегральные характеристики некоторых реальных потоков, рассматриваемых в моделируемой системе;

– *темпы* – скорости потоков, исходящих от одних уровней и входящих в другие, вызывая в них соответствующие изменения.

Кроме того, в моделях используются *функции решений*, определяемые через функциональные зависимости, существующие в системе; *вспомогательные величины и константы*.

Системная динамика, представляя собой определенную целостность принципов и методов анализа динамических управляемых систем с обратной связью, дает возможность их применения для решения многих организационно-производственных и социально-экономических задач.

Метод системной динамики предполагает, что для основных фазовых переменных (*системных уровней*) используются дифференциальные уравнения типа [11]:

$$\dot{y} = y^+ - y^-, \quad (1)$$

где \dot{y} – производная переменной y по времени; y^+ – комплекс факторов, положительно сказывающихся на скорости изменения уровня y ; y^- – комплекс фак-

торов, отрицательно сказывающихся на скорости изменения уровня y .

В моделях Форрестера предполагается, что y^\pm , в свою очередь, являются функциями уровней

$$y^\pm = f(F_1, F_2, \dots, F_k), \quad (2)$$

где k – количество факторов меньшее, чем количество фазовых переменных; каждый фактор зависит только от части системных уровней.

Системно-динамическая модель ИВ

На рис. 1 приведено описание системно-динамической модели ИВ с обозначениями, рассматриваемыми в системе дифференциальных уравнений (3).

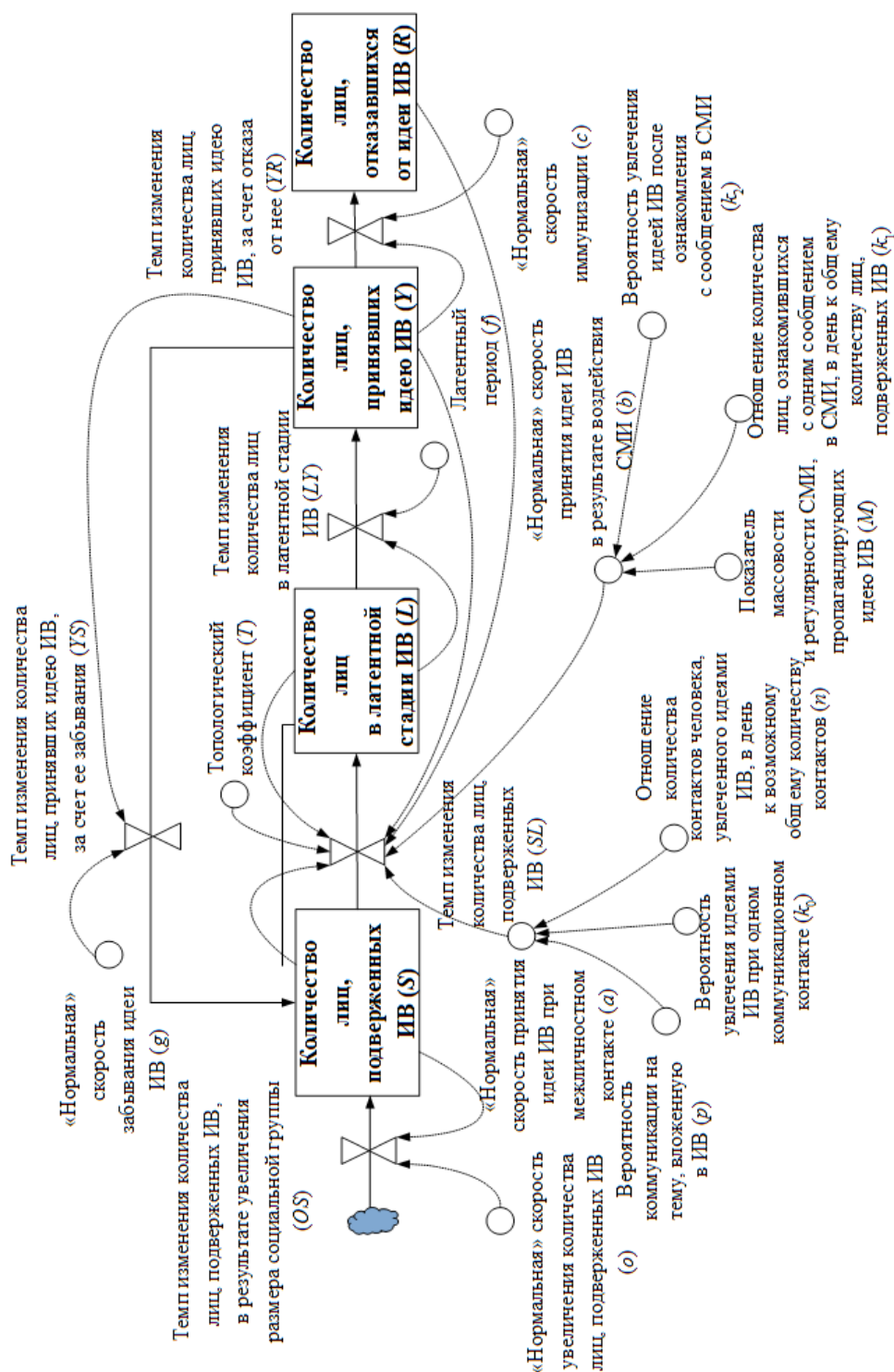
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS}{dt} = OS(t) + YS(t) - SL(t) \\ \frac{dY}{dt} = SL(t) - LY(t) \\ \frac{dR}{dt} = LY(t) - YR(t) - YS(t) \\ OS(t) = o \cdot S(t) \\ SL(t) = b \cdot S(t) + \frac{a \cdot T \cdot S(t) \cdot Y(t)}{S(t) + Y(t) + L(t) + R(t)} \\ YR(t) = c \cdot Y(t) \\ LY(t) = \frac{L(t)}{f} \\ YS(t) = g \cdot Y(t) \\ a = p \cdot k_0 \cdot n \\ b = M \cdot k_1 \cdot k_2 \end{array} \right. \quad (3)$$

Построение системно-динамической модели ИПД связано с моделью ИВ на социальные группы. Предпола-

⁸ Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятия (индустриальная динамика) / Пер. с англ.; общ. ред. и предисл. Д. Гвишиани. М.: Прогресс, 1971. 340 с.

⁹ Форрестер Дж. Динамика развития города / Пер. с англ. М. Орловой; под ред. Ю. Иванилова, А. Иванова, Р. Оганова; предисл. Ю. Козлова. М.: Прогресс, 1974. 286 с.

¹⁰ Форрестер Дж. Мировая динамика / Пер. с англ. А. Ворошука, С. Пегова; послесл., коммент. Н. Моисеева. М.: Наука, 1978. 384 с.



Р и с. 1. Системная потоковая диаграмма системно-динамической модели ИВ

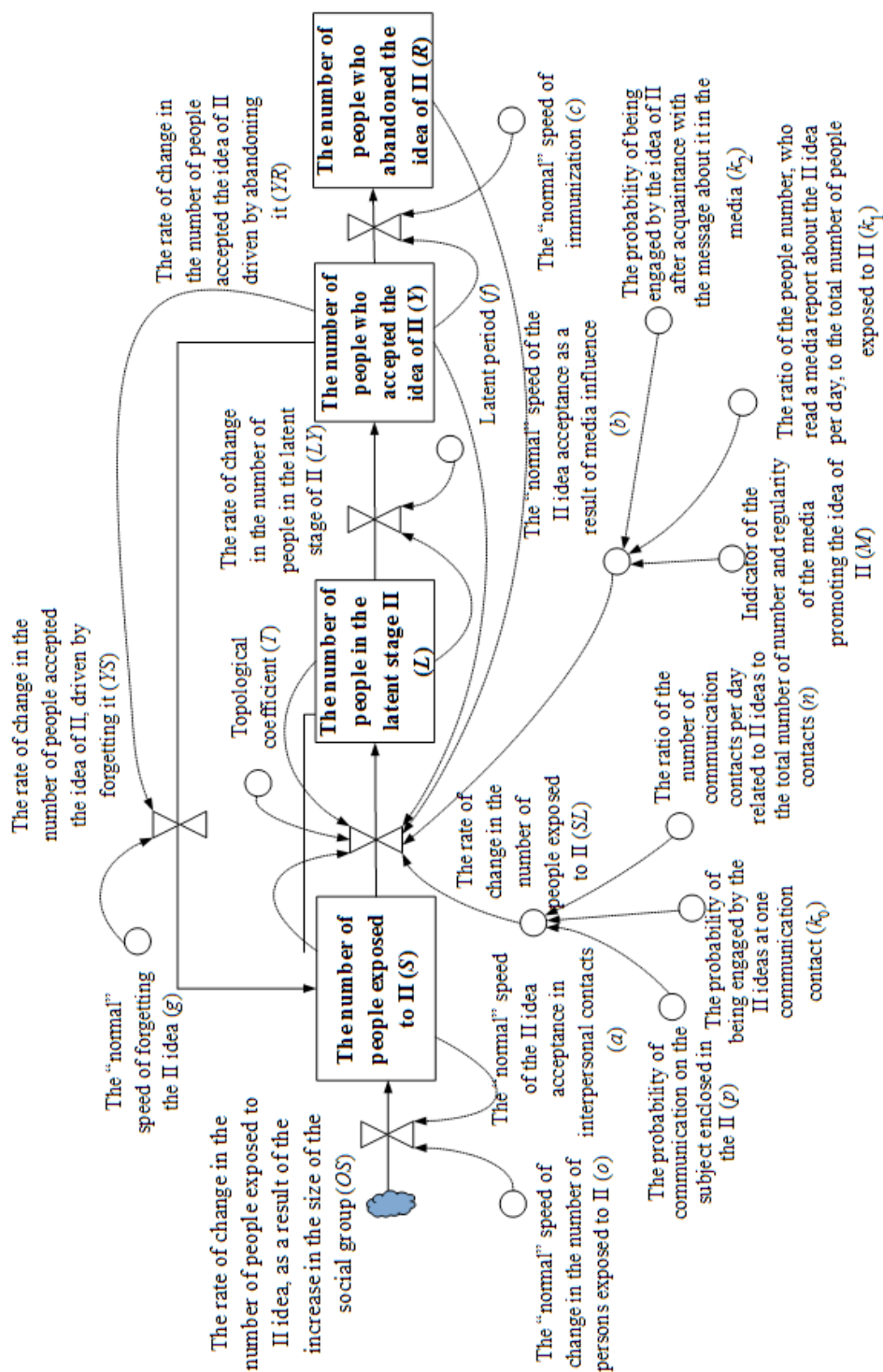


Fig. 1. The system flow diagram of the information influence system-dynamic model

гается, что в социуме одновременно идет распространение двух противоположных идей ИВ (положительной и отрицательной). Потоковая диаграмма, описывающая системно-динамическую модель ИПД, будучи представленной системой дифференциальных уравнений (4), приведена на рис. 2.

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = OS(t) + XS(t) + YS(t) - SX(t) - SY(t) \\ \frac{dX}{dt} = SX(t) + YX(t) - XS(t) - XY(t) \\ \frac{dY}{dt} = SY(t) + XY(t) - YS(t) - YX(t) \\ SX(t) = b_x \cdot S(t) + \frac{a_x \cdot S(t) \cdot X(t)}{S(t) + X(t) + Y(t)} \\ SY(t) = b_y \cdot S(t) + \frac{a_y \cdot S(t) \cdot Y(t)}{S(t) + X(t) + Y(t)} \\ XY(t) = \frac{k_x \cdot X(t) \cdot Y(t)}{X(t) + Y(t)} \\ YX(t) = \frac{k_y \cdot X(t) \cdot Y(t)}{X(t) + Y(t)} \\ XS(t) = g_x \cdot X(t) \\ YS(t) = g_y \cdot Y(t) \\ OS(t) = o \cdot S(t). \end{cases} \quad (4)$$

Для практической реализации системно-динамических моделей ИВ и ИПД использовались статистические данные о распространении различных информационных воздействий в социальных сетях, а также данные опросов в социальных группах. Отметим, что процесс имитационного моделирования, осуществленный с использованием современной программной платформы Anylogic, позволяет «проигрывать» любое количество противоборствую-

ющих идей¹¹. Основными переменными, динамика которых в социуме отслеживалась с помощью разработанных моделей, является количество лиц:

- подтвержденных ИВ;
- находящихся в латентной стадии ИВ;
- принявших идею ИВ;
- отказавшихся от идеи ИВ.

При этом системно-динамическая модель ИПД, являющаяся логическим развитием модели ИВ, учитывает характеристики забывания информации, существования латентного периода, изменения размера социальной группы, топологию взаимодействия в группе, замещения идеи ИВ идеями противоборствующей стороны.

Результаты исследования

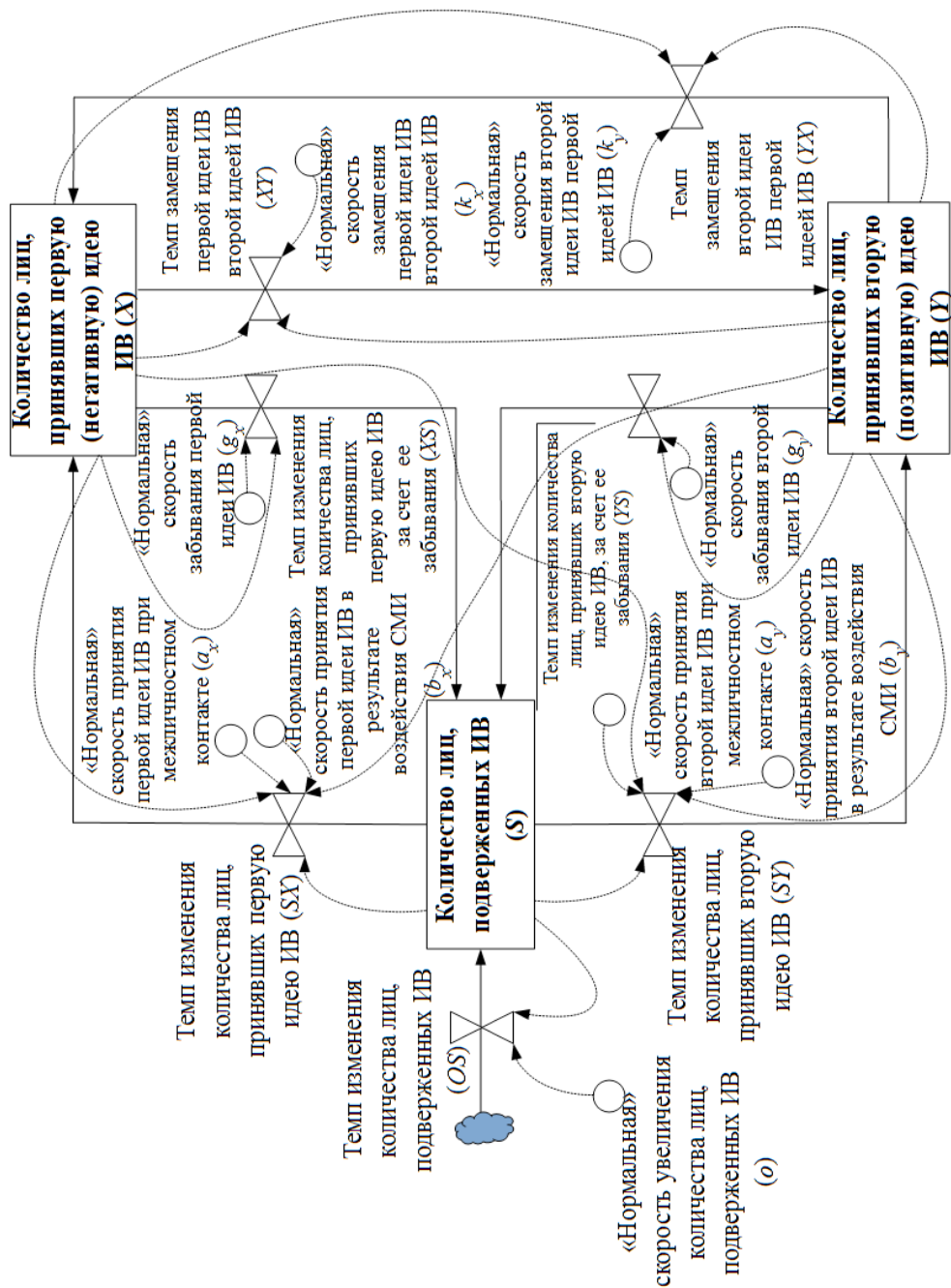
Результаты некоторых модельных экспериментов по изучению влияния различных параметров на динамику процессов ИВ приведены на рис. 3–5. Пример имитационного эксперимента с системно-динамической моделью ИПД приведен на рис. 6.

Отметим, что результаты моделирования на основе системно-динамического и агентного подходов совпали с достаточной степенью точности (рис. 7). Коэффициент согласования между моделями составил 94 %, со статистическими данными – 92 %.

В экспериментах на материале фактических статистических данных имитировалось по отдельности распространение ИВ от семи различных пользователей, а также одновременно с нескольких узлов реальной социальной сети (рис. 8).

Из рис. 8 следует, что динамика количества лиц, «зараженных» идеями ИВ, в зависимости от источника «заражения» в г. К. различается, подчиняясь общим динамическим закономерностям логистического характера.

¹¹ Лычкина Н. Н. Современные технологии имитационного моделирования и их применение в информационных бизнес-системах и системах поддержки принятия решений // Имитационное моделирование. Теория и практика : сб. докл. 2-й Всерос. науч.-практ. конф. ИММОД-2005. Т. 1. СПб. : ЦНИИТС, 2005. С. 25–31. URL: <https://www.anylogic.ru/upload/iblock/efa/efac2601a53aa4a5c810fb1c2f8fa79b.pdf>



Р и с. 2. Системная потоковая диаграмма системно-динамической модели ИПД

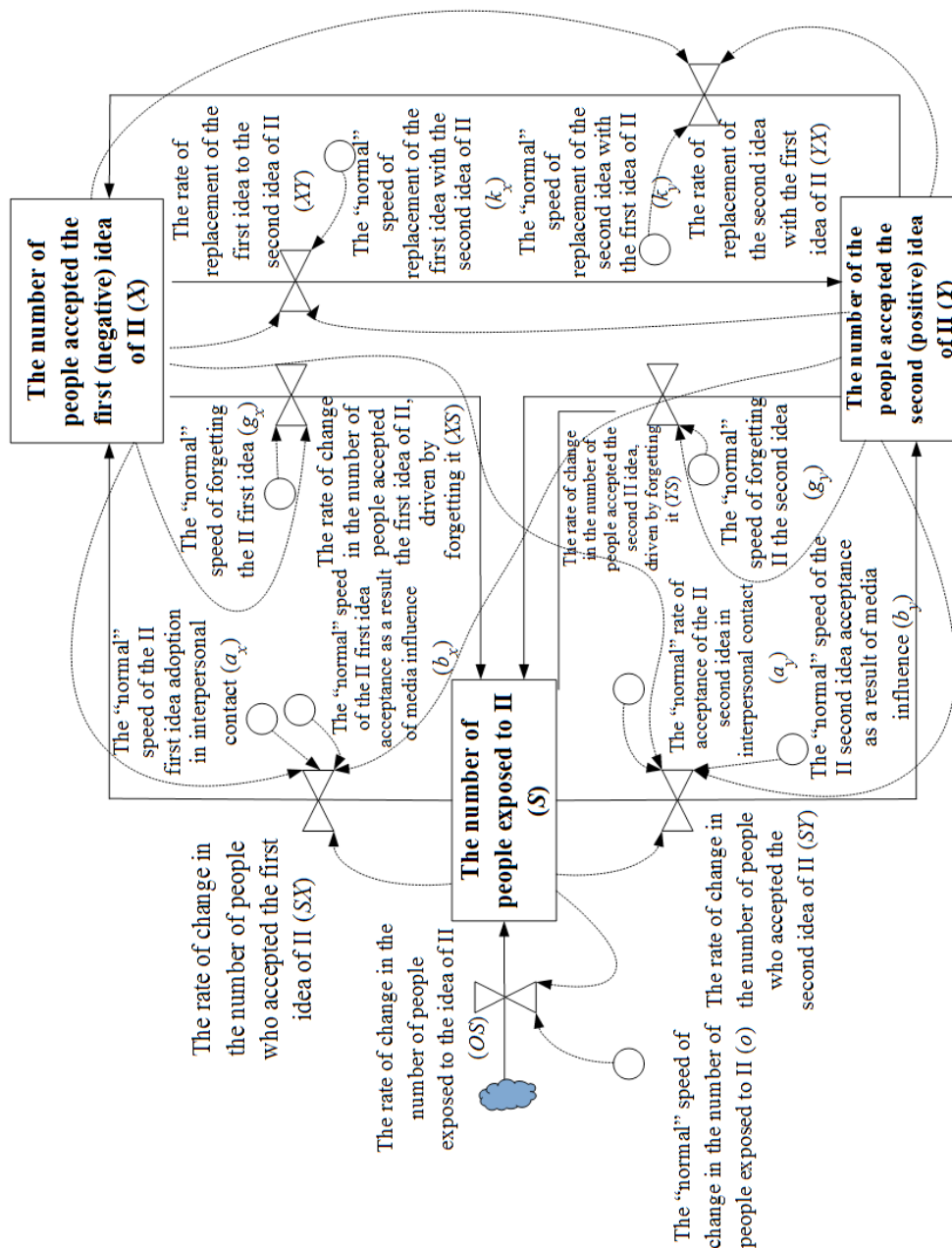
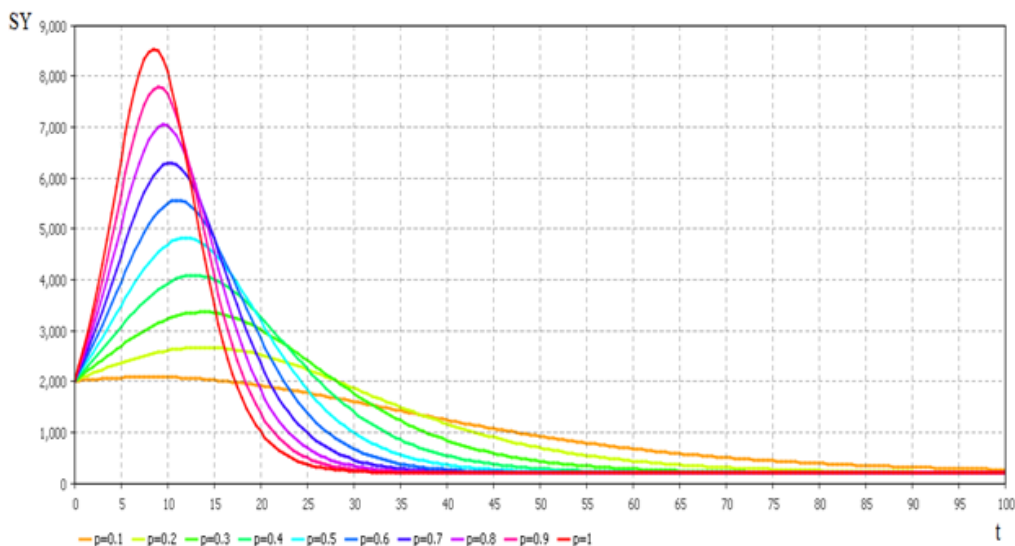
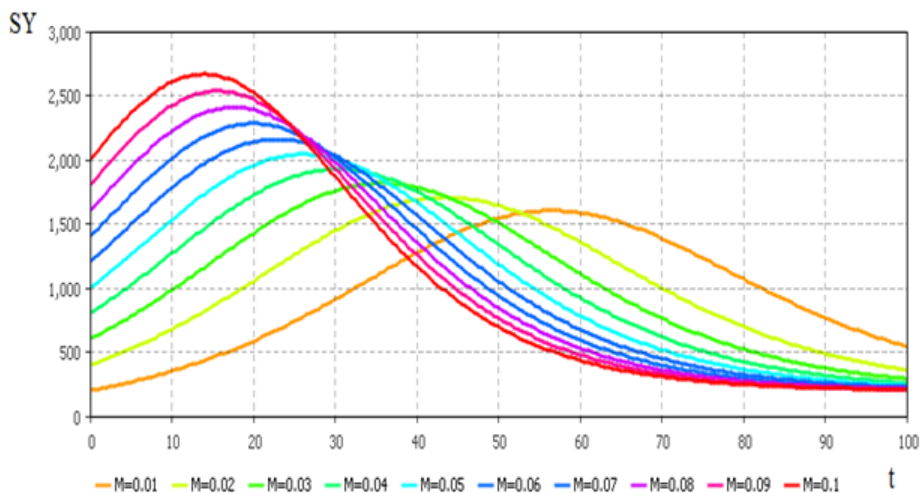


Fig. 2. The system flow diagram of the system-dynamic model of information and psychological counteractions



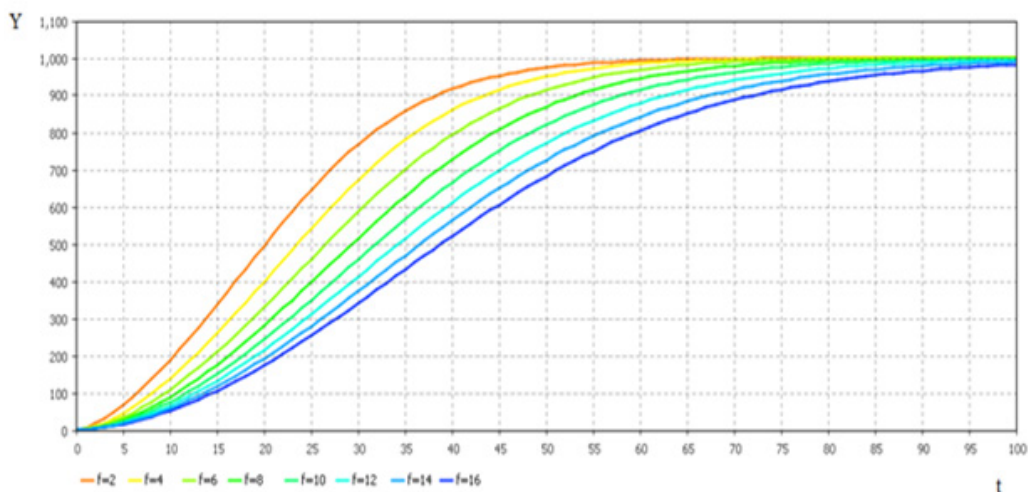
Р и с. 3. Скорость принятия идеи ИВ (SY) в зависимости от вероятности коммуникации на тему, вложенную в контент ИВ (p)

F i g. 3. The speed of acceptance of the II idea (SY) depending on the probability of communication on the topic, related to II content (p)

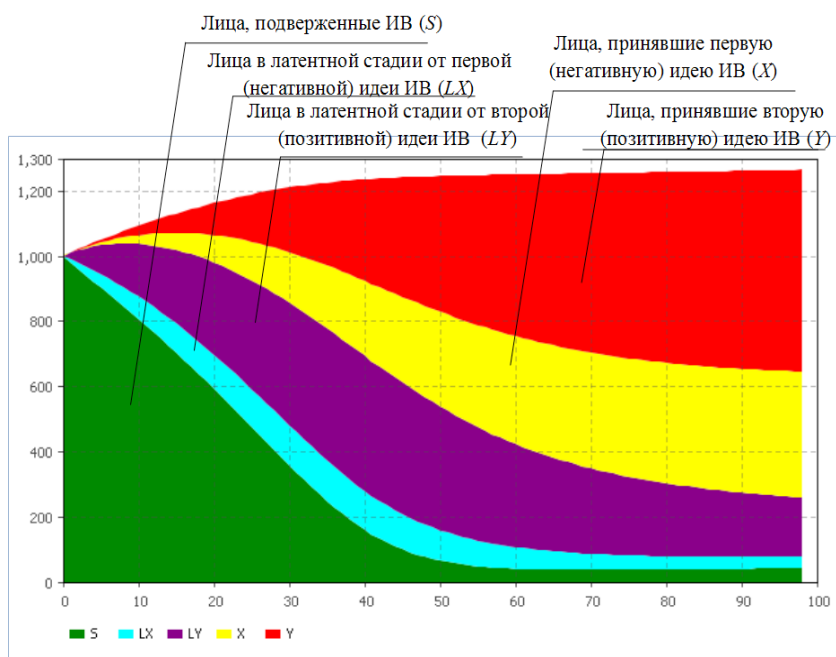


Р и с. 4. Скорость принятия идеи ИВ (SY) в зависимости от показателя массовости и регулярности СМИ, пропагандирующих идею ИВ (M)

F i g. 4. The speed of acceptance (SY) of the II idea depending on the circulation and regularity (M) of the media promoting it



Р и с. 5. Динамика количества лиц, принявших идею ИВ (Y), в зависимости от длительности латентного периода (f)
 F i g. 5. The dynamics of the number of people who accepted the II idea (Y), depending on the duration of the latent period (f)



Р и с. 6. Динамика количества лиц, подверженных ИВ (S), принявших первую – негативную (X) и вторую – положительную (Y) идеи ИВ, а также лиц в латентной стадии от первой (LX) и второй (LY) идей ИВ

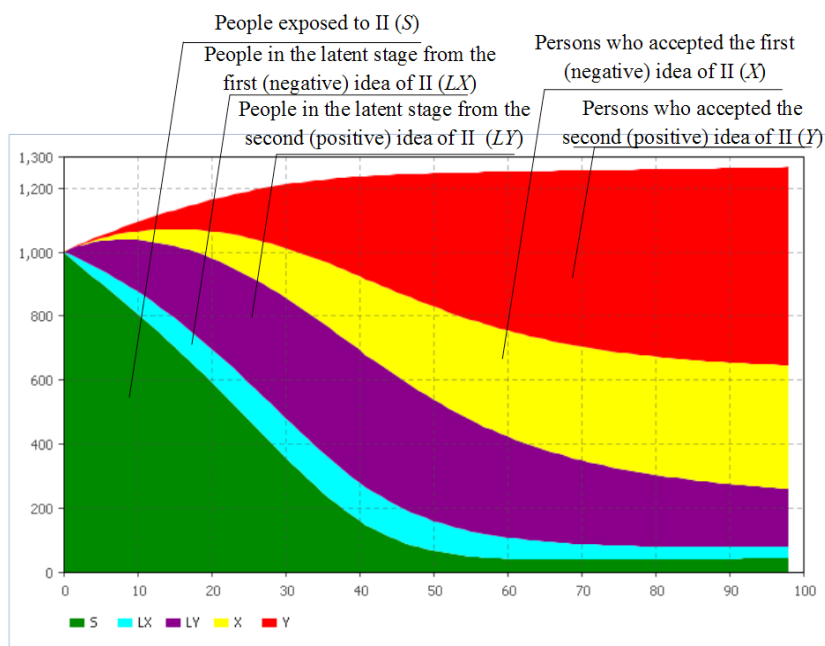
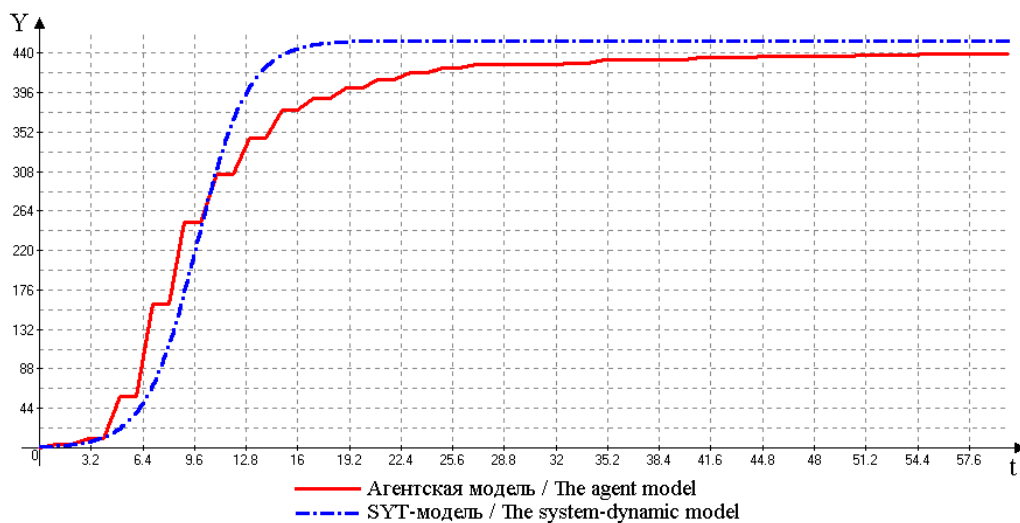
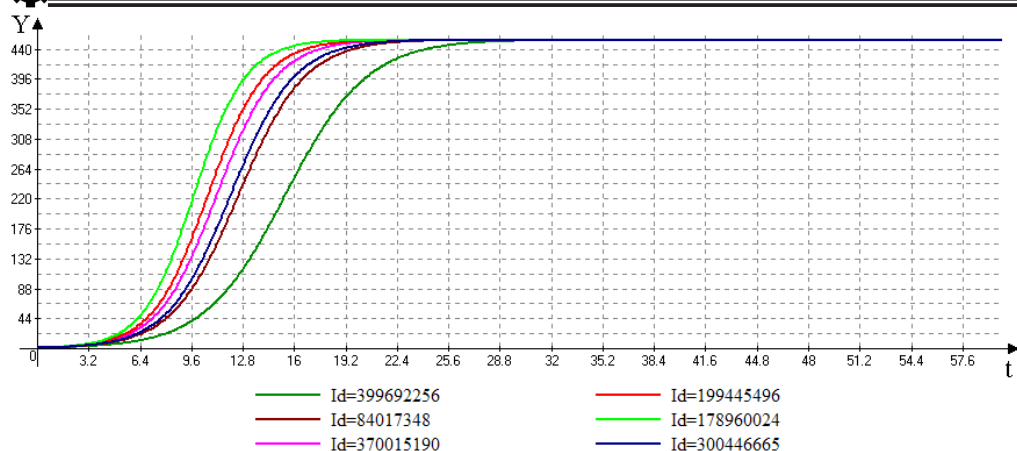


Fig. 6. The dynamics of the number of people exposed to II (S), the first – negative (X) and second – positive (Y) ideas, as well as people in the latent stage of the first (LX) and second (LY) ideas



Р и с. 7. Результаты сравнительного моделирования ИВ на основе системно-динамического и агентного подходов

Fig. 7. The results of comparative modeling of II based on the system-dynamic and agent approaches



Р и с. 8. Динамика количества лиц, «зараженных» идеей ИВ, в зависимости от источника «заражения» в г. К.

F i g. 8. The dynamics of the number of people, “infected” with the II idea, depending on the infection source in the city of K

Далее эксперимент был расширен: в качестве объектов исследования были выбраны 42 малых города России. По результатам анализа данных о сетевых связях между пользователями социальной сети «ВКонтакте» построены отображающие их графы. Рассчитаны топологические характеристики социальных сетей, такие как коэффициент кластеризации, степень связности, диаметр, плотность, средняя длина пути.

С целью выделения однородных групп поселений для сравнения времени распространения ИВ в них, исходя из топологических характеристик, применен иерархический метод кластерного анализа – метод Вальда. Дендрограмма кластеризации представлена на рис. 9.

В табл. 2 показано среднее время распространения ИВ в различных кластерах. Ее анализ свидетельствует о том, что наблюдается существенное различие среднего времени распространения ИВ в кластерах.

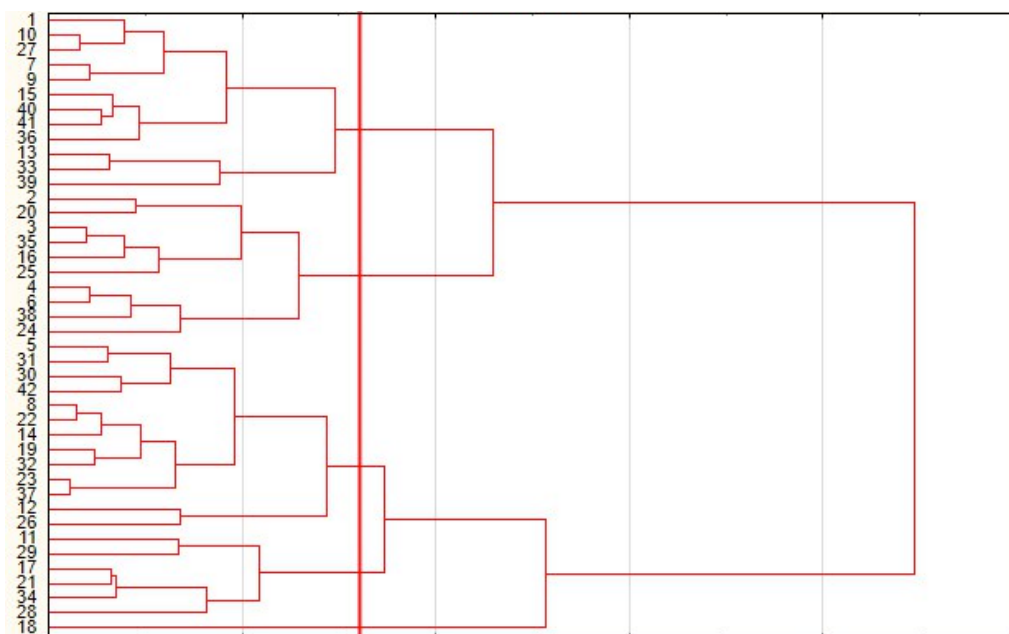
Данное обстоятельство требует различной стратегии и тактики со стороны соответствующих государственных структур по организации информацион-

ного противоборства в поселениях, относящихся к различным типологическим группам. Это в полной мере относится к сфере борьбы с терроризмом и экстремизмом в информационной среде.

Для апробации моделей далее был проведен эксперимент по результатам анализа статистических данных по сообществу в социальной сети «ВКонтакте», которое было создано с целью организации реального политического митинга с экстремистскими лозунгами. Временные зависимости, полученные по результатам моделирования, показывают высокую объясняемость модели; коэффициент детерминации равен 95 % (рис. 10). Отметим, что в динамике распространения ИВ о проведении оппозиционных митингов выделяются два периода с разными параметрами модели ИВ, соответствующими двум информационным вбросам, произошедшим в российских городах в тот период.

В рамках исследований по моделированию ИВ также проведен важный эксперимент, подтвердивший известный постулат Гиббса о статистических ансамблях¹². Существо постулата в том,

¹² Гиббс Дж. Основные принципы статистической механики, излагаемые со специальным применением к рациональному обоснованию термодинамики / Пер. с англ. К. В. Никольского. М. ; Л. : Гостехиздат, 1946. 203 с.



Р и с. 9. Типологические группы выборочной совокупности поселений России

F i g. 9. Typological groups of a sample of Russian settlements

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

Среднее время распространения ИВ в кластерах
The average dissemination time of the II idea in clusters

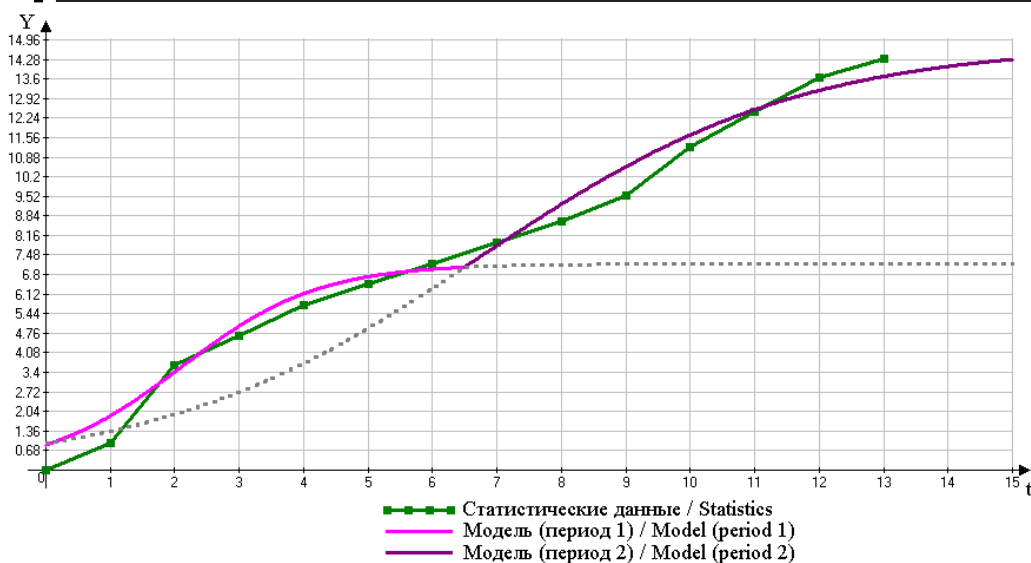
№ кластера / Number of cluster	Среднее время распространения идеи ИВ, ч / Average time of disseminating the II idea, in hours
1-й кластер / Cluster 1	310,00
2-й кластер / Cluster 2	250,40
3-й кластер / Cluster 3	181,00
4-й кластер / Cluster 4	133,25
Индивидуальный объект / The individual object	62,00

что независимые параллельные процессы информационного воздействия в однородных независимых популяциях протекают со схожей динамикой и параметрами модели, описывающей эти процессы.

Эксперимент по распространению идеи ИВ проводился в студенческой среде (рис. 11). В качестве объектов для распространения идеи ИВ выбраны семь независимых студенческих групп, обучающихся в различных вузах меди-

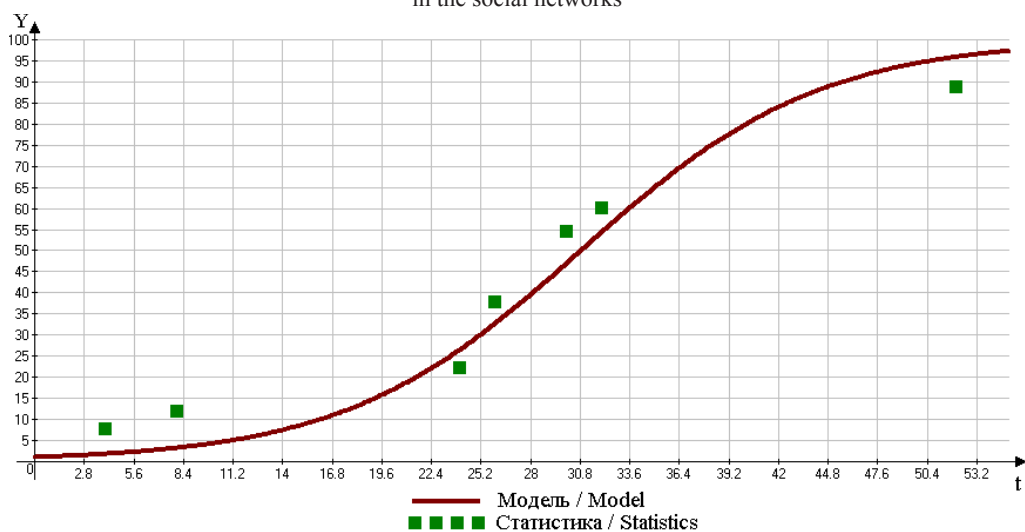
цинского профиля. Вероятность контакта между участниками групп принималась равной нулю в силу специфики организации образовательного процесса.

Таким образом, экспериментальные исследования системно-динамических моделей с использованием реальных статистических данных о распространении ИВ подтвердили их эффективность и работоспособность для прогнозирования динамики распространения ИВ в зависимости от скорости инфор-



Р и с. 10. Моделирование динамики распространения в социальной сети ИВ о проведении оппозиционных митингов

F i g. 10. Modeling the dynamics of disseminating the information about opposition rallies in the social networks



Р и с. 11. Результаты эксперимента по распространению ИВ в студенческой среде

F i g. 11. The experimental results of disseminating II to students

мационного «заражения», особенно-стей социальных групп, топологии социальных сетей и других факторов.

Обсуждение и заключение

1. Для решения задач исследования негативных ИВ на социальные группы и процессов информационного противоборства, а также управления этими

процессами эффективно применение методов системно-динамического, агентного и дискретно-событийного моделирования, используемого на сегодняшний день для исследования различных сложных социально-экономических процессов.

2. Имитационные модели ИВ и ИПД позволяют оценивать, анализи-

ровать и прогнозировать использование социальных сетей в качестве среды распространения экстремизма, терроризма, молодежной агрессии, аутоагрессии и других крайне опасных явлений. Результаты расчетов с помощью системы уравнений, реализованной в имитационной системе Anylogic, дают возможность территориальным органам управления и силовым структурам заблаговременно обосновывать управленческие решения по подготовке и реализации мероприятий, направленных на снижение или нейтрализацию указанных негативных ИВ на общество в целом и его социальные группы (включая молодежь) в частности в зависимости от структуры и динамики факторного комплекса, влияющего на процессы ИВ в социальных сетях.

3. Выбранное в качестве среды моделирования программное обеспечение современных имитационных платформ позволяет в деталях проигрывать различные сценарии с использованием системно-динамических и агентных моделей, наглядно интерпретировать результаты моделирования, проводить различные виды имитационных экспериментов.

4. Топологические различия социальных сетей как современной платфор-

мы ИВ и ИПД могут эффективно использоваться для построения стратегии и тактики информационного контакта с населением со стороны региональных властей и силовых структур, а также для более четкого и обоснованного построения системы противодействия различным негативным информационным влияниям на социальные группы, особенно молодежные, со стороны окружения различной природы, осуществляющего информационные операции.

5. Новизна модели информационного противоборства связана с тем, что в имитационной системе впервые описываются две противоборствующие идеи (имитационная платформа позволяет учитывать их любое разумное количество). Новым, пока не использованным в моделях информационных операций, является подход с применением к социальным процессам постулата Гиббса из статистической физики.

6. Перспективой развития анализа топологических различий в рамках системно-динамического подхода является выявление дополнительных «глубинных» факторов, характеризующих разные поселения/города/регионы и влияющих на динамику распространения идеи ИВ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Как управлять массовым сознанием: современные модели / В. А. Минаев [и др.]. М. : РосНОУ, 2013. 200 с.
2. Минаев В. А., Дворянkin С. В. Моделирование динамики информационно-психологических воздействий на массовое сознание // Вопросы кибербезопасности. 2016. № 5 (18). С. 56–64. DOI: <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2016-5-56-64>
3. Минаев В. А., Дворянkin С. В. Обоснование и описание модели динамики информационно-психологических воздействий деструктивного характера в социальных сетях // Безопасность информационных технологий. 2016. Том 23, № 3. С. 40–52. URL: <https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/16/26>
4. Моделирование угроз информационной безопасности с использованием принципов системной динамики / В. А. Минаев [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 6. С. 75–82.
5. Губанов Д. А., Новиков Д. А., Чхартишвили А. Г. Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства / под ред. чл.-корр. РАН Д. А. Новикова. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2010. 228 с.
6. Системно-динамическое моделирование информационных воздействий на социум / В. А. Минаев [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 11. С. 35–43.

7. **Алехнович С. О., Слизовский Д. Е., Ожиганов Э. Н.** Системно-динамическое моделирование: принципы, структура и переменные (на примере Московской области) // Вестник РУДН. Серия «Политология». 2009. № 1. С. 22–36. URL: <http://journals.rudn.ru/political-science/article/view/8918/8369>
8. **Liu W., Cui Y., Li Y.** Information systems security assessment based on system dynamics // International Journal of Security and Its Applications. 2015. Vol. 9, no. 2. P. 73–84.
9. **Kim A. C., Lee S. M., Lee D. H.** Compliance risk assessment measures of financial information security using system dynamics // International Journal of Security and Its Applications. 2012. Vol. 6, no. 4. P. 191–200.
10. **Behara R., Derrick Huang C., Hu Q.** A system dynamics model of information security investments // Journal of Information System Security. 2010. Vol. 6, no. 2. P. 1572–1583. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/5e4d/6276a8788cc43c1bb0531be97eec24490f94.pdf>
11. **Гусаров А. Н., Жуков Д. О., Косарева А. В.** Описание динамики распространения компьютерных угроз в информационно-вычислительных сетях с запаздыванием действия антивирусов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2010. № 1 (78). С. 112–120. URL: <http://vestnikprib.ru/articles/122/122.pdf>

Поступила 05.12.2018; принята к публикации 21.01.2019; опубликована онлайн 29.03.2019

Об авторах:

Минаев Владимир Александрович, профессор, кафедра защиты информации, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана» (105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1), доктор технических наук, ResearcherID: B-4420-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5342-0864>, m1va@yandex.ru

Сычев Михаил Павлович, профессор, кафедра защиты информации, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана» (105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1), доктор технических наук, ResearcherID: E-1068-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7535-7704>, mpsichov@sm.bmstu.ru

Вайц Екатерина Викторовна, доцент, кафедра защиты информации, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана» (105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1), кандидат технических наук, ResearcherID: D-9164-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4629-6252>, vaitcev@yandex.ru

Бондарь Константин Михайлович, профессор, кафедра информационного и технического обеспечения органов внутренних дел, Дальневосточный юридический институт МВД России (680020, г. Хабаровск, пер. Казарменный, д. 15), кандидат технических наук, доцент, ResearcherID: D-9910-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6928-0413>, bondar_km@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. А. Минаев – математическое описание моделей, формулирование задач, обсуждение результатов; М. П. Сычев – обоснование имитационной платформы, формулирование выводов; Е. В. Вайц – проведение имитационных экспериментов, описание результатов; К. М. Бондарь – обзор литературы, анализ результатов исследования.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Minaev V.A., Ovchinskiy A.S., Skryl S.V., Trostyanskiy S.N. [How to manage mass consciousness. Modern models]. Moscow: Russian New University; 2013. (In Russ.)
2. Minaev V.A., Dvoryankin S.V. Modeling the dynamics of information and psychological influence on mass consciousness. *Voprosy kiberbezopasnosti* = Cybersecurity Issues. 2016; 5:56–64. DOI: <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2016-5-56-64> (In Russ.)

3. Minaev V.A., Dvoryankin S.V. Foundation and description of informational and psychological destructive nature influences dynamics model in social networks. *Bezopasnost informatsionnykh tekhnologiy* = IT Security. 2016; 23(3):40-52. Available at: <https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/16/26> (In Russ.)
4. Minaev V.A., Sychev M.P., Vaits E.V., Gracheva Y.V. Modeling of threats to information security using principles of system dynamics. *Voprosy radioelektroniki* = Questions of Radio Electronics. 2017; 6:75-82. (In Russ.)
5. Gubanov D.A., Novikov D.A., Chkhartishvili A.G. [Social networks: models of information influence, management and confrontations]. Moscow: Publishing House of Physical, Mathematical and Technical Literature; 2010. (In Russ.)
6. Minaev V.A., Sychev M.P., Vaits E.V., Kirakosyan A.E. System-dynamic modeling of information influences on society. *Voprosy radioelektroniki* = Questions of Radio Electronics. 2017; 11:35-43. (In Russ.)
7. Alekhovich S.O., Slizovskiy D.E., Ozhiganov E.N. System-dynamical modeling: the principles, structure and variables (on the example of the Moscow region). *Vestnik Rossiyskogo universiteta družby narodov. Seriya: Politologiya* = Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Political Science. 2009; 1:22-36. Available at: <http://journals.rudn.ru/political-science/article/view/8918/8369> (In Russ.)
8. Liu W., Cui Y., Li Y. Information systems security assessment based on system dynamics. *International Journal of Security and Its Applications*. 2015; 9(2):73-84.
9. Kim A.C., Lee S.M., Lee D.H. Compliance risk assessment measures of financial information security using system dynamics. *International Journal of Security and Its Applications*. 2012; 6(4):191-200.
10. Behara R.S., Derrick Huang C. A System dynamics model of information security investments. *Journal of Information System Security*. 2010; 6(2):1572-1583. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/5e4d/6276a8788cc43c1bb0531be97eec24490f94.pdf>
11. Gusarov A.N., Zhukov D.O., Kosareva A.V. Description of dynamics of computer threats propagation in data computer networks with delay of antivirus software operation. *Vestnik MGTU im. N. E. Bauman. Ser.: Priborostroyeniye* = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering. 2010; 1:112-120. Available at: <http://vestnikprib.ru/articles/122/122.pdf> (In Russ.)

Submitted 05.12.2018; revised 21.01.2019; published online 29.03.2019

About the authors:

Vladimir A. Minaev, Professor, Department of Information Security, Chair of Information Protection, Bauman Moscow State Technical University (2nd 5, bd. 1 Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: B-4420-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5342-0864>, m1va@yandex.ru

Mikhail P. Sychev, Professor, Department of Information Security, Chair of Information Protection, Bauman Moscow State Technical University (2nd 5, bd. 1 Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: E-1068-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7535-7704>, mpsichov@sm.bmstu.ru

Ekaterina V. Vaits, Associate Professor, Department of Information Security, Chair of Information Protection, Bauman Moscow State Technical University (2nd 5, bd. 1 Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia), Ph. D. (Engineering), ResearcherID: D-9164-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4629-6252>, vaitcev@yandex.ru

Konstantin M. Bondar, Professor, Department of Information and Technical Support of Internal Affairs, Far Eastern Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russia (15 Kazarmenny Pereulok, Khabarovsk 680020, Russia), Ph.D., Associate Professor, ResearcherID: D-9910-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6928-0413>, bondar_km@mail.ru

Contribution of the authors:

V. A. Minaev – mathematical description of the models, formulation of the problems, discussion of the results; M. P. Sychev – justification of the simulation platform, formulation of conclusions; E. V. Vaits – simulation experiments, description of the results; K. M. Bondar – literature review, analysis of the research results.

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

Computer science, computer engineering and management



Простейшая дифференциальная игра на плоскости с четырьмя участниками

В. Д. Ширяев, Е. В. Шагилова *

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

*shagilova_elena@mail.ru

Введение. В статье рассматривается простейшая дифференциальная игра с четырьмя участниками. Игроки перемещаются на плоскости и совершают простое движение. Рассматриваемая игра сводится к кооперативной дифференциальной игре. Показывается динамическая устойчивость таких принципов оптимальности, как S -ядро и вектор Шепли.

Материалы и методы. Для анализа и решения кооперативной дифференциальной игры применяются стандартные процедуры кооперативной теории игр. Условно-оптимальные траектории, вдоль которых осуществляется движение игроков, находятся с использованием принципа максимума Понтрягина. При построении характеристической функции используется минимаксный подход.

Результаты исследования. В явном виде выписаны оптимальные управления (стратегии) игроков, а также условно-оптимальные траектории их движения при различных способах образования коалиций. Характеристическая функция построена в соответствии с принятым принципом максимина, а в качестве решения рассматриваются S -ядро и вектор Шепли. В явном виде выписаны компоненты вектора Шепли, показана принадлежность вектора Шепли S -ядру, а также непустота S -ядра при движении игроков вдоль оптимальной траектории. Используя результаты статической кооперативной теории игр при исследовании дифференциальных игр, исследователи сталкиваются с проблемами, которые связаны со спецификой дифференциальных уравнений движения. В качестве первоочередной здесь выступает проблема динамической устойчивости рассматриваемых принципов оптимальности. В работе показывается динамическая устойчивость вектора Шепли и S -ядра.

Обсуждение и заключение. Результаты, полученные в ходе проведенного исследования, показывают целесообразность анализа динамической устойчивости рассматриваемых принципов оптимальности.

Ключевые слова: простое движение, характеристическая функция, дележ, оптимальная траектория, устойчивость решения, S -ядро, вектор Шепли

Для цитирования: Ширяев В. Д., Шагилова Е. В. Простейшая дифференциальная игра на плоскости с четырьмя участниками // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 1. С. 40–50. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.040-050>



A Simplest Differential Game on a Plane with Four Participants

V. D. Shirayev, E. V. Shagilova*

National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

*shagilova_elena@mail.ru

Introduction. The article presents a simplest differential game with four participants. The players move on a plane and can do simple movements. The game under considering comes down to a cooperative differential game. The dynamic stability of such optimality principles as the S-kernel and Shapley vector is shown.

Materials and Methods. The standard procedures of the cooperative game theory are applied to the analysis and decision of a cooperative differential game. The conditional and optimum trajectories, along which the players move, are found using the Pontryagin's maximum principle. When constructing the characteristic function, the minimax approach is used.

Results. The optimum strategy of the players, conditional and optimum trajectories of their movements at various ways of formation of coalitions are written out explicitly. The characteristic function is constructed according to the accepted max-min principle; the S-kernel and Shapley vector are considered as a decision. The components of the Shapley vector are written out explicitly; the fact that the Shapley vector is an element of the S-kernel and nonemptiness of the S-kernel, when the players are moving along an optimum trajectory, are shown. Using the results of the static cooperative game theory for researching differential games, we face the problems, which are connected with specifics of the differential equations of the movement. As a priority, the problem of the dynamic stability of the optimality principles under consideration is identified. In the work, the dynamic stability of the Shapley vector and S-kernel is shown.

Discussion and Conclusion. The results of the research show that the analysis of the dynamic stability of the optimality principles considered is relevant.

Keywords: simple movement, characteristic function, sharing, optimum trajectory, stability of the decision, S-kernel, Shapley vector

For citation: Shirayev V.D., Shagilova E.V. A Simplest Differential Game on a Plane with Four Participants. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(1):40-50. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.040-050>

Введение

Процессы преследования являются типичными примерами дифференциальных игр. Различные методы поведения сторон в конфликтных ситуациях со многими участниками и в играх с неполной информацией моделируются прежде всего на примерах простого преследования. Несмотря на внешнюю простоту постановки, многие задачи простого преследования сами по себе являются серьезными математическими проблемами.

Одним из подходов к изучению таких дифференциальных игр является использование кооперативной теории, когда они рассматриваются как коопера-

тивные дифференциальные игры. С учетом того, что движения игроков описываются дифференциальными уравнениями, возникает вопрос об устойчивости (состоятельности во времени) рассматриваемых принципов оптимальности. Отказ от данной концепции содержит в себе возможность отклонения от первоначально выбранного оптимального поведения в состояниях, в которых появляется новое оптимальное решение, не являющееся таковым в первоначальном смысле, что приводит к нарушению устойчивости процесса в целом.

В статье рассматривается простейшая дифференциальная игра с четырьмя участниками. Игроки совершают

простое движение¹ [1; 2], т. е. перемещаются на плоскости с ограниченной или постоянной по величине скоростью, при этом направление движения может меняться произвольным образом. Исследуется неантагонистическая кооперативная дифференциальная игра четырех лиц $\Gamma_v(z_0, T - t_0)$ из начального состояния z_0 и продолжительностью $T - t_0$. Уравнения движения имеют вид:

$$\dot{z} = u_1 + u_2 + u_3 + u_4, \quad (1)$$

$$z(t_0) = z_0. \quad (2)$$

В равенстве (1) $z = z(x, y)$, $u_i = (u_i^{(1)}, u_i^{(2)})$, $\|u_i\| \leq 1$, $i \in N = \{1, 2, 3, 4\}$.

Функция выигрыша игрока i определяется следующим образом:

$$K_{t_0, z_0}^i(z(t)) = \int_{t_0}^T h_i(z(t)) dt,$$

где $z(t) = z(t, t_0, u_1, u_2, u_3, u_4)$ – решение системы (1)–(2) при допустимых управлениях u_1, u_2, u_3, u_4 , $h_i(z(t)) = a_i x(t) + b_i y(t) + c_i$, $a_i, b_i, c_i = \text{const}$; $a_i, b_i, c_i \geq 0$, $a_i^2 + b_i^2 + c_i^2 \neq 0$, $i \in N$.

Обзор литературы

Задачи простого преследования рассматривались в ряде работ^{2, 3} [1–5]. Так, в исследованиях Л. А. Петросяна, В. Д. Ширяева и Р. Р. Бикмурзиной⁴ [1; 2] решение задачи было найдено в предположении о том, что очередность встреч выбирается в начальный момент времени (программно), а игроки движутся по прямым линиям. В статье Т. Г. Абра-

мянц, В. П. Маслова и Е. Я. Рубиновича [4] рассмотрены возможности выбора очередности встреч как программно, так и позиционно, а в работе И. И. Шевченко [5] приведено решение поставленной задачи с использованием подхода Р. Айзекса. В исследовании В. Д. Ширяева, Н. М. Куляшовой и О. О. Виноградовой⁵ при решении задачи в основном использовались геометрические методы. При изучении таких игр часто используется методология кооперативной теории игр⁶ [6–8]. В качестве принципа оптимальности в основном рассматривается С-ядро. Однако вопрос исследования выбранного принципа оптимальности осложняется тем, что в таких задачах необходимо учитывать его динамическую устойчивость.

Впервые понятие динамической устойчивости решений в дифференциальных играх как с интегральными, так и с терминальными выигрышами ввел Л. А. Петросян [6; 9–11]; он же предложил и пути преодоления динамической неустойчивости принципов оптимальности [8; 10–13]. Несколько позже в западных странах независимо от вышеназванных исследований возник интерес к указанным вопросам, и проблема получила название «time-consistency problem» (проблема состоятельности во времени) [14–16]. Однако в большинстве случаев подобный интерес ограничивался лишь констатацией проблемы, и в упомянутых работах не рассматривались вопросы, связанные с решением вопроса несостоятельности во време-

¹ Ширяев В. Д., Бикмурзина Р. Р. Простое преследование на плоскости с четырьмя участниками // В мире науки и инноваций : сб. науч. ст. междунар. науч.-практ. конф. В 3 ч. Ч. 3. Уфа : АЭТЕРНА, 2016. С. 6–8.

² Ширяев В. Д., Куляшова Н. М., Виноградова О. О. Геометрический подход к решению игр простого преследования со многими участниками. Деп. ВИНТИ № 1254 – В 98 от 22.04.1998 г. 26 с.

³ Ширяев В. Д., Бикмурзина Р. Р. Простое преследование на плоскости с четырьмя участниками.

⁴ Там же.

⁵ Ширяев В. Д., Куляшова Н. М., Виноградова О. О. Геометрический подход к решению игр простого преследования со многими участниками.

⁶ Ширяев В. Д., Нестерова Т. Н., Боткина И. А. Простейшая дифференциальная игра четырех лиц. Деп. ВИНТИ № 954 – В 2005 от 07.07.2005. 14 с.

ни, что крайне важно для практических приложений.

Материалы и методы

В статье при переходе к рассмотрению исследуемой дифференциальной игры с простым движением как кооперативной дифференциальной игры при построении характеристической функции был предложен общепринятый принцип максимина. Для нахождения оптимальных траекторий и оптимальных управлений (стратегий) игроков использовался принцип максимума Понтрягина. При исследовании С-ядра на устойчивость использовался явный вид условий непустоты игры четырех лиц.

Результаты исследования

Введем следующие обозначения:

$$u_S^{(j)} = \sum_{i \in S} u_i^{(j)}, \quad u_j^S = u_S^{(j)} + u_{N \setminus S}^{(j)},$$

$$j = 1, 2; \quad a_S = \sum_{i \in S} a_i, \quad b_S = \sum_{i \in S} b_i,$$

$$c_S = \sum_{i \in S} c_i, \quad S \subset N.$$

Вычислим значение характеристической функции:

$$v(S; T - t_0, z_0) = \begin{cases} 1) \quad \max_{\substack{|z|^2 \leq (|S| - |N \setminus S|)^2 (T - t_0)^2 \\ n \text{ п.и. } |S| > |N \setminus S|}} \sum_{i \in S} \int_{t_0}^T h_i(z(\tau)) d\tau \\ 2) \quad \min_{\substack{|z|^2 \leq (|N \setminus S| - |S|)^2 (T - t_0)^2 \\ n \text{ п.и. } |S| < |N \setminus S|}} \sum_{i \in S} \int_{t_0}^T h_i(z(\tau)) d\tau \\ 3) (T - t_0) \sum_{i \in S} c_i \quad n \text{ п.и. } |S| = |N \setminus S|. \end{cases}$$

Для нахождения $v(S; T - t_0, z_0)$ воспользуемся принципом максимума [17]. Для рассматриваемой задачи $H = pu - \sum_{i=1}^4 h_i(z(t))$.

Сопряженное уравнение примет вид:

$$\dot{p} = [h_1(z(t)) + h_2(z(t)) + h_3(z(t)) + h_4(z(t))]'_x.$$

Т. к. рассматривается задача со свободным правым концом и, следовательно, $p(T) = 0$, то

$$p = \{a_N(t - T); b_N(t - T)\}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} H &= a_N(t - T)u_N^{(1)} + b_N(t - T) - \\ &- \{a_N[(t - t_0)u_N^{(1)} + x_0] + b_N[(t - t_0)u_N^{(2)} + y_0]\} = \\ &= -[a_N(T - t_0)u_N^{(1)} + b_N(T - t_0)u_N^{(2)} + c_N] - \\ &- a_N x_0 - b_N y_0. \end{aligned}$$

Итак, следует найти

$$\max_{u_N^{(1)}, u_N^{(2)}} H_1 = \max_{(u_N^{(1)})^2 + (u_N^{(2)})^2 \leq 16} (a_N u_N^{(1)} + b_N u_N^{(2)});$$

$\max H_1$ достигается при

$$\bar{u}_1^{-N} = \frac{4a_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}}, \quad \bar{u}_2^{-N} = \frac{4b_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}}.$$

Следовательно,

$$\bar{x}(t) = \frac{4a_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}}(t - t_0) + x_0,$$

$$\bar{y}(t) = \frac{4b_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}}(t - t_0) + y_0.$$

Аналогично находим, что

$$\bar{u}_1^{-S} = \frac{2a_S}{\sqrt{a_S^2 + b_S^2}}, \quad \bar{u}_2^{-S} = \frac{2b_S}{\sqrt{a_S^2 + b_S^2}},$$

$$S = \{i, j, l\}, \quad i \neq j \neq l, \quad i, j, l \in N;$$

$$\bar{u}_1^{-S} = 0, \quad \bar{u}_2^{-S} = 0, \quad \text{где } S = \{i, j\}, \quad i \neq j, \quad i, j \in N;$$

$$\bar{u}_1^{-S} = -\frac{2a_S}{\sqrt{a_S^2 + b_S^2}}, \quad \bar{u}_2^{-S} = -\frac{2b_S}{\sqrt{a_S^2 + b_S^2}},$$

$$S = \{i\}, \quad i \in N.$$

Тогда

$$\begin{aligned}\bar{x}^{(S)}(t) &= \bar{u}_1^S(t - \bar{t}) + \frac{4a_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}}(\bar{t} - t_0) + x_0, \\ \bar{y}^{(S)}(t) &= \bar{u}_2^S(t - \bar{t}) + \frac{4b_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}}(\bar{t} - t_0) + y_0, \\ \bar{t} &\in [t_0, T], t \in [\bar{t}, T].\end{aligned}$$

И, следовательно,

$$\begin{aligned}v(N; T - t, \bar{z}(t)) &= \int_t^T h_N(\bar{z}(\tau)) d\tau = \\ &= \int_t^T \left[\frac{4a_N^2}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}}(\tau - t_0) + a_N x_0 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{4b_N^2}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}}(\tau - t_0) + b_N y_0 + c_N \right] d\tau = \\ &= \int_t^T \left[4\sqrt{a_N^2 + b_N^2}(\tau - t_0) + a_N x_0 + b_N y_0 + c_N \right] d\tau = \\ &= 2\sqrt{a_N^2 + b_N^2}(T - t)(T + t - 2t_0) + \\ &\quad + (a_N x_0 + b_N y_0 + c_N)(T - t); \\ v(S; T - t, \bar{z}(t)) &= \int_t^T h_S(\bar{z}(\tau)) d\tau = \\ &= \int_t^T \left[\frac{2a_S^2}{\sqrt{a_S^2 + b_S^2}}(\tau - \bar{t}) + 4\frac{a_S a_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}}(\bar{t} - t_0) + \right. \\ &\quad \left. + a_S x_0 + \frac{2b_S^2}{\sqrt{a_S^2 + b_S^2}}(\tau - \bar{t}) + \right. \\ &\quad \left. + 4\frac{b_S b_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}}(\bar{t} - t_0) + b_S y_0 + c_S \right] d\tau = \\ &= \int_t^T \left[2\sqrt{a_S^2 + b_S^2}(\tau - \bar{t}) + \right. \\ &\quad \left. + 4\left((a_S a_N + b_S b_N)/\sqrt{a_N^2 + b_N^2}\right)(\bar{t} - t_0) + \right. \\ &\quad \left. + a_S x_0 + b_S y_0 + c_S \right] d\tau = \\ &= \sqrt{a_S^2 + b_S^2}(T - t)(T + t - 2\bar{t}) + \\ &\quad + \left[4\left((a_S a_N + b_S b_N)/\sqrt{a_N^2 + b_N^2}\right)(\bar{t} - t_0) + \right. \\ &\quad \left. + a_S x_0 + b_S y_0 + c_S \right](T - t),\end{aligned}$$

если $S = \{i, j, l\}$, $i \neq j \neq l$, $i, j, l \in N$;

$$\begin{aligned}v(S; T - t, \bar{z}(t)) &= \int_t^T \left[4\frac{a_S a_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}}(\bar{t} - t_0) + \right. \\ &\quad \left. + a_S x_0 + 4\frac{b_S b_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}}(\bar{t} - t_0) + b_S y_0 + c_S \right] d\tau = \\ &= \left[4\frac{a_S a_N + b_S b_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}}(\bar{t} - t_0) + a_S x_0 + b_S y_0 + c_S \right](T - t) = \\ &= \sqrt{a_S^2 + b_S^2}(T - t)(T + t - 2\bar{t}) + \\ &\quad + \left[4\frac{a_S a_N + b_S b_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}}(\bar{t} - t_0) + a_S x_0 + b_S y_0 + c_S \right](T - t),\end{aligned}$$

если $S = \{i, j\}$, $i \neq j$, $i, j \in N$;

$$\begin{aligned}v(S; T - t, \bar{z}(t)) &= \int_t^T h_S(\bar{z}(\tau)) d\tau = \\ &= \int_t^T \left[-\frac{2a_S^2}{\sqrt{a_S^2 + b_S^2}}(\tau - \bar{t}) + 4\frac{a_S a_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}}(\bar{t} - t_0) + \right. \\ &\quad \left. + a_S x_0 - \frac{2b_S^2}{\sqrt{a_S^2 + b_S^2}}(\tau - \bar{t}) + 4\frac{b_S b_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}}(\bar{t} - t_0) + \right. \\ &\quad \left. + b_S y_0 + c_S \right] d\tau = \int_t^T \left[-2\sqrt{a_S^2 + b_S^2}(\tau - \bar{t}) + \right. \\ &\quad \left. + 4\left((a_S a_N + b_S b_N)/\sqrt{a_N^2 + b_N^2}\right)(\bar{t} - t_0) + \right. \\ &\quad \left. + a_S x_0 + b_S y_0 + c_S \right] d\tau = \\ &= -\sqrt{a_S^2 + b_S^2}(T - t)(T + t - 2\bar{t}) + \\ &\quad + \left[4\left((a_S a_N + b_S b_N)/\sqrt{a_N^2 + b_N^2}\right)(\bar{t} - t_0) + \right. \\ &\quad \left. + a_S x_0 + b_S y_0 + c_S \right](T - t),\end{aligned}$$

если $S = \{i\}$, $i \in N$.

Таким образом,

$$\begin{aligned}v(N; T - t, \bar{z}(t)) &= \\ &= 2\sqrt{a_N^2 + b_N^2}(T - t)(T + t - 2t_0) + \\ &\quad + (a_N x_0 + b_N y_0 + c_N)(T - t); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& v(\{i, j, l\}; T - t, \bar{z}(t)) = \\
& = \sqrt{a_{ijl}^2 + b_{ijl}^2} (T - t)(T + t - 2\bar{t}) + \\
& + 4 \frac{a_{ijl}a_N + b_{ijl}b_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}} (\bar{t} - t_0) + \\
& + a_{ijl}x_0 + b_{ijl}y_0 + c_{ijl} (T - t); \\
& v(\{i, j\}; T - t, \bar{z}(t)) = \\
& = \left[4 \left((a_{ij}a_N + b_{ij}b_N) / \sqrt{a_N^2 + b_N^2} \right) (\bar{t} - t_0) + \right. \\
& \left. + a_{ij}x_0 + b_{ij}y_0 + c_{ij} \right] (T - t); \\
& v(\{i\}; T - t, \bar{z}(t)) = \\
& = -\sqrt{a_i^2 + b_i^2} (T - t)(T + t - 2\bar{t}) + \\
& + \left[4 \frac{a_i a_N + b_i b_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}} (\bar{t} - t_0) + a_i x_0 + b_i y_0 + c_i \right] (T - t), \\
& i \neq j \neq l, i, j, l \in N.
\end{aligned}$$

Рассмотрим C -ядро $(C_v(T - t_0, z_0))$ данной игры.

Теорема 1

$$C_v(T - t, \bar{z}(t)) \neq \emptyset, \quad t \in [t_0, T].$$

Доказательство

Необходимым и достаточным условием непустоты C -ядра в игре четырех лиц является выполнение следующих неравенств⁷:

$$v_{ijl} + v_{ijk} + v_{ilk} + v_{jlk} \leq 3v(N),$$

$$v_{ijl} + v_{jlk} + v_{ik} \leq 2v(N),$$

$$v_{ij} + v_{il} + v_{ik} + 2v_{jlk} \leq 3v(N),$$

$$i, j, l, k \in N, \quad i \neq j \neq k \neq l.$$

В нашем случае эти неравенства примут вид:

$$\begin{aligned}
& v(\{i, j, l\}; T - t, \bar{z}(t)) + \\
& + v(\{i, j, k\}; T - t, \bar{z}(t)) + \\
& + v(\{i, l, k\}; T - t, \bar{z}(t)) +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + v(\{j, l, k\}; T - t, \bar{z}(t)) \leq \\
& \leq 3v(N; T - t, \bar{z}(t)), \\
& v(\{i, j, l\}; T - t, \bar{z}(t)) + \\
& + v(\{j, l, k\}; T - t, \bar{z}(t)) + \\
& + v(\{i, k\}; T - t, \bar{z}(t)) \leq \\
& \leq 2v(N; T - t, \bar{z}(t)), \\
& v(\{i, j\}; T - t, \bar{z}(t)) + \\
& + v(\{i, l\}; T - t, \bar{z}(t)) + \\
& + v(\{i, k\}; T - t, \bar{z}(t)) + \\
& + 2v(\{j, l, k\}; T - t, \bar{z}(t)) \leq \\
& \leq 3v(N; T - t, \bar{z}(t)),
\end{aligned}$$

$$i, j, k, l \in N, \quad i \neq j \neq k \neq l, \quad t \in [t_0, T].$$

Покажем справедливость этих неравенств.

$$\begin{aligned}
& v(\{i, j, l\}; T - t, \bar{z}(t)) + v(\{i, j, k\}; T - t, \bar{z}(t)) + \\
& + v(\{i, l, k\}; T - t, \bar{z}(t)) + v(\{j, l, k\}; T - t, \bar{z}(t)) - \\
& - 3v(N; T - t, \bar{z}(t)) = (\sqrt{a_{ijl}^2 + b_{ijl}^2} + \sqrt{a_{ijk}^2 + b_{ijk}^2} + \\
& + \sqrt{a_{ilk}^2 + b_{ilk}^2} + \sqrt{a_{jlk}^2 + b_{jlk}^2})(T - t)(T + t - 2\bar{t}) + \\
& + \left[4 \left(\frac{(a_{ijl} + a_{ijk} + a_{ilk} + a_{jlk})a_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}} + \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{(b_{ijl} + b_{ijk} + b_{ilk} + b_{jlk})b_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}} \right) (\bar{t} - t_0) + \right. \\
& + (a_{ijl} + a_{ijk} + a_{ilk} + a_{jlk})x_0 + (b_{ijl} + b_{ijk} + b_{ilk} + b_{jlk})y_0 + \\
& + (c_{ijl} + c_{ijk} + c_{ilk} + c_{jlk}))(T - t) - \\
& - 6\sqrt{a_N^2 + b_N^2}(T - t)(T + t - 2t_0) - \\
& - 3(a_N x_0 + b_N y_0 + c_N)(T - t) = \\
& = (\sqrt{a_{ijl}^2 + b_{ijl}^2} + \sqrt{a_{ijk}^2 + b_{ijk}^2} + \sqrt{a_{ilk}^2 + b_{ilk}^2} + \sqrt{a_{jlk}^2 + b_{jlk}^2}) \times \\
& \times (T - t)(T + t - 2\bar{t}) + 12\sqrt{a_N^2 + b_N^2}(T - t)(\bar{t} - t_0) - \\
& - 6\sqrt{a_N^2 + b_N^2}(T - t)(T + t - 2t_0) =
\end{aligned}$$

⁷ Ширяев В. Д. C -ядро в играх четырех лиц // Сборник научных трудов SWorld. 2013. Т. 4, № 4. С. 79–85.

$$= \left(\left(\sqrt{a_{ij}^2 + b_{ij}^2} + \sqrt{a_{jk}^2 + b_{jk}^2} + \sqrt{a_{ik}^2 + b_{ik}^2} + \sqrt{a_{jlk}^2 + b_{jlk}^2} - 6\sqrt{a_N^2 + b_N^2} \right) (T-t)(T+t-2\bar{t}) \leq 0. \right.$$

Аналогично доказывается, что

$$\begin{aligned} & v(\{i, j, l\}; T-t, \bar{z}(t)) + \\ & + v(\{j, l, k\}; T-t, \bar{z}(t)) + \\ & + v(\{i, k\}; T-t, \bar{z}(t)) - \\ & - 2v(N; T-t, \bar{z}(t)) = \\ & = \left(\sqrt{a_{ijl}^2 + b_{ijl}^2} + \sqrt{a_{jlk}^2 + b_{jlk}^2} - \right. \\ & \left. - 4\sqrt{a_N^2 + b_N^2} \right) (T-t)(T+t-2\bar{t}) \leq 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & v(\{i, j\}; T-t, \bar{z}(t)) + \\ & + v(\{i, l\}; T-t, \bar{z}(t)) + \\ & + v(\{i, k\}; T-t, \bar{z}(t)) + \\ & + 2v(\{j, l, k\}; T-t, \bar{z}(t)) - \\ & - 3v(N; T-t, \bar{z}(t)) = \\ & = \left(2\sqrt{a_{jlk}^2 + b_{jlk}^2} - 6\sqrt{a_N^2 + b_N^2} \right) \times \\ & \times (T-t)(T+t-2\bar{t}) \leq 0, \end{aligned}$$

$$\bar{t} \in [t_0, T], \quad t \in [t, T], \quad i, j, k, l \in N, \quad i \neq j \neq k \neq l.$$

Рассмотрим теперь вектор Шепли. Формулы для нахождения компонентов вектора Шепли примут вид:

$$\begin{aligned} & \Phi_i(v(S; T-t, \bar{z}(t))) = \\ & = \sum_{\substack{S \subseteq N \\ (i \in S)}} \frac{(n-1)!(s-1)!}{n!} \times \\ & \times [v(S; T-t, \bar{z}(t)) - v(S \setminus \{i\}; T-t, \bar{z}(t))]. \quad (3) \end{aligned}$$

Подставляя значения $v(S; T-t, \bar{z}(t))$ в выражение (3), получим:

$$\begin{aligned} \Phi_i(v) = & \frac{(4-1)!(1-1)!}{4!} \left[-\sqrt{a_i^2 + b_i^2} (T-t)(T+t-2\bar{t}) + \right. \\ & + 4 \left(\frac{a_i a_N + b_i b_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}} (\bar{t}-t_0) + a_i x_0 + b_i y_0 + c_i \right) \times \\ & \times (T-t) - 0 \Big] + \frac{(4-2)!(2-1)!}{4!} \times \\ & \times \left[4 \left(\frac{(a_{ij} + a_{il} + a_{ik}) a_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}} + \frac{(b_{ij} + b_{il} + b_{ik}) b_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}} \right) (\bar{t}-t_0) + \right. \\ & + (a_{ij} + a_{il} + a_{ik}) x_0 + (b_{ij} + b_{il} + b_{ik}) y_0 + c_{ij} + c_{il} + c_{ik} \Big] \times \\ & \times (T-t_0) + \left(\sqrt{a_j^2 + b_j^2} + \sqrt{a_l^2 + b_l^2} + \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \right) (T-t) \times \\ & \times (T+t-2\bar{t}) - \left(4 \frac{a_{jlk} a_N + b_{jlk} b_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}} (\bar{t}-t_0) + \right. \\ & + a_{jlk} x_0 + b_{jlk} y_0 + c_{jlk} \Big) (T-t) \Big] + \frac{(4-3)!(3-1)!}{4!} \times \\ & \times \left[\left(\sqrt{a_{ijl}^2 + b_{ijl}^2} + \sqrt{a_{jlk}^2 + b_{jlk}^2} + \sqrt{a_{ikl}^2 + b_{ikl}^2} \right) (T-t)(T+t-2\bar{t}) + \right. \\ & + \left(4 \frac{(a_{ijl} + a_{jlk} + a_{ikl}) a_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}} + \frac{(b_{ijl} + b_{jlk} + b_{ikl}) b_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}} \right) (\bar{t}-t_0) + \\ & + (a_{ijl} + a_{jlk} + a_{ikl}) x_0 + (b_{ijl} + b_{jlk} + b_{ikl}) y_0 + \\ & + (c_{ijl} + c_{jlk} + c_{ikl}) \Big] (T-t) - \\ & - \left(4 \frac{(a_{jl} + a_{jk} + a_{lk}) a_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}} + \frac{(b_{jl} + b_{jk} + b_{lk}) b_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}} \right) (\bar{t}-t_0) + \\ & + (a_{jl} + a_{jk} + a_{lk}) x_0 + (b_{jl} + b_{jk} + b_{lk}) y_0 + c_{jl} + c_{jk} + c_{lk} \Big] \times \\ & \times (T-t) \Big] + \frac{(4-4)!(4-1)!}{4!} \times \\ & \times \left[2\sqrt{a_N^2 + b_N^2} (T-t)(T+t-2t_0) + \right. \\ & + (a_N x_0 + b_N y_0 + c_N) (T-t) - \\ & - \sqrt{a_{jlk}^2 + b_{jlk}^2} (T-t)(T+t-2\bar{t}) - \\ & - \left(4 \frac{a_{jlk} a_N + b_{jlk} b_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}} (\bar{t}-t_0) + a_{jlk} x_0 + b_{jlk} y_0 + c_{jlk} \right) (T-t) \Big] = \\ & = \frac{1}{12} \left[(-3\sqrt{a_i^2 + b_i^2} + \sqrt{a_j^2 + b_j^2} + \right. \\ & + \sqrt{a_l^2 + b_l^2} + \sqrt{a_k^2 + b_k^2} + \sqrt{a_{ijl}^2 + b_{ijl}^2} + \sqrt{a_{jlk}^2 + b_{jlk}^2} + \\ & + \sqrt{a_{ikl}^2 + b_{ikl}^2} + \sqrt{a_{jlk}^2 + b_{jlk}^2}) (T-t)(T+t-2\bar{t}) + \\ & + 6\sqrt{a_N^2 + b_N^2} (T-t)(T+t-2t_0) + \\ & + \left(36 \frac{a_i a_N + b_i b_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}} (\bar{t}-t_0) (T-t) - \right. \\ & \left. - 12 \frac{a_{jlk} a_N + b_{jlk} b_N}{\sqrt{a_N^2 + b_N^2}} (\bar{t}-t_0) (T-t) + \right. \end{aligned}$$

$$+12(a_i x_0 + b_i y_0 + c_i)(T-t)],$$

$$i, j, l, k \in N, i \neq j \neq k \neq l, \bar{t} \in [t_0, T], t \in [\bar{t}, T].$$

В случае кооперативной дифференциальной игры характеристическая функция зависит от времени, поэтому решение кооперативной дифференциальной игры изменяется в каждый момент времени. В связи с этим естественным является вопрос о динамической устойчивости рассматриваемых принципов оптимальности [6; 9–11].

Перейдем к формальному определению принципа динамической устойчивости в игре $\Gamma_v(z_0, T - t_0)$.

Пусть $\bar{z}(\cdot)$ – условно-оптимальная траектория в игре $\Gamma_v(z_0, T - t_0)$, $\Gamma_v(\bar{z}(t), T - t_0)$, $t_0 \leq t \leq T$ – текущие игры с решениями $W_v(\bar{z}(t), T - t) \subset E_v(\bar{z}(t), T - t)$, где

$$E_v(\bar{z}(t), T - t) = \{\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) \in R^n \mid \xi_i \geq v(\{i\}, \bar{z}(t), T - t), i \in N, \sum_{i \in N} \xi_i = v(N, \bar{z}(t), T - t)\}.$$

Предположим, что $W_v(\bar{z}(t), T - t) \neq \emptyset$ для всех $t_0 \leq t \leq T$.

Определение 1 [6; 7; 11]

Дележ $\xi \in W_v(z_0, T - t_0)$ будем называть устойчивым в игре $\Gamma_v(z_0, T - t_0)$, если существует интегрируемая на $[t_0, T]$ вектор-функция $\beta(t)$ и такая дифференцируемая на $[t_0, T]$ вектор-функция $\zeta(t)$, что дележ ξ представим в виде:

$$\xi = \xi(t), \quad \xi_i(t) = \int_{t_0}^t \beta_i(\tau) h_i(\bar{z}(\tau)) d\tau,$$

и для всех $t \in [t_0, T]$ существует такое подмножество $W'_v(\bar{z}(t), T - t)$ множества $W_v(\bar{z}(t), T - t)$, что

$$\xi(t) + W'_v(\bar{z}(t), T - t) \subset W_v(z_0, T - t_0).$$

Определение 2

Решение $W_v(z_0, T - t_0)$ называется устойчивым, если устойчивы все входящие в него дележи. В таком случае условно-оптимальная траектория $\bar{z}(\cdot)$ называется оптимальной.

Данный способ реализации дележа зависит от выбора функции $\beta(t)$ и, следовательно, является неоднозначным. Однако он обладает важным свойством: в каждый момент времени $t \in [t_0, T]$ игроки ориентируются на один и тот же принцип оптимальности, придерживаясь выбранного оптимального управления и поэтому не имеют оснований для нарушения ранее принятого соглашения.

В качестве решения $W_v(z_0, T - t_0)$ рассмотрим S -ядро игры $\Gamma_v(z_0, T - t_0)$, которое обозначим через $C_v(z_0, T - t_0)$. Как было показано выше, $C_v(\bar{z}(t), T - t) \neq \emptyset$, $t_0 \leq t \leq T$, где $\bar{z}(\cdot)$ – условно оптимальная траектория. Введем необходимое условие динамической устойчивости S -ядра $C_v(z_0, T - t_0)$ в кооперативной дифференциальной игре с интегральными выигрышами.

Теорема 2

Для того чтобы S -ядро $C_v(z_0, T - t_0)$ кооперативной дифференциальной игры $\Gamma_v(z_0, T - t_0)$ с интегральными выигрышами было динамически устойчивым, необходимо, чтобы для каждого дележа $\xi \in C_v(z_0, T - t_0)$ имело место представление

$$\xi = \int_{t_0}^T \beta(\tau) h(\bar{z}(\tau)) d\tau,$$

где вектор-функция $\beta(t)$ в каждый момент $t \in [t_0, T]$ удовлетворяет условиям:

$$\begin{aligned} 1) \quad & v(S; z_0, T - t_0) + v(N \setminus S; \bar{z}(t), T - t) - \\ & - v(N; \bar{z}(t), T - t) \leq \sum_{i \in S} \int_{t_0}^T \beta_i(\tau) h_i(\bar{z}(\tau)) d\tau \leq \\ & \leq v(N; z_0, T - t_0) + v(N \setminus S; z_0, T - t_0) - \\ & - v(S; \bar{z}(t), T - t) \quad \text{при всех } S \subset N; \end{aligned}$$

$$2) \sum_{i \in N} \int_{t_0}^t \beta_i(\tau) h_i(\bar{z}(\tau)) d\tau = \sum_{i \in N} \int_{t_0}^t h_i(\bar{z}(\tau)) d\tau.$$

Доказательство теоремы аналогично доказательству из работ Л. А. Петросяна, Н. Н. Данилова и Д. В. Кузютина [9; 12].

Исследуем теперь динамическую устойчивость вектора Шепли.

Теорема 3

В рассматриваемой игре вектор Шепли динамически устойчив.

Доказательство

Взяв $\beta_i(\tau)$ равным

$$\begin{aligned} & \frac{1}{6}(\bar{t}-\tau) \left((-3\sqrt{a_i^2+b_i^2} + \sqrt{a_j^2+b_j^2} + \right. \\ & \quad \left. + \sqrt{a_i^2+b_i^2} + \sqrt{a_k^2+b_k^2} + \sqrt{a_{ijl}^2+b_{ijl}^2} + \right. \\ & \quad \left. + \sqrt{a_{ijk}^2+b_{ijk}^2} + \sqrt{a_{ilk}^2+b_{ilk}^2} - 3\sqrt{a_{jlk}^2+b_{jlk}^2} \right) + \\ & \quad \left. + \sqrt{a_N^2+b_N^2} (t_0-\tau) + \frac{a_{jlk}a_N+b_{jlk}b_N}{\sqrt{a_N^2+b_N^2}} (\bar{t}-t_0) - \right. \\ & \quad \left. - 3\frac{a_i a_N + b_i b_N}{\sqrt{a_N^2+b_N^2}} (\bar{t}-t_0) - a_i x_0 - b_i y_0 - c_i \right) / \\ & \quad / \left(4(a_i a_N + b_i b_N) / \sqrt{a_N^2+b_N^2} \right) + h_i(z_0), \end{aligned}$$

получим, что

$$\Phi_i(T-t_0, z_0) = \int_{t_0}^T \beta_i(\tau) h_i(\bar{z}(\tau)) d\tau.$$

Теорема доказана

Обсуждение и заключение

В работе в явном виде найдены оптимальные стратегии и траектории движения игроков. В качестве принципов оптимальности рассмотрены С-ядро и вектор Шепли. Выбранные принципы оптимальности оказались динамически устойчивыми, и, следовательно, у игроков нет оснований для завершения игры. Исследованная задача показала реализуемость идеи устойчивости рассматриваемых принципов оптимальности.

Попытки применить динамически неустойчивые принципы оптимальности при решении практических задач приводят, как правило, к грубым ошибкам, в результате которых «оптимальные» решения оказываются нереализованными. Именно динамическая неустойчивость была причиной невыполнения многих долгосрочных проектов и нарушения многосторонних договоренностей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Петросян Л. А., Ширяев В. Д. Групповое преследование одним преследователем нескольких преследуемых // Вестник Ленинградского университета. Сер. 1: Математика, механика и астрономия. 1980. № 13. С. 50–57.
2. Ширяев В. Д. О задачах простого преследования с четырьмя участниками // Математическое моделирование сложных систем. СПб., 1999. С. 52–53.
3. Петросян Л. А., Рихсиев Б. Б. Преследование на плоскости. М.: Наука, 1991. 96 с.
4. Абрамянц Т. Г., Маслов Е. П., Рубинович Е. Я. Простейшая дифференциальная игра поочередного преследования // Автоматика и телемеханика. 1980. № 8. С. 5–15. URL: <http://www.mathnet.ru/links/18b651a96ec80bd34126bef353968bc9/at7146.pdf>
5. Шевченко И. И. О поочередном преследовании // Автоматика и телемеханика. 1981. № 11. С. 54–59. URL: <http://www.mathnet.ru/links/56042ca7de6dcc2aca19b4094cf18822/at6041.pdf>
6. Петросян Л. А. Устойчивость решений дифференциальных игр со многими участниками // Вестник Ленинградского университета. Сер. 1: Математика. Механика. Астрономия. 1977. № 4. С. 46–52.
7. Ширяев В. Д., Бикмурзина Р. Р. Динамическая устойчивость решения в простой дифференциальной игре четырех лиц // Научные труды SWorld. 2015. Т. 7, вып. 2 (39). С. 60–64. URL: <http://www.sworld.com.ua/konfer39/97.pdf>

8. **Petrosjan L. A.** Strongly time consistent optimality principles in the games with discount payoffs // *Lecture Notes in Control and Information Sciences*. 1994. No. 197. P. 513–520.
9. **Петросян Л. А., Данилов Н. Н.** Устойчивость решений в неантагонистических дифференциальных играх с трансферабельными выигрышами // *Вестник Ленинградского университета*. Сер. 1 : Математика. Механика. Астрономия. 1979. № 1. С. 52–59.
10. **Петросян Л. А.** Построение сильно динамически устойчивых решений в кооперативных дифференциальных играх // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. Сер. 1: Математика, механика и астрономия. 1992. № 4. С. 33–38.
11. **Петросян Л. А.** Сильно динамически устойчивые дифференциальные принципы оптимальности // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. Сер. 1: Математика, механика, астрономия. 1993. № 4. С. 40–46.
12. **Петросян Л. А., Кузюгин Д. В.** Устойчивые решения позиционных игр. СПб. : Изд-во СПбГУ, 2008. 326 с.
13. **Yeung D. W. K., Petrosyan L. A.** Subgame consistent cooperative solutions in stochastic differential games // *Journal of Optimization Theory and Applications*. 2004. Vol. 120, Issue 3. P. 651–666. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:JOTA.0000025714.04164.e4>
14. **Kreps D. M., Ramey G.** Structural consistency, consistency, and sequential rationality // *Econometrica*. 1987. Vol. 55, Issue 6. P. 1331–1348. DOI: <https://doi.org/10.2307/1913559>
15. **Peleg B., Tijs S.** The consistency principle for games in strategic form // *International Journal of Game Theory*. 1996. Vol. 25, Issue 1. P. 13–34. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01254381>
16. **Kydland F. E., Prescott E. C.** Rules rather than discretion: the inconsistency of optimal plans // *The Journal of Political Economy*. 1977. Vol. 85, no. 3. P. 473–492. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.603.6853&rep=rep1&type=pdf>
17. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин [и др.]. 2-е изд. М. : Наука, 1969. 384 с.

Поступила 09.05.2018; принята к публикации 01.10.2018; опубликована онлайн 28.03.2019

Об авторах:

Ширяев Виктор Дмитриевич, профессор, кафедра фундаментальной информатики, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68/1), кандидат физико-математических наук, доцент, ResearcherID: B-8540-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0497-3769>, shiryayevvd@mail.ru

Шагилова Елена Викторовна, доцент, кафедра фундаментальной информатики, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68/1) кандидат педагогических наук, доцент, ResearcherID: B-8524-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0267-6082>, shagilova_elena@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. Д. Ширяев – постановка задачи, научное руководство, подготовка начального варианта текста; Е. В. Шагилова – первичный анализ литературных данных, доработка и верстка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Petrosyan L.A., Shiryayev V.D. [Group pursuit with one pursuer and pursued more]. *Vestnik Leningradskogo universiteta. Ser. 1: Matematika, mekhanika i astronomiya* = *Leningrad University Bulletin. Series 1: Mathematics, Mechanics and Astronomy*. 1980; 13:50-57. (In Russ.)
2. Shiryayev V.D. [On tasks of simple pursuit with four participants]. In: *Mathematical Modeling of Complex Systems*. St. Petersburg; 1999; 52-53. (In Russ.)
3. Petrosyan L.A., Rikhsiyev B.B. [Pursuit on the plane]. Moscow: Nauka Publ., 1991. (In Russ.)

Computer science, computer engineering and management

4. Abramyan T.G., Maslov Ye.P., Rubinovich Ye.Ya. A simplest differential game of alternate pursuit. *Avtomatika i telemekhanika* = Automation and Remote Control. 1980; 8:5-15. Available at: <http://www.mathnet.ru/links/18b651a96ec80bd34126bef353968bc9/at7146.pdf> (In Russ.)
5. Shevchenko I.I. On successive pursuit. *Avtomatika i telemekhanika* = Automation and Remote Control. 1981; 11:54-59. Available at: <http://www.mathnet.ru/links/56042ca7de6dcc2aca19b4094cf18822/at6041.pdf> (In Russ.)
6. Petrosyan L.A. [Stability of solutions in differential games with many participants]. *Vestnik Leningradskogo universiteta. Ser. 1: Matematika, mekhanika i astronomiya* = Leningrad University Bulletin. Series 1: Mathematics, Mechanics and Astronomy. 1977; 4:46-52. (In Russ.)
7. Shiryayev V.D., Bikmurzina R.R. Dynamic stability of solution in a simple differential game for four individuals. *Nauchnyye trudy SWorld* = SWorld Scientific Papers. 2015; 7(2):60-64. Available at: <http://www.sworld.com.ua/konfer39/97.pdf> (In Russ.)
8. Petrosyan L.A. Strongly time consistent optimality principles in the games with discount payoffs. *Lecture Notes in Control and Information Sciences*. 1994; 197:513-520.
9. Petrosyan L.A., Danilov N.N. [The stability of the solutions in nonantagonistic differential games with transferable wins]. *Vestnik Leningradskogo universiteta. Ser. 1: Matematika, mekhanika i astronomiya* = Leningrad University Bulletin. Series 1: Mathematics, Mechanics and Astronomy. 1979; 1:52-59. (In Russ.)
10. Petrosyan L.A. [Construction of strongly dynamically stable solutions in cooperative differential games]. *Vestnik Leningradskogo universiteta. Ser. 1: Matematika, mekhanika i astronomiya* = Leningrad University Bulletin. Series 1: Mathematics, Mechanics and Astronomy. 1992; 4:33-38. (In Russ.)
11. Petrosyan L.A. [Strongly dynamically stable differential optimality principles]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ser. 1: Matematika, mekhanika i astronomiya* = St. Petersburg University Bulletin. Series 1: Mathematics, Mechanics and Astronomy. 1993; 4:40-46. (In Russ.)
12. Petrosyan L.A., Kuzutin D.V. [Stable solutions of positional games]. St. Petersburg University Publ.; 2008. (In Russ.)
13. Yeung D.W.K., Petrosyan L.A. Subgame consistent cooperative solutions in stochastic differential games. *Journal of Optimization Theory and Applications*. 2004; 120(3):651-666. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:JOTA.0000025714.04164.e4>
14. Kreps D.M., Ramey G. Structural consistency, consistency and sequential rationality. *Econometrica*. 1987; 55(6):1331-1348. Available at: <https://ideas.repec.org/a/ect/emetrp/v55y1987i6p1331-48.html>
15. Peleg B., Tijs S. The consistency principle for games in strategic form. *International Journal of Game Theory*. 1996; 25(1):13-34. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01254381>
16. Kydland F.E., Prescott E.C. Rules rather than decisions: the inconsistency of optimal plan. *The Journal of Political Economy*. 1977; 85(3):473-492. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.603.6853&rep=rep1&type=pdf>
17. Pontryagin L.S., Boltyanskii V.T., Gamkrelidze R.D., Mishchenko E.M. [Mathematical theory of optimum processes]. 2nd ed. Moscow: Nauka Publ., 1969. (In Russ.)

Received 09.05.2018; revised 01.10.2018; published online 28.03.2019

About authors:

Viktor D. Shiryayev, Professor, Chair of Fundamental Informatics, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, ResearcherID: B-8540-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0497-3769>, shiryayevvd@mail.ru

Elena V. Shagilova, Associate Professor, Chair of Fundamental Informatics, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Pedagogy), Associate Professor, ResearcherID: B-8524-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0267-6082>, shagilova_elena@mail.ru

Contribution of the authors:

V. D. Shiryayev – formulation of the task, scientific advising, writing the draft, revision of the final text; E. V. Shagilova – reviewing the relevant literature, word processing, editing the text.

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



Математические модели и программные средства оценки напряженно-деформированного состояния литосферы Земли

А. О. Фаддеев, С. А. Павлова*, Т. М. Невдах
ФКОУ ВО «Академия права и управления Федеральной службы исполнения наказаний» (г. Рязань, Россия)
**pavlovhome23@rambler.ru*

Введение. Под геотектоническими процессами в рамках данной статьи понимаются процессы, связанные с деформациями, возникающими при движении отдельных слоев и блоков литосферы на различных глубинах, в том числе и на поверхности Земли. Задача заключается в необходимости реконструкции полей геодинамических напряжений, являющихся причиной возникновения современных движений и деформаций в литосфере. В статье рассматриваются математическая модель и программные средства оценки напряженно-деформированного состояния литосферы Земли.

Материалы и методы. При математическом моделировании напряжений в представленном исследовании использовались данные аномального гравитационного поля в изостатической редукции. При построении математической модели оценки напряженно-деформированного состояния литосферы Земли использовались методы механики сплошных сред и методы теории дифференциальных уравнений. При обработке входных, промежуточных и выходных данных применялись численный метод спектрального анализа на основе дискретного преобразования Фурье, методы построения сеточных функций и метод спектрально-временного анализа данных. При построении математической модели напряженно-деформированного состояния литосферы в глобальном масштабе контроль правильности расчета напряжений осуществлялся согласно данным о скоростях движений на поверхности земной коры, известным по результатам спутниковых измерений, которые применяются для навигации и точного измерения геодезических координат различных объектов. Данные о скоростях горизонтальных и вертикальных движений на поверхности земной коры были подвергнуты обработке с целью получения распределения значений скоростей этих движений по равномерной сетке как в долготном, так и в широтном направлениях. Процедура обработки выполнялась на основании метода Крайгинга. Программные продукты, реализующие математические модели, разработаны в среде программирования Borland Delphi 7.0. Построение карт эквипотенциального распределения сдвиговых упругих деформаций в литосфере осуществлялось с помощью программного продукта Surfer.

Результаты исследования. На основании данных об аномальном гравитационном поле в изостатической редукции и информации о распределении скоростей горизонтальных движений на поверхности земной коры строилась математическая модель напряженно-деформированного состояния литосферы Земли. С помощью полученной математической модели и комплекса программ, реализующих математическую модель, произведен расчет напряженно-деформированного состояния литосферы Земли на различных глубинных уровнях по упругой и упруго-вязким моделям. Кроме того, построены карты эквипотенциального распределения сдвиговых упруго-вязких деформаций в литосфере на глубине 10 км.

© Фаддеев А. О., Павлова С. А., Невдах Т. М., 2019



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

Обсуждение и заключение. Представленная математическая модель и комплекс программ, реализующих ее, позволяют воплотить восстановление полей как упругих, так и упруго-вязких деформаций, что является основополагающим фактором при выполнении численных оценок упруго-вязких сдвиговых напряжений на любых глубинных уровнях литосферы Земли.

Ключевые слова: математическая модель, геодинамическая устойчивость, тензор напряжений, вектор смещений, сдвиговая деформация, вязкость, литосфера, комплекс программ

Для цитирования: Фаддеев А. О., Павлова С. А., Невдах Т. М. Математические модели и программные средства оценки напряженно-деформированного состояния литосферы Земли // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 1. С. 51–66. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.051-066>

Mathematical Models and Evaluation Software for Stress-Strain State of the Earth's Lithosphere

A. O. Faddeev, S. A. Pavlova*, T. M. Nevдах

The Academy of the FPS of Russia (Ryazan, Russia)

*pavlovhome23@rambler.ru

Introduction. For the purposes of this article, geodeformation processes mean processes associated with deformations arising from the movement of species and blocks of the lithosphere at various depths, including surfaces. The objective is to reconstruct geodynamic stress fields, which cause modern shifts and deformations in the Lithosphere. A mathematical model and software for estimating the stress-strain state of the Earth Lithosphere are considered.

Materials and Methods. For mathematical modeling of stresses, isostatically reduced data on abnormal gravitation field were used. The methods of continuum mechanics and methods of the theory of differential equations were used to design a model for estimating the stress-strain state of the Earth Lithosphere. For processing input, intermediate and outgoing data, the Fourier transform method of spectral analysis for constructing grid functions and spectral-temporal method were used. To model for the stress-strain state of the Lithosphere globally, stress calculation was corrected on the basis of sputnik-derived velocity data at the surface of the earth crust. The data on the rates of horizontal and vertical movements at the surface of the Earth crust were processed to obtain a distribution of velocities in the uniform grid embracing longitudes and latitudes. The processing procedure was carried out on the basis of the Kraiging method. The software was developed in Borland Delphi 7.0 programming environment.

Results. Based on the data on the abnormal gravitation field in isostatic reduction and information on the distribution of velocities of horizontal motions on the surface of the Earth crust, a mathematical model of the stress-strain state of the Lithosphere was constructed. With the help of the obtained mathematical model and software complex, the stress-strain state of the Lithosphere was calculated at various depth using elastic and elastic-viscous models, and maps of equipotential distribution of shear elastic-viscous deformations in the lithosphere at the depth of 10 km were constructed.

Discussion and Conclusion. The presented mathematical model and software allow restoring fields of both elastic and elastic-viscous deformations that is fundamental for quantification of elastic-viscous shear stresses deep in the Earth Lithosphere.

Keywords: mathematical model, geodynamic stability, stress tensor, displacement vector, shear deformation, viscosity; lithosphere

For citation: Faddeev A.O., Pavlova S.A., Nevдах T.M. Mathematical Models and Evaluation Software for Stress-Strain State of the Earth's Lithosphere. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(1):51-66. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.051-066>

Введение

Современные геотектонические процессы, связанные с деформациями, возникающими при движениях отдельных слоев и блоков литосферы на различных глубинах, в том числе и на дневной поверхности литосферы, согласно документально подтвержденным фактическим данным, представляют собой фактор риска возникновения чрезвычайных ситуаций геодинамического характера. Для изучения причин таких движений и деформаций необходимы исследования пространственно-временной динамики современных литосферных геотектонических процессов.

Преимущество метода математического моделирования перед другими методами исследования геотектонических процессов является значительным [1–2], особенно если этот метод применяется в рамках комплексного подхода при оценке риска чрезвычайных ситуаций геодинамического характера [1]. Важную роль играют экономическая эффективность, оперативность и быстроокупаемость этого метода. Кроме того, метод математического моделирования позволяет достаточно легко менять объект исследования.

Все действия по обработке и интерпретации исходной информации, получению и анализу результатов исследований, а также по оценке развития геодинамической ситуации выполняются с помощью средств компьютерной техники, что и обеспечивает высокоэффективное и быстрое решение поставленных задач.

Существующие математические модели и методы восстановления полей геодинамических напряжений и смещений, технологии выявления потенциально опасных в сейсмическом отношении территорий разработаны для ряда различных регионов и разнообразных по своему назначению объектов.

Задачи же по глобальному моделированию современных литосферных геотектонических процессов, их про-

странственно-временной динамике еще полностью не решены, что требует разработки соответствующих математических моделей и методов.

В связи с этим данная статья посвящена построению глобальной математической модели при оценках напряженно-деформированного состояния литосферы Земли.

Полученные результаты могут быть использованы для создания оценочно-прогностических карт эквипотенциального распределения сдвиговых упруговязких деформаций в литосфере.

Вертикальные и горизонтальные движения отдельных слоев и блоков земной коры характеризуются следующим набором параметров:

- 1) вертикальные и горизонтальные смещения в геологической среде;
- 2) скорости вертикальных и горизонтальных движений в геологической среде;
- 3) напряжения и деформации в геологической среде, возникающие вследствие осуществления вертикальных и горизонтальных движений;
- 4) относительная плотность потенциальной энергии деформируемых пород геологической среды;
- 5) плотность геологической среды;
- 6) упругие модули геологической среды;
- 7) вязкость геологической среды;
- 8) ускорение свободного падения.

Поскольку в сферу наших интересов попадают именно литосферные геотектонические процессы, т. е. процессы, формирующиеся и протекающие в литосфере, то мантийные воздействия учитываются опосредованно, на основании учета влияния изостатических аномалий гравитационного поля. Именно поэтому за нижнюю границу модели литосферы принят глубинный уровень в 80 км, т. е. толщина представленной модели может составлять 80 км.

Обзор литературы

При изучении зарубежной литературы по данной тематике было выявлено

но, что оценка рисков в сложных распределенных природно-технических системах не осуществляется посредством математического моделирования, а реализуется с помощью приборных исследований, основанных на системах глобального позиционирования GPS. Таким образом, в зарубежных литературных источниках отсутствуют аналоги описанным в данной статье методам.

Приведем обзор существующих на сегодняшний день математических моделей и комплексов программ по оценке напряженно-деформированного состояния поверхности Земли.

По видовому признаку математические модели исследования литосферных геодинамических процессов подразделяются на детерминированные, вероятностные модели, и модели, использующие в своей основе методы теории нечетких множеств.

Детерминированные модели по своему пространственному разрешению бывают либо двумерные, либо трехмерные. Двумерные модели позволяют решать ограниченный круг практических задач, обычно связанных с оценкой геодинамического риска вдоль какого-либо профильного направления, т. е. в вертикальных разрезах земной коры. В настоящее время подобные модели практически не используются, и основное внимание в оценках геодинамического риска уделяется трехмерным моделям. Они более эффективны, поскольку позволяют охватывать уже не отдельные слои, а целые блоки земной коры. Трехмерные модели, как правило, содержат граничные условия следующего вида [3; 4]:

$$\begin{cases} \rho g u_z(x, y, h) - \sigma_z(x, y, h) = 0, \\ \sigma_z(x, y, 0) + (\rho_0 - \rho) g u_z(x, y, 0) = \rho h_{\max} P(x, y), \\ \tau_{xz}(x, y, h) = 0, \\ \tau_{xz}(x, y, 0) = 0, \end{cases}$$

где τ_{xz} – касательные напряжения в плоскости XZ ; σ_z – вертикальная составляющая нормальных напряжений; u_z –

вертикальная составляющая полного вектора смещений в геологической среде; $P(x, y)$ – величина распределенной нагрузки в точке с координатами (x, y) ; ρ – средняя плотность вещества геологической среды; ρ_0 – средняя плотность вещества ниже условной модельной границы приложения внешней распределенной нагрузки; g – ускорение силы тяжести; h_{\max} – наибольшая величина отклонения модельной нижней границы от нулевого уровня; h – средняя толщина рассматриваемого модельного упругого пространства.

Аналитические выражения для компонент тензора напряжений и составляющих вектора смещений в геологической среде в обобщенном виде в таких моделях обычно записываются в следующем виде [3; 4]:

$$\begin{aligned} \sigma_\alpha(x, y, z) &= \frac{1}{4} \sigma_\alpha^{(00)} + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^s \sigma_\alpha^{(m0)} + \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{n=1}^l \sigma_\alpha^{(0n)} + \sum_{m=1}^s \sum_{n=1}^l \sigma_\alpha^{(mn)}, \\ u_\beta(x, y, z) &= \frac{1}{4} u_\beta^{(00)} + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^s u_\beta^{(m0)} + \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{n=1}^l u_\beta^{(0n)} + \sum_{m=1}^s \sum_{n=1}^l u_\beta^{(mn)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\alpha \in \{x, y, z, xy, xz, yz\}$, $\beta \in \{x, y, z\}$.

Трехмерные модели с граничными условиями (1) используются исключительно при оценках сейсмического риска для территорий регионального масштаба, т. е. для достаточно обширных районов земного шара.

Для количественной оценки сейсмической опасности на региональном масштабном уровне существует компьютерная программа GeoTens [4; 5].

Компьютерная программа GeoVector позволяет численно реализовать вертикально-горизонтальную математическую модель оценки геодинамической устойчивости среды распределенной природно-технической системы [4; 5].

В программе GeoVector имеется возможность учета сброса напряжений (рассеяния сейсмодетонационной энергии) посредством задания условия в окне «Сброс напряжений».

Основополагающим принципом при построении вероятностных моделей является предположение о том, что последовательность геодинамических состояний геологической среды исследуемой территории представляет собой поток однородных событий, удовлетворяющий также условиям независимости, однородности и ординарности, т. е. представляет собой так называемый простейший поток [4].

Недостаток вероятностных моделей заключается в том, что их использование, как и использование детерминированных моделей, на неоднородных в геологическом и тектоническом отношении территориях не всегда позволяет адекватно выполнить оценки геодинамического риска. Это относится и к территориям, где имеется существенная неопределенность в отношении информации о физико-механических характеристиках геологической среды и (или) распределенных геофизических полей-источниках геодинамических аномалий. Все это послужило веским основанием в пользу того, что были предприняты весьма удачные попытки разработки моделей, основанных на теории нечетких множеств [3; 6].

Как известно, при использовании этой теории в практических целях особенно важно грамотно сформировать базу правил системы нечеткого вывода, выбрать входные и выходные лингвистические переменные [7–10]. Поэтому в работах, посвященных построению моделей, основанных на теории нечетких множеств, в качестве входных переменных используются характеристики геологической среды, полученные как на основании анализа макросейсмических и других геофизических данных, так и информация о напряжениях, смещениях и деформациях, рассчитанных в результате применения детерминиро-

ванных и вероятностных математических моделей. После этого формируется набор выходных переменных, который затем подвергается процедуре фазификации [6].

В ряде других работ представлены модели нечеткой оценки состояния геологической среды, основанные на прямом нечетком выводе и алгоритме Мамдани, а также модели, использующие алгоритм Сугено [2].

Модели, сконструированные на основе алгоритма Мамдани, позволяют на основе анализа топографического рельефа местности и экспертных оценок физических характеристик геологической среды заблаговременно до начала проведения строительных работ выполнить превентивные оценки геодинамической устойчивости геологической среды в виде значений геодинамического риска, что дает возможность произвести предварительную оценку проекта планировочных решений по застройке той или иной территории.

Алгоритм Сугено авторы работ предлагают использовать при построении модели нечеткой оценки состояния геологической среды при наличии воздействия на эту среду статической нагрузки от будущих зданий и сооружений.

Для реализации одной из моделей нечеткой оценки опасных геодинамических процессов можно воспользоваться компьютерной программой GeoFuzzyCalc, которая дает возможность повышения эффективности оценки геодинамического риска на платформенных территориях в условиях неопределенности и неоднозначности информации о состоянии геологической среды этих территорий на основе использования нечеткой модели, построенной на базе прямого нечеткого вывода [2].

Описанные программные продукты разработаны в среде программирования Borland Delphi 7.0.

К настоящему моменту времени разработан достаточно разнообразный и широкий спектр математических мо-

делей, алгоритмов и соответствующих им программных средств, позволяющих оценивать многие опасные геодинамические процессы. Однако описанные выше модели не позволяют «отследить» динамику изучаемых геодинамических процессов. Поэтому одна из главных задач данного исследования состоит в том, чтобы разработать новые математические модели, позволяющие построить такую количественную модель литосферы, учитывающую комплекс взаимосвязей между отдельными геологическими структурами, которая давала бы в будущем возможность контролировать в режиме реального времени динамику литосферных геодинамических процессов.

Материалы и методы

Основным фактором, влияющим на формирование и развитие геодинамических неустойчивостей (т. е. землетрясений), как показывают результаты исследований [11–16], является гравитационное поле планеты. При математическом моделировании напряжений в статье используются данные аномального гравитационного поля в изостатической редукции.

Если подходить к вопросу о построении математической модели напряженно-деформированного состояния литосферы в глобальном масштабе с теоретических позиций, то в первую очередь

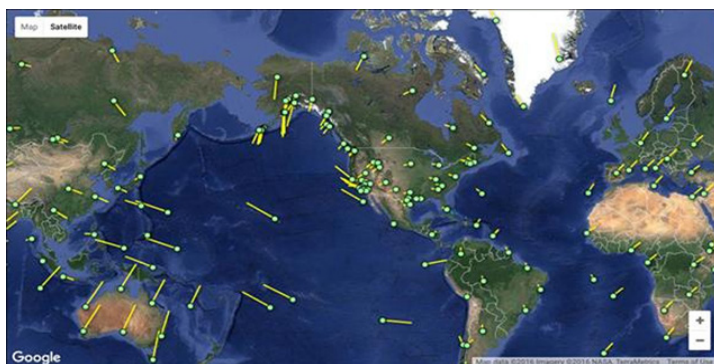
необходим контроль правильности расчета напряжений каким-либо параметром, значения которого в глобальном масштабе известны по данным наблюдений.

В качестве такого параметра авторы предлагают использовать данные о скоростях движений на поверхности земной коры (рис. 1).

Представленная на рис. 1 карта является авторской разработкой ученых Калифорнийского Технологического института, созданной по данным измерений, выполненных группировкой из 30 спутников, входящих в глобальную систему позиционирования¹. Эти данные успешно применяются для навигации и точного измерения геодезических координат различных объектов.

Полученные данные о скоростях горизонтальных и вертикальных движений на поверхности земной коры были подвергнуты обработке с целью получения распределения значений скоростей этих движений по равномерной сетке как в долготном, так и в широтном направлениях. Процедура обработки выполнялась на основании метода интерполяции Крайгинга.

На основании метода Крайгинга, реализованного в программном комплексе Surfer 10.0, построено поле распределения векторов скоростей горизонтальных и вертикальных движений на поверхности земной коры.



Р и с. 1. Карта скоростей горизонтальных движений на поверхности земной коры (мм/год)

F i g. 1. The map of velocities of horizontal movements on the crustal surface (in mm/year)

¹ GPS Time Series. URL: <https://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html>

Рассмотрим теперь математическую модель напряженно-деформированного состояния литосферы Земли, построенную на основании данных об аномальном гравитационном поле в изостатической редукции и информации о распределении скоростей горизонтальных движений на поверхности земной коры. В математической модели величины гравитационных аномалий измеряются в мГал (миллигалах), скорости движений из мм/год пересчитаны в м/год.

Математически модель напряженно-деформированного состояния литосферы Земли представляет собой следующие системы уравнений:

$$1) \begin{cases} \sigma_z(x, y, 0) = \rho_H(x, y) \Delta g_u(x, y) \chi H(x, y), \\ u_z(x, y, h) = v_z(x, y, h) t, \\ u_x(x, y, h) = v_x(x, y, h) t, \\ \tau_{xz}(x, y, h) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

$$2) \begin{cases} \sigma_z(x, y, 0) = \rho_H(x, y) \Delta g_u(x, y) \chi H(x, y), \\ u_z(x, y, h) = v_z(x, y, h) t, \\ u_y(x, y, h) = v_y(x, y, h) t, \\ \tau_{yz}(x, y, h) = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где $\sigma_z(x, y, 0)$ – вертикальная компонента нормальных напряжений на границе «литосфера – литосферная мантия»; $u_z(x, y, h)$ – вертикальная составляющая вектора смещений на поверхности земной коры; $u_x(x, y, h)$ – х-компонента горизонтальной составляющей вектора смещений на поверхности земной коры; $u_y(x, y, h)$ – у-компонента горизонтальной составляющей вектора смещений на поверхности земной коры; $\tau_{yz}(x, y, h)$ – компонента сдвиговых напряжений в плоскости XZ на поверхности земной коры; $\tau_{xz}(x, y, h)$ – компонента сдвиговых напряжений в плоскости YZ на поверхности земной коры; $\Delta g_u(x, y)$ – величина аномалии гравитационного поля в изостатической редукции в точке с координатами (x, y) ; $H(x, y)$ – толщина литосферы в точке с координатами (x, y) ; χ – безразмерный коэффициент, равный 10^6 ; h – тол-

щина модельного слоя геологической среды (литосферы); t – временной интервал (1 год); $\rho_H(x, y)$ – плотность геологической среды в точке с координатами (x, y) , вычисляемая по соотно-

$$\text{шению } \rho_H(x, y) = \int_0^H \rho(x, y, z) dz.$$

Для расчета компонент тензора напряжений и составляющих вектора смещений в литосфере достаточно воспользоваться одним из соотношений, поскольку выражения для компонент сдвиговых напряжений и компонент горизонтальной составляющей вектора смещений формально будут одинаковыми, различаясь только координатами x и y . Будем строить выражения для компонент тензора напряжений и составляющих вектора смещений, основываясь на системе уравнений (1) и следующих соотношениях (для k -ой гармоники), общепринятых в литературе, посвященной оценке геодинамического риска [5; 6; 15]:

$$\begin{cases} \sigma_z(x, y, z) = k^2 \left\{ \left[\frac{\mu}{\lambda + \mu} C - k(B + Dz) \right] shkz + \right. \\ \left. + \left[\frac{\mu}{\lambda + \mu} D - k(A + Cz) \right] chkz \right\} \cos k_x x \cos k_y y, \\ u_z(x, y, z) = \frac{k}{2\mu} \left\{ \left[\frac{2\mu}{\lambda + \mu} D - k(A + Cz) \right] shkz + \right. \\ \left. + \left[\frac{2\mu}{\lambda + \mu} C - k(B + Dz) \right] chkz \right\} \cos k_x x \cos k_y y, \\ u_x(x, y, z) = \frac{k_x}{2\mu} \{ [k(B + Dz) + C] shkz + \\ + [k(A + Cz) + D] chkz \} \sin k_x x \cos k_y y, \\ \tau_{xz}(x, y, z) = k k_x \left\{ \left[k(A + Cz) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} D \right] shkz + \right. \\ \left. + \left[k(B + Dz) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} C \right] chkz \right\} \sin k_x x \cos k_y y, \end{cases} \quad (5)$$

где A, B, C, D – неизвестные коэффициенты, определяемые из условий математической модели (3).

Подставляя уравнения (5) в соответствующие соотношения системы (3) и выполнив необходимые преобразования, получим следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} k^2 \left(\frac{\mu}{\lambda + \mu} D - kA \right) &= \rho_H(x, y) \Delta g_u(x, y) \chi H(x, y), \\ \frac{k}{2\mu} \left\{ \left[\frac{2\mu}{\lambda + \mu} D - k(A + Ch) \right] shkh + \right. & \\ \left. + \left[\frac{2\mu}{\lambda + \mu} C - k(B + Dh) \right] chkh \right\} &= v_z(x, y, h)t, \\ \frac{k_x}{2\mu} \{ [k(B + Dh) + C] shkh + & \\ + [k(A + Ch) + D] chkh \} &= v_x(x, y, h)t, \\ \left[k(A + Ch) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} D \right] shkh + & \\ + \left[k(B + Dh) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} C \right] chkh &= 0. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Выражая из первого уравнения системы (6) неизвестный коэффициент A , получим:

$$\left\{ \begin{aligned} A &= \frac{\mu}{k(\lambda + \mu)} D - \frac{\rho_H(x, y) \Delta g_u(x, y) \chi H(x, y)}{k^3}, \\ \left[\frac{2\mu}{\lambda + \mu} D - kA - Ckh \right] shkh + & \\ + \left[\frac{2\mu}{\lambda + \mu} C - kB - Dkh \right] chkh &= \frac{2\mu v_z(x, y, h)t}{k}, \\ (kB + Dkh + C) shkh + (kA + Ckh + D) chkh &= \\ = \frac{2\mu v_x(x, y, h)t}{k_x}, & \\ \left(kA + Ckh + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} D \right) shkh + & \\ + \left(kB + Dkh + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} C \right) chkh &= 0. \end{aligned} \right. \quad (7)$$

Подставляя выражение для коэффициента A в остальные уравнения системы (7) и вводя для

удобства расчетов обозначение $P_g(x, y) = \rho_H(x, y) \Delta g_u(x, y) \chi H(x, y)$, получим следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{\mu}{\lambda + \mu} D + \frac{P_g(x, y)}{k^2} - Ckh \right) shkh + & \\ + \left(\frac{2\mu}{\lambda + \mu} C - kB - Dkh \right) chkh &= \frac{2\mu v_z(x, y, h)t}{k}, \\ (kB + Dkh + C) shkh + & \\ + \left[D \left(\frac{\mu}{\lambda + \mu} + 1 \right) - \frac{P_g(x, y)}{k^2} + Ckh \right] chkh &= \\ = \frac{2\mu v_x(x, y, h)t}{k_x}, & \\ \left(D - \frac{P_g(x, y)}{k^2} + Ckh \right) shkh + & \\ + \left(kB + Dkh + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} C \right) chkh &= 0. \end{aligned} \right. \quad (8)$$

Выразим из третьего уравнения системы (8) коэффициент B , а именно:

$$B = \frac{P_g(x, y)}{k^3} th(kh) - [kh + th(kh)] D - \left(\frac{\lambda}{\lambda + \mu} + khth(kh) \right) C. \quad (9)$$

Подставив выражение для коэффициента B в первое и второе уравнения системы (9) и выполнив необходимые преобразования, получим систему, состоящую из двух уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} C + Dth(kh) &= \frac{2\mu(\lambda + \mu)v_z(x, y, h)}{k(\lambda + 2\mu)}, \\ \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} ch(kh) - th(kh) \cdot sh(kh) \right) D + & \\ + (kh \cdot ch(kh) + \frac{\mu}{\lambda + \mu} sh(kh) - & \\ - kh \cdot th(kh) \cdot sh(kh)) (kh \cdot ch(kh) + & \\ + \frac{\mu}{\lambda + \mu} sh(kh) - kh \cdot th(kh) \cdot sh(kh)) C &= \\ = \frac{2\mu v_x(x, y, h)}{k_x} + \frac{P_g(x, y)}{k^2} \times & \\ \times [ch(kh) - th(kh) \cdot sh(kh)]. & \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Получим теперь из первого уравнения системы (10) соотношение для коэффициента C :

$$C = \frac{2\mu(\lambda + \mu)v_z(x, y, h)}{k(\lambda + 2\mu)} - D \cdot th(kh). \quad (11)$$

С учетом соотношения (11) второе уравнение системы (10) теперь будет содержать только один неизвестный коэффициент D . В таком случае приведем теперь окончательное выражение для нахождения коэффициента D :

$$\begin{aligned} D = & \left(\frac{2\mu v_x(x, y, h)}{k_x} + \right. \\ & + \frac{P_g(x, y)}{k^2} [ch(kh) - th(kh) \cdot sh(kh)] - \\ & - \frac{2\mu(\lambda + \mu)v_z(x, y, h)}{k(\lambda + 2\mu)} \Big) \times \\ & \times \left(kh \cdot ch(kh) + \frac{\mu}{\lambda + \mu} sh(kh) - \right. \\ & - (kh \cdot th(kh) \cdot sh(kh)) \Big/ \frac{\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} \times \\ & \times [ch(kh) - th(kh) \cdot sh(kh)] + \\ & + kh \cdot sh(kh) \left(\frac{sh(kh)}{ch(kh)} \cdot th(kh) - 1 \right) \Big). \quad (12) \end{aligned}$$

Таким образом, используя соотношения (9), (11), (12) и первое уравнение из системы (7), можно рассчитать компоненты $\sigma_z(x, y, z)$, $\tau_{xz}(x, y, z)$ тензора напряжений и составляющие $u_z(x, y, z)$ и $u_x(x, y, z)$ вектора смещений в литосфере, представленные в системе (3).

Приведем также выражения для $u_y(x, y, z)$ — составляющей вектора смещений и остальных компонент тензора напряжений [4; 5; 15; 16]:

$$\begin{aligned} u_y(x, y, z) = & \frac{k_y}{2\mu} \{ [k(B + Dz) + C] shkz + \\ & + [k(A + Cz) + D] chkz \} \cos k_x x \sin k_y y, \quad (13.1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_x(x, y, z) = & \left\{ kk_x^2(B + Dz) + C \left(k_x^2 + \frac{\lambda k^2}{\lambda + \mu} \right) \right\} shkz + \\ & + \left\{ kk_x^2(A + Cz) + D \left(k_x^2 + \frac{\lambda k^2}{\lambda + \mu} \right) \right\} chkz \Big\} \times \\ & \times \cos k_x x \cos k_y y, \quad (13.2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_y(x, y, z) = & \left\{ kk_y^2(B + Dz) + C \left(k_y^2 + \frac{\lambda k^2}{\lambda + \mu} \right) \right\} shkz + \\ & + \left\{ kk_y^2(A + Cz) + D \left(k_y^2 + \frac{\lambda k^2}{\lambda + \mu} \right) \right\} chkz \Big\} \times \\ & \times \cos k_x x \cos k_y y, \quad (13.3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{yz}(x, y, z) = & kk_y \left\{ \left[k(A + Cz) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} D \right] shkz + \right. \\ & + \left[k(B + Dz) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} C \right] chkz \Big\} \times \\ & \times \cos k_x x \sin k_y y, \quad (13.4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{xy}(x, y, z) = & -k_x k_y \{ [k(B + Dz) + C] shkz + \\ & + [k(A + Cz) + D] chkz \} \times \\ & \times \sin k_x x \sin k_y y. \quad (13.5) \end{aligned}$$

Используя соотношения (13.1)–(13.5) и выражения системы (5), мы можем восстановить во всем объеме литосферы поля напряжений и смещений, соответствующие упругой модели, учитывающей пространственные вариации упругих модулей, поскольку величины λ и μ входят в выражения для компонент тензора напряжений и составляющих вектора смещений.

Однако нас интересует не теоретическое пространственное распределение напряжений, смещений и деформаций в литосфере Земли, а распределение, соответствующее реальной геологической среде, состояние которой в значительной степени зависит от пространственного распределения температуры в литосфере и, как следствие, от пространственной вариативности вязкости геологической среды.

Для оценки пространственной вариативности вязкости геологической среды в зависимости от пространственного распределения температуры в литосфере Земли была использована методика определения величины вязкости, основанная на достаточно хорошо известном соотношении, связывающем вязкость, температуру, упругие модули и энергию активации² [1]:

$$\eta(z) = A_k \exp \left[\frac{U_a}{RT} \exp \left(\frac{2.5P}{\lambda + 2/3 \mu} \right) \right], \quad (14)$$

где R – газовая постоянная, равная $8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot ^\circ\text{К}}$; T – температура; P – давление; U_a – энергия активации; A_k – некоторый коэффициент пропорциональности.

Численные значения всех величин, входящих в данное соотношение, были либо определены нами ранее, либо заимствованы из работ других авторов^{3, 4} [1–4; 17].

Согласно упруго-вязкой модели Максвелла, общая деформация складывается из упругой и вязкой составляющих^{5, 6} [17; 18]:

$$\gamma = \frac{P}{E} + \frac{P}{\eta} \cdot \tau, \quad (15)$$

где γ – деформация; P – напряжение; $E = \frac{(3\lambda + 2\mu)\mu}{\lambda + \mu}$ – упругий модуль (модуль Юнга); η – вязкость; τ – время.

В таком случае можно рассчитать деформации (особенно сдвиговые), которые ответственны за формирование и реализацию опасных литосфер-

ных геотектонических процессов по упругой и упруго-вязким моделям, и затем сопоставить полученные результаты расчетов, используя для оценки достоверности данных моделей распределения эпицентров уже произошедших сейсмических событий на различных глубинных уровнях.

Результаты исследования

На основании соотношений (5), (13.1)–(13.5) и с учетом выражения (14) произведен расчет напряженно-деформированного состояния литосферы Земли на различных глубинных уровнях по упругой и упруго-вязким моделям.

Численные расчеты напряжений, смещений и деформаций в литосфере Земли были выполнены с помощью компьютерной программы GeoTens (рис. 2).

После запуска программа запрашивает имя файла изостатических аномалий, которое нужно обязательно ввести, поскольку именно в этом файле в формате системы GEOGRID размещена информация о внешней вертикальной нагрузке, действующей на среду РПТС. Также необходимо ввести глубины (в км), на которых расположены условная граница возмущений и расчетная плоскость. После ввода с клавиатуры длин (в км) долготного и широтного профилей необходимо нажать на кнопку «Прочитать». При этом происходит считывание данных из файла изостатических аномалий, и программа готова к выполнению расчетов. Расчеты производятся после нажатия на кнопку «Рассчитать».

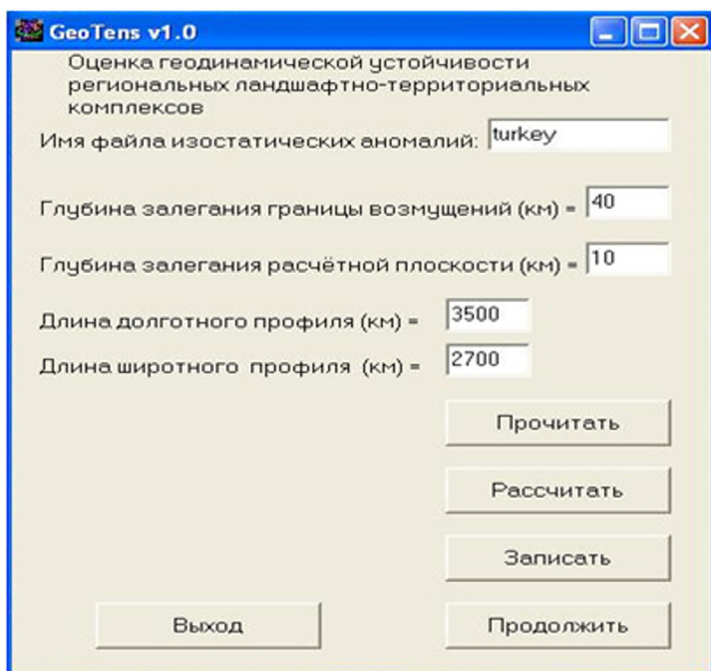
² Минаев В. А., Фаддеев А. О. Оценки геоэкологических рисков. Моделирование безопасности туристско-рекреационных территорий. М. : Финансы и статистика, изд. дом ИНФРА-М, 2009. 370 с.

³ Математическое моделирование геодинамических рисков: оценки и перспективы / В. А. Минаев [и др.] ; под ред. В. А. Минаева, А. О. Фаддеева, К. М. Бондаря. Хабаровск : ДВЮИ МВД России, 2015. 211 с.

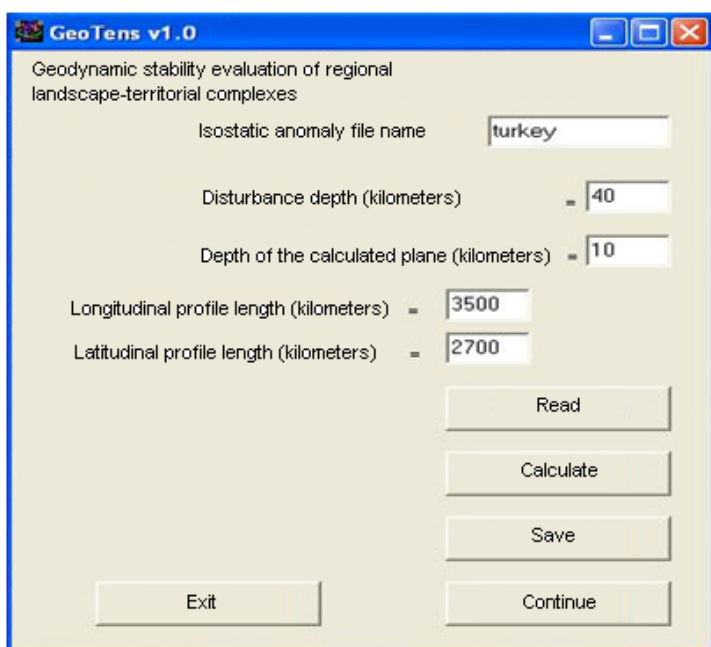
⁴ Минаев В. А., Фаддеев А. О., Кузьменко Н. А. Моделирование и оценка геодинамических рисков. М. : «РТСофт»–«Космоскоп», 2017. 256 с.

⁵ Математическое моделирование геодинамических рисков: оценки и перспективы.

⁶ Минаев В. А., Фаддеев А. О., Кузьменко Н. А. Моделирование и оценка геодинамических рисков.



Р и с. 2. Рабочее окно программы GeoTens

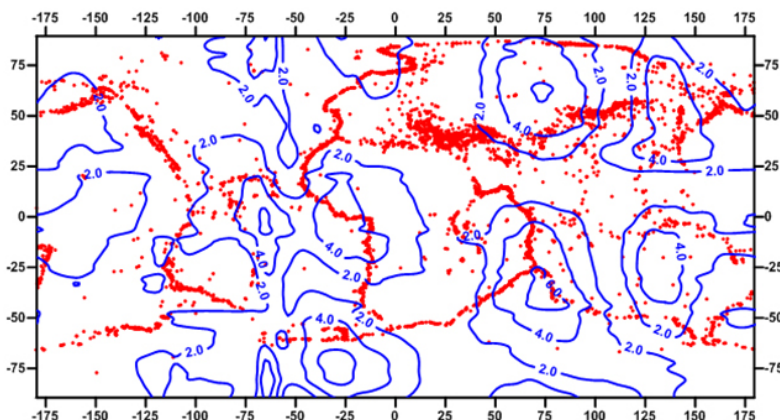


F i g. 2. Working window of the GeoTens program

После этого необходимо записать полученные результаты во внешние файлы (по каждой компоненте тензора напряжений и составляющей вектора смещений в геосреде записывается отдельный файл), нажав на кнопку «Записать». Далее можно продолжить расчеты по какой-либо

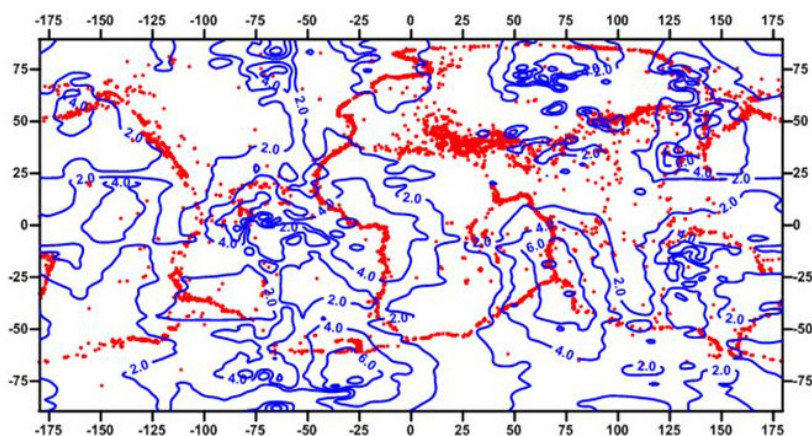
другой территории (нажав на кнопку «Продолжить»), либо выйти из программы (кнопка «Выход»).

Полученные результаты исследований с помощью программного комплекса Surfer в виде изолиний выводятся на карты и представлены на рис. 3; 4.



Р и с. 3. Эквипотенциальное распределение сдвиговых упругих деформаций в литосфере на глубине 10 км (сечение изолиний $2 \cdot 10^{-8}$), осредненных за 1 год. Кругами красного цвета изображено распределение эпицентров сейсмических событий на глубине 10 км за период времени 1914–2014 гг. (карта построена авторами)

F i g. 3. The equipotential distribution of the shear elastic deformations in the lithosphere at a depth of 10 km (the section of the isolines is $2 \cdot 10^{-8}$) averaged over 1 year. Mugs of red color depict the distribution of epicenters of seismic events at a depth of 10 km for the period of 1914–2014 (the map was built by the authors)



Р и с. 4. Эквипотенциальное распределение сдвиговых упруго-вязких деформаций в литосфере на глубине 10 км (сечение изолиний $2 \cdot 10^{-8}$), осредненных за 1 год (карта построена авторами)

F i g. 4. The equipotential distribution of the shear elastic-viscous deformations in the lithosphere at a depth of 10 km (the section of the isolines is $2 \cdot 10^{-8}$) averaged over 1 year (the map was built by the authors)

Обсуждение и заключение

В статье предложена новая глобальная математическая модель оценки напряженно-деформированного состояния литосферы Земли. Представленную модель можно использовать для оценки как упругих, так и упруго-вязких деформаций; при этом, как показали численные расчеты, упруго-вязкая модель имеет более высокую коррелированность распределений эпицентров сейсмических событий и сдвиговых

деформаций, чем упругая модель. Кроме того, информация по упруго-вязким сдвиговым деформациям позволяет перейти к оценке упруго-вязких сдвиговых напряжений, что, с учетом выполненных численных расчетов характеристик современных литосферных геодеоформационных процессов, является существенным вкладом в решение проблемы обеспечения безопасности территорий от проявления опасных эндогенных геологических процессов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Оценка безопасности и моделирование устойчивости геологических структур / В. А. Минаев [и др.] // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2014. № 4. С. 40–49. URL: <http://lamb.viniti.ru/sid2/sid2free?sid2=J12686082>
2. Опасные состояния геологической среды заселенных территорий: оценка на основе нечеткой модели / В. А. Минаев [и др.] // Спецтехника и связь. 2014. № 5. С. 28–51.
3. Строительство без будущих катастроф: учет геодинамических рисков / В. А. Минаев [и др.] // Спецтехника и связь. 2014. № 2. С. 50–55.
4. Модели и методы оценки рисков, связанных с пространственно-динамическими проявлениями опасных эндогенных геологических процессов / В. А. Минаев [и др.] // Спецтехника и связь. 2016. № 2. С. 41–50.
5. Пример оценки риска опасных геофизических процессов на платформенных территориях / В. А. Минаев [и др.] // Спецтехника и связь. 2016. № 3. С. 36–42.
6. **Абрамова А. В.** Математические модели оценки геодинамического риска на территории Армении // Технологии техносферной безопасности. 2014. Вып. 4 (56). С. 31. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-4/38-04-14.ttb.pdf>
7. **Jang J.-S. R.** ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1993. Vol. 23, Issue 3. P. 665–685. DOI: <https://doi.org/10.1109/21.256541>
8. **Kerry K. E., Hawick K. A.** Kriging interpolation on high-performance computers // High-Performance Computing and Networking HPCN-Europe 1998. Lecture Notes in Computer Science ; Eds. P. Sloot, M. Bubak, B. Hertzberger. Vol. 1401. Berlin ; Heidelberg : Springer, 1998. P. 429–438. DOI: <https://doi.org/10.1007/BFb0037170>
9. **Kim D.-W., Lee K. H., Lee D.** On cluster validity index for estimation of the optimal number of fuzzy clusters // Pattern Recognition. 2004. Vol. 37, Issue 10. P. 2009–2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2004.04.007>
10. **Wu K.-L., Yang M.-S.** A cluster validity index for fuzzy clustering // Pattern Recognition Letters. 2005. Vol. 26, Issue 9. P. 1275–1291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2004.11.022>
11. О зоне пониженных значений диссипативной функции Q в оболочке на границе с ядром / В. Н. Жарков [и др.] // Доклады Академии наук. 1974. Т. 214, № 4. С. 793–795. URL: <http://www.mathnet.ru/links/44d8822b4fe236cafa10aa48fb9d2515/dan38090.pdf>
12. **Жарков В. Н.** Об отсутствии сверхглубоких землетрясений и распределении вязкости и температуры в мантии Земли // Доклады Академии наук СССР. 1980. Т. 252, № 6. С. 1350–1353.
13. **Жарков В. Н.** О тепловом режиме Земли // Доклады Академии наук СССР. 1981. Т. 261, № 2. С. 321–324.

14. **Магницкий В. А.** Внутреннее строение и физика Земли : монография. М. : Недра, 1965. 380 с.
15. **Трубицын В. П.** Тектоника плавающих континентов // Вестник РАН. 2005. Т. 75, № 1. С. 10–21. URL: http://www.ras.ru/publishing/raserald/raserald_articleinfo.aspx?articleid=c6dec0da-11ba-462e-8a9c-99127ceec5fd
16. **Жарков В. Н.** Вязкость недр Земли // Труды Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта. 1960. № 1. С. 15–23.
17. Страховые риски в нефтегазовом комплексе и учет геодинамических угроз / Д. С. Грачев [и др.] // Технологии техносферной безопасности. 2016. Вып. 6 (70). С. 222–227. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-6/37-06-16.ttb.pdf>
18. Оценка опасных эндогенных геологических процессов на территориях нефтегазодобычи / Д. С. Грачев [и др.] // Технологии техносферной безопасности. 2016. Вып. 6 (70). С. 228–235. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-6/31-06-16.ttb.pdf>

Поступила 20.04.2018; принята к публикации 10.09.2018; опубликована онлайн 29.03.2019

Об авторах:

Фаддеев Александр Олегович, профессор, кафедра математики и информационных технологий управления, ФКОУ ВО «Академия права и управления Федеральной службы исполнения наказаний» (390000, Россия, г. Рязань, ул. Сенная, д. 1), доктор технических наук, доцент, ResearcherID: I-3739-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7259-1693>, fao1@mail.ru

Павлова Светлана Анатольевна, доцент, кафедра математики и информационных технологий управления, ФКОУ ВО «Академия права и управления Федеральной службы исполнения наказаний» (390000, Россия, г. Рязань, ул. Сенная, д. 1), кандидат технических наук, ResearcherID: I-2969-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8634-9163>, pavlovhome23@rambler.ru

Невдах Татьяна Михайловна, преподаватель, кафедра математики и информационных технологий управления, ФКОУ ВО «Академия права и управления Федеральной службы исполнения наказаний» (390000, Россия, г. Рязань, ул. Сенная, д. 1), ResearcherID: I-3611-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4799-0748>, ntmterrano@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. О. Фаддеев – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, подготовка начального варианта текста и формирование выводов; С. А. Павлова – изучение аналитических и практических материалов, компьютерная реализация решения задачи; Т. М. Невдах – проведение критического анализа исследования и доработка текста, литературный и патентный анализ.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Minaev V.A., Prus Y.V., Faddeev A.O., Popov A.N., Abramova A.V., Pavlova S.A. Safety assessment and modeling of geological structures geodynamic stability. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy* = Safety and Emergencies Problems. 2014; 4:40–49. <http://lamb.viniti.ru/sid2/sid2free?sid2=J12686082> (In Russ.)
2. Minaev V.A., Faddeev A.O., Kirakovsky V.V., Pavlova S.A. Dangerous conditions in the geological environment of populated areas: assessment based on a fuzzy model. *Spetstekhnika i svyaz* = Special Equipment and Communications. 2014; 5:28–51 (In Russ.)

3. Minaev V.A., Faddeev A.O., Abramova A.V., Popov A.N. Construction without future catastrophes: taking into account geodynamic risks. *Spetstekhnika i svyaz* = Special Equipment and Communications. 2014; 2:50-55 (In Russ.)
4. Minaev V.A., Sychev M.P., Faddeev A.O., Kuzmenko N.A. Models and methods for assessing the risks associated with the spatial-dynamic manifestations of dangerous endogenous geological processes. *Spetstekhnika i svyaz* = Special Equipment and Communications. 2016; 2:41-50 (In Russ.)
5. Minaev V.A., Sychev M.P., Faddeev A.O., Kuzmenko N.A., Nevdakh T.M. An example of risk assessment of hazardous geophysical processes in platform areas. *Spetstekhnika i svyaz* = Special Equipment and Communications. 2016; 3:36-42. (In Russ.)
6. Abramova A.V. Mathematical models of geodynamic risk assessment for the territory of Armenia. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti* = Technologies of Technospheric Security. 2014; 4:31. Available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-4/38-04-14.ttb.pdf> (In Russ.)
7. Jang J.S. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1993; 23(3):665-685. DOI: <https://doi.org/10.1109/21.256541>
8. Kerry K.E., Hawick K.A. Kriging interpolation on high-performance computers. In: Sloot P., Bubak M., Hertzberger B. (Eds) High-Performance Computing and Networking. HPCN-Europe 1998. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 1401. Berlin: Springer; 1998. p. 429-438. DOI: <https://doi.org/10.1007/BFb0037170>
9. Kim D.-W., Lee K.H., Lee D. On cluster validity index for estimation of the optimal number of fuzzy clusters. *Pattern Recognition*. 2004; 37(10):2009-2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2004.04.007>
10. Wu K.-L., Yang M.-S. A cluster validity index for fuzzy clustering. *Pattern Recognition Letters*. 2005; 26(9):1275-1291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2004.11.022>
11. Zharkov V.N., Dorofeeva L.N., Dorofeev V.I., Lyubimov V.M. On the zone of reduced values of the dissipative function Q in the shell at the boundary with the nucleus. *Doklady Akademii nauk SSSR* = Reports of the Academy of Sciences of the USSR. 1974; 214(4):793-795. <http://www.mathnet.ru/links/44d8822b4fe236cfa10aa48fb9d2515/dan38090.pdf> (In Russ.)
12. Zharkov V.N. On the absence of superdeep earthquakes and the distribution of viscosity and temperature in the Earth's mantle. *Doklady Akademii nauk SSSR* = Reports of the Academy of Sciences of the USSR. 1980; 252(6):1350-1353. (In Russ.)
13. Zharkov V.N. [On the thermal regime of the Earth]. *Doklady Akademii nauk SSSR* = Reports of the Academy of Sciences of the USSR. 1981; 261(2):321-324. (In Russ.)
14. Magnitsky V.A. [Internal structure and physics of the Earth]. Moscow: Nedra; 1965. (In Russ.)
15. Trubitsyn V.P. [Tectonics of floating continents]. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk* = Russian Academy of Sciences Bulletin. 2005; 75(1):10-21. Available at: http://www.ras.ru/publishing/rasheralt/rasheralt_articleinfo.aspx?articleid=c6dec0da-11ba-462e-8a9c-99127ceec5fd (In Russ.)
16. Zharkov V.N. [Viscosity of the Earth's interior]. *Trudy Instituta fiziki Zemli im. O. Yu. Shmidta* = Proceedings of Schmidt Institute of Physics of the Earth. 1960; 1:15-23. (In Russ.)
17. Grachev D.S., Minaev V.A., Topolsky N.G., Faddeev A.O. Insurance risks in oil and gas industry and account of geodynamic threats. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti* = Technologies of Technosphere Security. 2016; 6:222-227. Available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-6/37-06-16.ttb.pdf> (In Russ.)
18. Grachev D.S., Minaev V.A., Topolsky N.G., Faddeev A.O. Assessment of dangerous endogenous geological processes on territories of oil and gas production. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti* = Technologies of Technosphere Security. 2016; 6:228-235. Available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-6/31-06-16.ttb.pdf> (In Russ.)

Received 20.04.2018; revised 10.09.2018; published online 29.03.2019

About authors:

Alexander O. Faddeev, Professor, Chair of Mathematics and Information Technologies, The Academy of the FPS of Russia (1 Sennaya St., Ryazan 390000, Russia), D.Sc. (Engineering), Associate Professor, ResearcherID: I-3739-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7259-1693>, fao1@mail.ru

Svetlana A. Pavlova, Associate Professor, Chair of Mathematics and Information Technologies, The Academy of the FPS of Russia (1 Sennaya St., Ryazan 390000, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: I-2969-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8634-9163>, pavlovhome23@rambler.ru

Tatiana M. Nevdakh, Lecturer, Chair of Mathematics and Information Technologies, The Academy of the FPS of Russia (1 Sennaya St., Ryazan 390000, Russia), ResearcherID: I-3611-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4799-0748>, ntmterrano@mail.ru

Contribution of the authors:

A. O. Faddeev – scientific management, formulation of the basic research concept, writing the draft and drawing conclusions; S. A. Pavlova – analysis of analytical and practical materials, computer processing; T. M. Nevdakh – conducting a critical analysis of research and finalizing the text, literary and patent analysis.

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



Разработка математической модели детали на основе моделей графических систем

С. Ю. Калякулин^{1*}, В. В. Кузьмин², Э. В. Митин¹,
С. П. Сульдин¹, Т. Б. Тюрбеева²

¹ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)

²ФГБОУ ВО «Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»
(г. Москва, Россия)

*rim-tm@mail.ru

Введение. Целью статьи является разработка математической модели детали на основе параметрической модели графических систем.

Материалы и методы. Проведенный авторами обзор состояния данного вопроса показал возможность управления геометрической формой детали через переменные параметризованного чертежа. На основании этого выдвинуто предложение использовать конструкторскую параметризацию в расчетах параметров технологических процессов в системах автоматизированного проектирования.

Результаты исследования. В данной статье установлены связи между конструкторскими параметрами чертежа детали и табличными значениями переменных. Выявленные связи между параметрами на чертеже и переменными в таблице позволяют при модификации геометрической формы детали осуществлять изменения значений в таблице переменных, т. е. происходит управление чертежом через таблицу. Ввиду этого предлагается использовать данную систему работы с параметрическим чертежом в системе автоматизированного проектирования для расчета параметров технологических процессов.

Обсуждение и заключение. Задачи, решаемые в данной статье, позволяют сделать шаг в повышении уровня автоматизации расчета параметров в системах автоматизированного проектирования. Реализация разработанной методики построения математических моделей деталей на основе графических систем позволит повысить общий уровень автоматизации разработки геометрических чертежей деталей, а при внедрении данной методики в системы автоматизированного проектирования технологических процессов даст возможность автоматизировать расчеты параметров (режимы резания, нормы времени, технологические размеры на переходах и т. д.).

Ключевые слова: технологический процесс, математическая модель, параметризация, САПР ТП, конструкторский параметр, геометрический чертеж

Для цитирования: Разработка математической модели детали на основе моделей графических систем / С. Ю. Калякулин [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 1. С. 67–76. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.067-076>



Developing a Mathematical Model of a Part Based on Graphics System Models

S. Yu. Kalyakulin^{1*}, V. V. Kuzmin², E. V. Mitin¹,
S. P. Suldin¹, T. B. Tyurbееva²

¹ National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

² Moscow State University of Technology "STANKIN"
(Moscow, Russia)

*rim-tm@mail.ru

Introduction. The aim of the work is to develop a mathematical model of a part based on a parametric model of graphic systems.

Material and Methods. The review of the status of the question of developing a mathematical model of a part based on graphic systems showed the possibility of controlling the geometric shape of a part through the variables of a parameterized drawing. A proposal was made to use design parameterization in the calculation of the parameters of technological processes in computer-aided design systems.

Results. The article establishes links between the design parameters of the part drawing and tabular values of the variables. The revealed relationships between the parameters in the drawing and the variables in the table make it possible to change the geometric shape of the part by changing the values in the variable table, i.e. the drawing is managed through the table. It is proposed to use this system of work with the parametric drawing in computer-aided design systems for calculating the parameters of technological processes.

Discussion and Conclusion. The tasks solved in this article allow making a step in increasing the level of automation of parameter calculations in computer-aided design systems. The implementation of the developed methodology for constructing mathematical models of parts based on graphic systems will increase the overall level of automation of developing geometric drawings of parts. The implementation of this technique in computer-aided design systems allows automating the calculation of parameters (cutting modes, time norms, technological dimensions on transitions, etc.).

Keywords: technological process, mathematical model, parameterization, CAD, design parameter, geometric drawing

For citation: Kalyakulin S.Yu., Kuzmin V.V., Mitin E.V., Suldin S.P., Tyurbееva T.B. Developing a Mathematical Model of a Part Based on Graphics System Models. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technology and Systems. 2019; 29(1):67-76. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.067-076>

Введение

Суть конструкторско-технологической параметризации заключается в том, что в пределах заданной структуры технологических процессов [1] при изменении конструкторских параметров на чертеже детали автоматически меняются технологические параметры, отображаемые в картах технологической документации.

В системе T-Flex CAD переменные задаются следующими способами: 1) с помощью редактора переменных; 2) при задании и редактировании параметров линий построения, а также дру-

гих элементов чертежа или 3D-модели; 3) в текстовом редакторе (позволяет работать с внешними файлами формата «.tft», «.rtf», «.txt»); 4) при задании текстовых строк в параметрах некоторых элементов; 5) при задании значений практически всех вещественных параметров элементов.

Чтобы система могла в любой момент вычислять значение переменной, для каждой переменной можно задать выражение. Выражения в T-Flex CAD содержат операнды (константы, переменные) и операции (набор действий над этими операндами). При работе

с переменными можно использовать следующие типы функций: 1) стандартные математические функции; 2) переменные и тексты; 3) переменные и текстовые строки; 4) переменные и уровни видимости (переменные и приоритеты); 5) переменные и базы данных (возможна работа как с внутренними, так и с внешними базами данных в формате dBASE); 6) работа со сборочными документами.

Основным способом связи T-FLEX CAD с какими-либо внешними процедурами (особенно программами проектирования или расчетов) является передача значений параметров, причем можно не только передавать данные, но и принимать их. Реализуется это с помощью файла параметров, который представляет собой обычный ASCII-файл (формат «.par»).

Технологическая параметризация является логическим развитием конструкторской параметризации, которая успешно реализована в системе T-FLEX CAD и позволяет в рамках одной геометрической модели детали или сборочной единицы охватить большой класс однотипных объектов. Соотношения между геометрическими параметрами объектов изготовления, свойствами материала, характеристиками производственной системы позволяют более естественно описывать типовые представители и комплексные детали, которые широко используются в практике технологического проектирования.

Обзор литературы

Процесс параметрического моделирования (параметризация) – модели-

рование с использованием параметров элементов модели и соотношений между этими параметрами. Параметризация позволяет за короткое время перестроить (с помощью изменения геометрических отношений или параметров) различные конструктивные схемы и избежать принципиальных ошибок.

Проектирование деталей в параметрическом режиме значительно отличается от простого двухмерного черчения или трехмерного моделирования. Конструктор в режиме параметрического проектирования создает математическую модель объектов с заданными параметрами, при изменении которых происходят изменения конфигурации детали и взаимного расположения деталей в сборке.

В настоящее время большое внимание уделяется разработке математических моделей. В. В. Болкунов и соавторы¹ пишут о построении математических моделей структуры технологических операций механической обработки деталей машин и технологическом процессе. В работе А. С. Сергеева² приведены математические зависимости по расчету параметров шероховатости при обработке сталей на металлорежущем оборудовании. Математическая модель оптимизации ТП восстановления изношенных деталей представлена в статье А. М. Третьякова и соавторов [2]. Еще одна математическая модель, посвященная оптимизации размерно-точностных параметров деталей, описана в работе М. А. Болотова и соавторов³. Н. И. Пасько [3] представил математическую модель

¹ Болкунов В. В., Мирошкин А. Г., Злобина И. В. Построение математической модели структуры технологической операции механической обработки деталей машин // Современные тенденции развития науки и производства : сб. мат-лов Междунар. науч.-практ. конф. : в 4 т. Т. 3. Кемерово : ЗапСибНЦ, 2014. С. 94–96. URL: <https://docplayer.ru/55090787-23-24-oktyabrya-g-tom-3.html>

² Сергеев А. С. Разработка математических моделей расчета параметров шероховатости при обработке деталей на токарных и фрезерных станках с ЧПУ // Поколение будущего: взгляд молодых ученых : сб. мат-лов Междунар. молодежной науч. конф. Курск : А. А. Горохов, 2012. С. 160–163.

³ Болотов М. А., Печенин В. А., Рузанов Н. В. Математическая модель оптимизации размерно-точностных параметров деталей газотурбинных двигателей // Высокие технологии в современной науке и технике : сб. науч. тр. VI Междунар. науч.-технич. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов ; под ред. А. Н. Яковлева. Томск : Изд-во ТПУ, 2017. С. 298–299. URL: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/45413/1/conference_tpu-2017-C17_p298-299.pdf

процесса измерения размера детали при механической обработке. Построение математических моделей имеет большое значение при решении задач автоматизации сборочного процесса [4] и распределения деталей по технологическим группам [5].

Д. Е. Максимовский [6; 7] рассматривает вопросы разработки математических моделей структуры ТП, от которых напрямую зависит расчет параметров.

Разработка математических моделей с последующей передачей ее параметров в САПР ТП является частью технологической подготовки производства (ТПП), большое внимание которой уделяется в европейских странах.

В работе немецких ученых [8] рассматривается вопрос сокращения используемых в процессе производства энергии и материалов, что является существенным фактором, влияющим на структуру общих затрат компании. Авторами разработан алгоритм планирования, который представляет собой материально-ориентированное расширение этапа выбора производственного материала. На основе предложенного алгоритма происходит оценка затрачиваемой энергии, которая вызвана дополнительным снятием стружки с материала. Данные экономической эффективности обработки определенной детали включаются в план производственного процесса САПР ТП.

В работах польских ученых [9; 10] предлагается повысить уровень автоматизации ТПП за счет использования нового стандарта формата файлов STEP-NC, созданного для работы с системами числового программного управления (ЧПУ). Формат содержит модели данных для токарной и фрезерной обработки, а также представление о геометрии обрабатываемых поверхностей. Предлагается использовать модели данных STEP-NC для системы САПР ТП при разработке структуры ТП.

С. Г. Митин и П. Ю. Бочкарев [11] предлагают подход к созданию комплексной системы ТПП на основе полностью автоматизированной процедуры проектирования процесса планирования механической обработки. Авторами представлены следующие модели автоматизации: разработки маршрута обработки детали, формирования возможных групповых методов обработки, выбора оборудования, формирования структуры операции, выбора инструмента.

Материалы и методы

В данной статье предложен метод построения геометрического чертежа деталей на основе конструкторской параметризации с последующим построением таблицы переменных и интеграции ее в САПР ТП. Результаты разработанного метода можно использовать при расчете параметров ТП в автоматизированном режиме в САПР ТП.

В основе полученных научных результатов лежат фундаментальные положения расчета параметров ТП, технологии машиностроения, теории графов, теории моделей, методологии проектирования технологических процессов механической обработки.

Результаты исследования

Под параметризацией системы понимается процесс изменения «выходных» параметров при изменении «входных» в автоматическом режиме с помощью множества переменных и связей между ними.

Конструкторские и технологические переменные широко используются в системе технологического проектирования (СИТЕП), разработанной в МГТУ «СТАНКИН», в рамках технологической параметризации, которая является важной составляющей системы PDM (Product Data Management) CALS-технологий. Основная суть конструкторско-технологической параметризации заключается в том, что в пределах заданной структуры ТП при изменении

конструкторских параметров на чертеже детали автоматически изменяются технологические параметры, отображаемые в картах технологической документации.

Технологическая параметризация является логичным развитием конструкторской параметризации, которая успешно реализована в системе T-FLEX CAD и позволяет в рамках одной геометрической модели детали или сборочной единицы охватить большой класс однотипных объектов. Соотношения между геометрическими параметрами объектов изготовления, свойствами материала, характеристиками производственной системы позволяют более естественно описывать типовые представители и комплексные детали, которые широко используются в практике технологического проектирования.

Конструкторская параметризация – изменение чертежа детали y в автоматическом режиме при изменении параметров конструкции x с использованием функциональной связи $y = f(x)$.

Технологическая параметризация – изменение технологических параметров y в автоматическом режиме при изменении параметров конструкции x с использованием функциональной связи $y = f(x)$.

Конструкторская параметризация заключается в разработке геометрического чертежа детали в режиме, при котором изменение параметров чертежа приводит к автоматическому перестраиванию детали. Конструкторско-технологическая параметризация позволяет не только автоматически перестраивать геометрию детали, но и передавать информацию о ней в расчетный модуль конкретного параметра, информация из которого, в свою очередь, передается в комплект технологической документации. Расчетный модуль можно рассматривать как часть информационной модели применительно к рассматриваемому параметру ТП, оформленному

в виде программы. В этой программе выполнены этапы планирования и генерирования. Сама же информационная модель указывает, какие связи существуют между переменными и в каком виде они реализованы (математические выражения, таблицы, конкретные значения и т. д.).

Основное отличие автоматизированного расчета параметров ТП от ручных состоит в том, что в первом случае исходная информация об объекте изготовления (детали) представлена в виде векторных форматов графических систем 2D и 3D, а во втором случае – в виде традиционных чертежей. Исходная информация в первом случае содержит не все свойства поверхностей детали, необходимые для расчета параметров ТП, а форма ее представления неудобна для обработки.

Алгоритм расчет параметров ТП изготовления оригинальной детали включает следующие этапы:

- разработка ТП изготовления оригинальной детали на основе типового ТП изготовления комплексной детали;
- настройка конструкторских параметров параметризованного чертежа в T-FLEX CAD на параметры оригинальной детали;
- переключение окон в САПР ТП и формирование технологических карт, которые содержат параметры ТП, полученные в автоматическом режиме.

Математические модели деталей при расчете параметров ТП необходимы для выполнения конструкторско-технологической параметризации. Исходными элементами для моделей 2D-деталей являются чертежные примитивы, а для 3D-моделей – поверхности и одномерные многообразия в трехмерном пространстве.

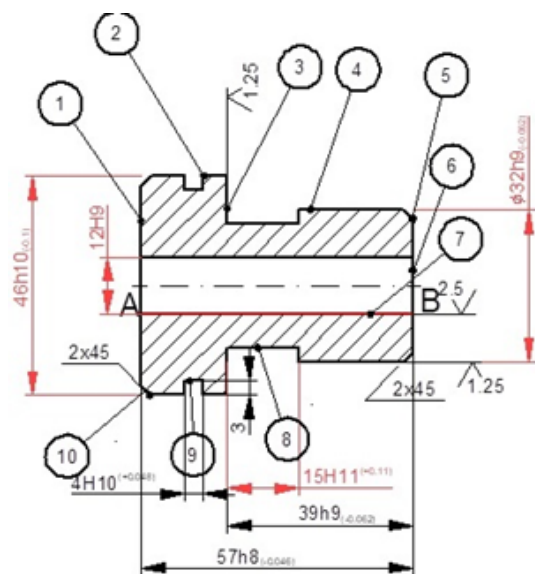
Математическая модель детали определяется как [12]:

$$M_{\text{дет}} = \langle M_{\text{дет}}, R_{\text{дет}}^{1,2} \rangle, \quad (2.7)$$

где $M_{\text{дет}}$ – исходные элементы модели детали (обрабатываемые поверхности);

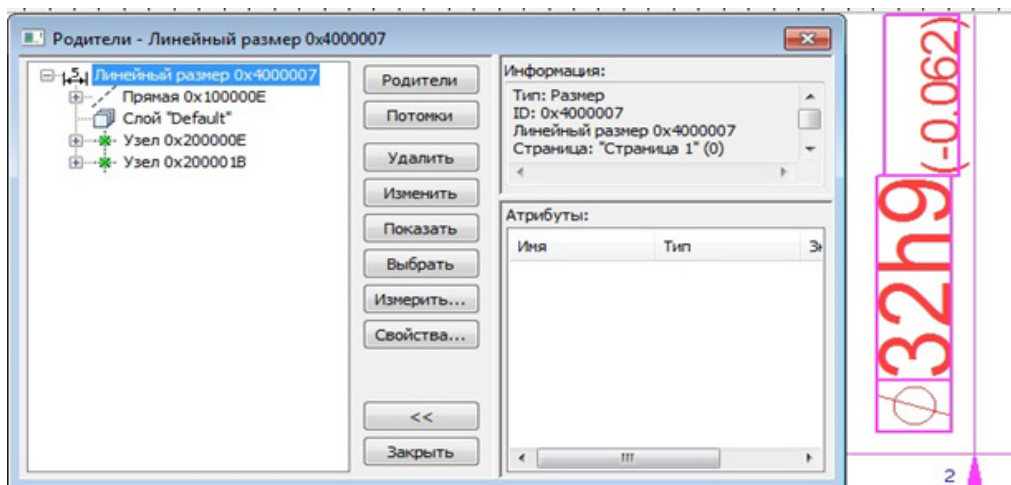
$R^{(1)}$ – унарные отношения свойств поверхностей, необходимые для расчета параметров ТП (тип линии, длина, толщина и т. д.); $R^{(2)}$ – бинарные отношения показателей точности относительного расположения поверхностей (допуск, шероховатость, параллельность, соосность и т. д.).

Отношениям $R^{(1)}$, $R^{(2)}$ на параметрическом чертеже детали (рис. 1) соответствуют ID-номера: например, $\varnothing 32h9_{-0,062}$ соответствует номер 0x4000007 (рис. 2). При помощи выражений данные ID-номера разбиваются на составляющие (табл. 1): значение размера, допуск, верхнее и нижнее предельные отклонения.



Шифр 111 / Cipher 111
Материал Ст45 / Material St45
Заготовка-пруток $D = 50$ /
Workpiece-bar $D = 50$
Производство мелкосерийное /
Small-scale production

Р и с. 1. Параметрический чертеж детали «Втулка»
F i g. 1. The parametric drawing of the detail “Bushings”



Р и с. 2. Соответствие ID размеру детали $\varnothing 32h9_{-0,062}$
F i g. 2. Compliance with ID part size $\varnothing 32h9_{-0,062}$

На примере параметризованной втулки видно, какие примитивы отвечают за те или иные поверхности, потому что на 2D-моделях поверхностей нет. Например, примитив 4 отвечает за наружную цилиндрическую поверхность диаметром 32, примитив 1 – за наружный торец диаметром 46, а примитив $A-B$ – за внутреннюю цилиндрическую поверхность диаметром $\varnothing 12$.

Все составляющее размера формируют таблицу переменных (рис. 2).

Таблица переменных отображается в редакторе переменных T-Flex CAD (рис. 3).

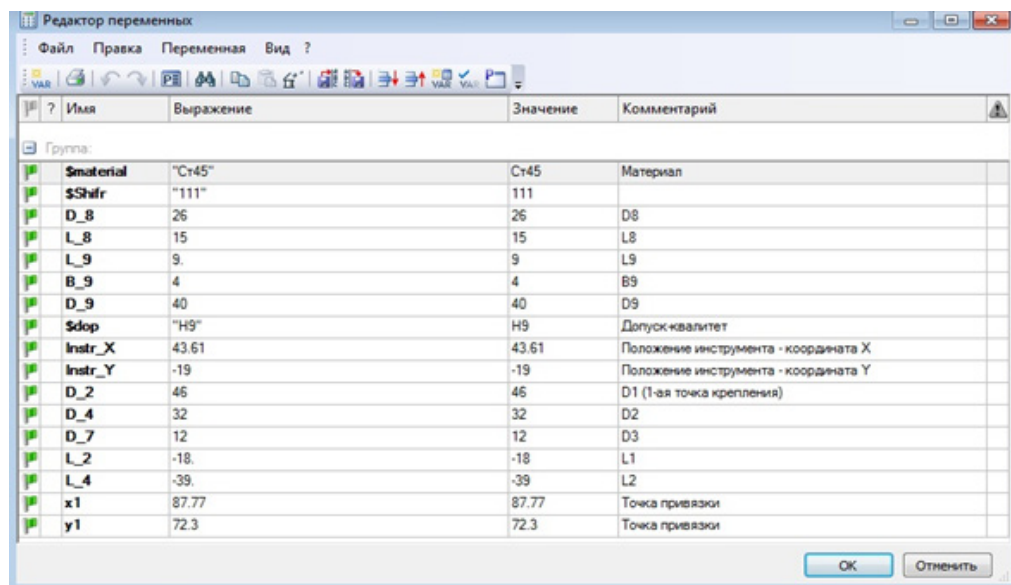
Так как геометрический чертеж разработан в параметрическом режиме, изменение его параметров приводит к автоматическому пересчету значений в таблице переменных.

Таблица

Table

Составляющие размера детали $\varnothing 32h9_{-0,062}$
Size-components $\varnothing 32h9_{-0,062}$

Значение / Value	Описание / Description	Выражение / Expression
32	Значение размера / Size value	get("0x4000007","VALUE")
h9	Допуск / Tolerance	tget("0x4000007","TOLERANCE")
0	Верхнее отклонение / Upper deviation	get("0x4000007","UPPER_DEVIATION")
-0.062	Нижнее отклонение / Lower deviation	get("0x4000007","LOWER_DEVIATION")



Имя	Выражение	Значение	Комментарий
\$material	"Ст45"	Ст45	Материал
\$Shlr	"111"	111	
D_8	26	26	D8
L_8	15	15	L8
L_9	9.	9	L9
B_9	4	4	B9
D_9	40	40	D9
\$dop	"H9"	H9	Допуск-качество
Instr_X	43.61	43.61	Положение инструмента - координата X
Instr_Y	-19	-19	Положение инструмента - координата Y
D_2	46	46	D1 (1-ая точка крепления)
D_4	32	32	D2
D_7	12	12	D3
L_2	-18.	-18	L1
L_4	-39.	-39	L2
x1	87.77	87.77	Точка привязки
y1	72.3	72.3	Точка привязки

Р и с. 3. Таблица переменных параметризованного чертежа детали «Втулка»

F i g. 3. The table of variables for the parameterized drawing of the detail "Bushing"

Обсуждение и заключение

На основе предложенного метода конструкторской параметризации построена математическая модель детали «Втулка». Составлена таблица переменных, отражающая значения параметров геометрического чертежа детали, изменения которых приводят к перестроению

детали. Предлагается использование данного метода при расчетах параметров ТП в САПР ТП. Для этого необходимо разработать в САПР ТП окно, отображающее считанные переменные табличных значений. Внедрение данной методики позволит в автоматизированном режиме рассчитывать любые параметры ТП.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Проектирование структуры технологических процессов на основе синтеза / С. Ю. Калыкулин [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 1. С. 77–84. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201801.077-084>
2. Третьяков А. М., Кравченко И. Н., Ерофеев М. Н. Математическая модель оптимизации выбора технологического процесса восстановления изношенных деталей // Строительные и дорожные машины. 2002. № 11. С. 31–34.
3. Пасько Н. И., Картавцев И. С. Математическая модель процесса изменения размера деталей при токарной обработке партии деталей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 4. С. 206–210. URL: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/preview_therest_ru.php?x=tsu_izv_technical_sciences_2013_04&year=2013
4. Кузнецова С. В., Симаков А. Л. Математическая модель процесса адаптации положения детали при автоматизированной сборке // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 5 (142). С. 15–20. URL: http://www.mashin.ru/files/2012/sb5_12.pdf
5. Математическая модель управления распределением деталей по технологическим группам / Е. Н. Сосенушкин [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2009. № 3. С. 47–53. URL: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/preview_therest_ru.php?x=tsu_izv_technical_sciences_2009_03&year=2009
6. Кузьмин В. В., Максимовский Д. Е. Выбор технологических баз на основе решения прямой задачи размерного анализа // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2012. № 2. С. 64–69. URL: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/590>
7. Maksimovskii D. E. Automation of process design by design-technological parameterization // Russian Engineering Research. 2011. Vol. 31, no. 9. P. 870–872. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X1109019X>
8. Goldhahn L., Eckardt R. Sustainable process planning of manufacturing variants for high-precision parts // Procedia CIRP. 2016. Vol. 46. P. 344–347. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.127>
9. Duda J., Poboziak J. The architecture of intelligent system for CNC machine tool programming // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 11. P. 501–508. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.143>
10. Poboziak J., Sobieski S. Extension of STEP-NC data structure to represent manufacturing process structure in CAPP system // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 11. P. 1692–1699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.294>
11. Mitin S., Bochkarev P. Mathematical modelling in the computer-aided process planning // IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 124. Article ID 012077. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/124/1/012077>
12. Kalyakulin S. Yu. Algorithm for calculating the parameters of the initial blank in the SITEP MO automated design system // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34, no. 11. P. 713–715.

Поступила 02.04.2018; принята к публикации 20.09.2018; опубликована онлайн 29.03.2019

Об авторах:

Калякулин Сергей Юрьевич, доцент, кафедра технологии машиностроения, Рузаевский институт машиностроения, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), кандидат технических наук, ResearcherID: O-6519-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0644-7746>, rim-tm@mail.ru

Кузьмин Владимир Владимирович, профессор, кафедра информационных технологий и вычислительных систем, ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»» (127994, Россия, г. Москва, Вадковский пер., д. 1), доктор технических наук, ResearcherID: V-5405-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6318-8563>, kvv2607@yandex.ru

Митин Эдуард Валерьевич, доцент, кафедра технологии машиностроения, Рузаевский институт машиностроения, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), кандидат технических наук, ResearcherID: V-5383-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9899-3420>, rimnauka@rambler.ru

Сульдин Сергей Петрович, заведующий, кафедра технологии машиностроения, Рузаевский институт машиностроения, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), кандидат технических наук, доцент, ResearcherID: V-5381-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8159-6322>, rimstanok@mail.ru

Тюрбеева Татьяна Борисовна, доцент, кафедра информационных технологий и вычислительных систем, ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»» (127994, Россия, г. Москва, Вадковский пер., д. 1), кандидат технических наук, ResearcherID: V-5050-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4071-7490>, turbeev@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

С. Ю. Калякулин – разработка параметрической модели детали; В. В. Кузьмин – научное руководство, постановка задачи исследования; Э. В. Митин – анализ литературных данных; С. П. Сульдин – разработка таблицы переменных; Т. Б. Тюрбеева – написание текста статьи, верстка и редактирование, обзор зарубежной литературы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Kalyakulin S.Yu., Kuzmin V.V., Mitin E.V., Suldin S.P., Tyurbeeva T.B. Designing the structure of technological processes based on synthesis. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(1):77-84. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201801.077-084> (In Russ.)
2. Tretyakov A.M., Kravchenko I.N., Erofeev M.N. Mathematical model of optimization of a choice of technological process of restoration of the worn out details. *Stroitelnyye i dorozhnyye mashiny* = Building and Road Cars. 2002; 11:31-34. (In Russ.)
3. Pasko N.I., Kartavtsev I.S. A parts dimension variation process model for batch turning. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* = News of the Tula State University. Technical Sciences. 2013; 4:206-210. Available at: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/preview_therest_ru.php?x=tsu_izv_technical_sciences_2013_04&year=2013 (In Russ.)
4. Kyznecova S.V., Simakov A.L. The mathematical model of the process of adaptation of the detail's position at the automated assembly. *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii* = Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making. 2012; 5:15-20. Available at: http://www.mashin.ru/files/2012/sb5_12.pdf (In Russ.)
5. Sosnushkin E.N., Yanovskaya E.A., Tretyakova E.I., Bekokopytov V.V. Workpieces technological group distribution control mathematical model. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* = News of the Tula State University. Technical Sciences. 2009; 3:47-53.

Available at: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/preview_therest_ru.php?x=tsu_izv_technical_sciences_2009_03&year=2009 (In Russ.)

6. Kuzmin V.V., Maksimovskiy D.E. Choice of technological bases on the basis of the decision of a direct problem of the dimensional analysis. *Vestnik MGTU "STANKIN"* = Vestnik MSTU "STANKIN". 2012; 2:64-69. Available at: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/590> (In Russ.)

7. Maksimovskii D.E. Automation of process design by design-technological parameterization. *Russian Engineering Research*. 2011; 31(9):870-872. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X1109019X>

8. Goldhahn L., Eckardt R. Sustainable process planning of manufacturing variants for high-precision parts. In: *7th CIRP Conference on High Performance Cutting. Procedia*. 2016; 46:344-347. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.127>

9. Duda J., Pobozniak J. The architecture of intelligent system for CNC machine tool programming. *Procedia Manufacturing*. 2017; 11:501-508. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.143>

10. Pobozniak J., Sobieski S. Extension of STEP-NC data structure to represent manufacturing process structure in CAPP system. *Procedia Manufacturing*. 2017; 11:1692-1699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.294>

11. Mitin S., Bochkarev P. Mathematical modelling in the computer-aided process planning. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016; 124. Article ID 012077. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/124/1/012077>

12. Kalyakulin S.Yu. Algorithm for calculating the parameters of the initial blank in the SITEP MO automated design system. *Russian Engineering Research*. 2014; 34(11):713-715.

Received 02.04.2018; revised 20.09.2018; published online 29.03.2019

About the authors:

Sergey Yu. Kalyakulin, Associate Professor, Chair of Mechanical Engineering Technology, Ruzayevka Institute of Engineering, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: O-6519-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0644-7746>, rim-tm@mail.ru

Vladimir V. Kuzmin, Professor, Chair of Information Technology and Computer System, Moscow State University of Technology "STANKIN" (1st Vadkovskiy Pereulok, Moscow 127994, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: V-5405-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6318-8563>, kvv2607@yandex.ru

Eduard V. Mitin, Associate Professor, Chair of Mechanical Engineering Technology, Ruzayevka Institute of Engineering, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: V-5383-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9899-3420>, rimnauka@rambler.ru

Sergey P. Suldin, Head, Chair of Mechanical Engineering Technology, Ruzayevka Institute of Engineering, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: V-5381-2017, <https://orcid.org/0000-0002-8159-6322>, rimstanok@mail.ru

Tatiana B. Tyurbeeva, Associate Professor, Chair of Information Technology and Computer Systems, Moscow State University of Technology "STANKIN" (1st Vadkovskiy Pereulok, Moscow 127994, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: V-5050-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6693-5974>, turbeev@mail.ru

Contribution of the authors:

S. Yu. Kalyakulin – developing the parametric model of the part; V. V. Kuzmin – scientific management, formulation of the research objectives; E. V. Mitin – analyzing literary data; S. P. Suldin – developing a table of variables; T. B. Tyurbeeva – writing the draft, word processing, editing the text, reviewing the relevant literature.

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 633.491:631.5

DOI: 10.15507/2658-4123.029.201901.077-090



Метод определения показателей оценки эффективности обработки картофеля аэродинамическим способом

Н. И. Джаббаров, А. М. Захаров*, А. В. Зыков*Институт агроинженерных и экологических проблем**сельскохозяйственного производства – филиал**ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр**ВИМ» (г. Санкт-Петербург, Россия)***bauermw@mail.ru*

Введение. Применяемые методы подготовки картофеля к реализации имеют существенные недостатки. Аэродинамический способ очистки позволяет устранить их за счет своих конструктивных особенностей. В ИАЭП – филиале ФГБНУ ФНАЦ ВИМ изготовлен экспериментальный образец установки очистки картофеля аэродинамическим способом. Для получения высоких показателей эффективности обработки клубнеплодов необходимо определить и оптимизировать потребляемую мощность, затраты энергии и производительность установки ПОКАС-1 ИАЭП.

Материалы и методы. Для определения оптимальных параметров потребной мощности, затрат энергии и производительности установки ПОКАС-1 применены теоретические методы моделирования на основе изучения процессов, протекающих в процессе очистки картофеля.

Результаты исследования. В ходе экспериментальных исследований установлены закономерности изменения потребной мощности, производительности и энергоёмкости процесса очистки картофеля в зависимости от температуры воздуха на выходе из форсунки. Для определения массы отделившихся с поверхности картофеля почвенных частиц установлена эмпирическая зависимость от температуры воздуха. Проведены исследования в различных режимах по разработанной программе и методике. Результаты исследований показывают, что оптимальный режим предреализационной обработки картофеля соответствует частоте вращения барабана $n = 20 \text{ мин}^{-1}$ и температуре воздуха на выходе из форсунки $t = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$; оптимальное значение потребной мощности установки $N_{\text{п}} = 5,68 \text{ кВт}$.

Обсуждение и заключение. Энергоёмкость технологического процесса предреализационной обработки картофеля с повышением производительности установки с 0,025 т/ч до 0,030 т/ч возрастала, а при дальнейшем повышении производительности с 0,030 т/ч до 0,036 т/ч – резко снижалась. В целом значение энергоёмкости

© Джаббаров Н. И., Захаров А. М., Зыков А. В., 2019



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

технологического процесса варьировалось в пределах 794,5–1124,3 МДж/т, что связано с температурным режимом и большим энергопотреблением установки. Разработанный метод позволяет рассчитать требуемую мощность, производительность аэродинамической установки и затраты энергии на технологический процесс.

Ключевые слова: обработка картофеля, аэродинамический способ, эмпирическая зависимость, эффективность процесса, энергоёмкость процесса, производительность

Для цитирования: Джабборов Н. И., Захаров А. М., Зыков А. В. Метод определения показателей оценки эффективности обработки картофеля аэродинамическим способом // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 1. С. 77–90. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.077-090>

Благодарности: Коллектив авторов благодарит администрацию Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (г. Санкт-Петербург) в лице директора А. В. Трифанова за оказанную поддержку в процессе исследования.

Method to Determine the Efficiency Assessment Indicators of Potato Treatment by the Aerodynamic Method

N. I. Dzhabborov, A. M. Zakharov*, A. V. Zykov

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Saint-Petersburg, Russia)

*bauermw@mail.ru

Introduction. Current practices to prepare potatoes for sale have significant drawbacks. The aerodynamic method of potato treatment eliminates them owing to its design features. IEEP – branch of FSAC VIM has manufactured an experimental model of the installation POKAS-1 IEEP to test this method. The required power, energy inputs and productivity of the installation were determined and optimized with the aim to achieve highly efficient treatment of potato tubers.

Materials and Methods. Various operating modes of the installation were studied in the experiments according to the developed program and methodology with the use of theoretical modeling methods based on the insight of the processes occurring during the potato treatment.

Results. The experimental studies revealed the patterns how the required power, productivity and energy intensity of potato treatment process varied with the nozzle outlet air temperature. The empirical relationship was found to determine the mass of soil particles removed from the potato surface depending on the air temperature.

Discussion and Conclusion. The most efficient pre-sale potato treatment by the aerodynamic method was found at the drum rotation frequency of 20 min⁻¹ and the nozzle output temperature of 40 °C, with the optimal required power of the installation being 5.68 kW. When the installation productivity increased from 0.025 t/h to 0.030 t/h, the energy intensity of the technological process was also going up; with the further increase in the productivity from 0.030 t/h to 0.036 t/h the energy intensity of the process dropped drastically. The energy intensity of the process varied from 794.5 to 1124.3 MJ/t depending upon the temperature regime and high power consumption of the installation. The developed method allowed calculating the required power and productivity of the aerodynamic installation and the energy inputs for the process under consideration.

Keywords: potato treatment, aerodynamic method, empirical dependence, process efficiency, energy intensity, productivity

For citation: Dzhabborov N.I., Zakharov A.M., Zykov A.V. Method to Determine the Efficiency Assessment Indicators of Potato Treatment by the Aerodynamic Method. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(1):77-90. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.077-090>

Acknowledgements: The authors express the gratitude to the administration of the Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM represented by the Director Alexey V. Trifanov for the support in the research and publication of the article.

Введение

Картофель является одним из основных продуктов питания как в России, так и во всем мире. Витамины и минералы, содержащиеся в клубнях, благоприятно влияют на организм человека в целом и способствуют укреплению иммунитета в частности [1]. Выделяются три основных категории использования картофеля: в промышленности, для производства семян и для потребления населением [2]. На сегодняшний день известно несколько способов подготовки клубнеплодов к реализации в торговых сетях¹ [3–6]. Два из них получили наибольшее распространение: это мойка и очистка сухим способом [7–8]. Оба варианта имеют свои недостатки на фоне современных тенденций к чистоте окружающей среды и сохранению природы [9–10]. При использовании сухой очистки в ходе подготовки к реализации нужно учитывать, что распространение почвенной пыли будет негативно сказываться как на состоянии здоровья работников, так и на состоянии окружающей среды; производители, использующие мойку, сталкиваются с большим расходом пресной воды и затратами электроэнергии на сушку [11–12]. Кроме этого, эксплуатация моющих машин требует наличия системы канализации, отстоя, очистки загрязненной воды, удаления остатков очистки [13–14]. Также ранее исследовались способы сепарации и очистки клубней картофеля с учетом их аэродинамических свойств [15–16].

Для определения эффективности аэродинамического способа при предреализационной обработке картофеля авторами были проведены экспериментальные исследования, результаты которых представлены в предшествующих статьях [11; 17]. Исследования были проведены в лабораторных условиях в соответствии с разработанной ранее программой и методикой. Результаты исследований свидетельствуют об эффективности аэродинамического способа предреализационной обработки картофеля [15].

Для энергооценки предложенного способа на основе полученных теоретических и экспериментальных данных была поставлена цель: разработать обобщенный метод определения показателей оценки эффективности предреализационной обработки картофеля. Разработанный метод позволяет рассчитать значения потребной мощности, производительности установки и затрат энергии на технологический процесс предреализационной очистки картофеля аэродинамическим способом.

Обзор литературы

Американскими и канадскими учеными [1] рассмотрены питательные и биологически активные соединения картофеля и их влияние на здоровье человека. Определено, что многие соединения картофеля способствуют антиоксидантной активности. Приводятся также данные о содержании витаминов групп C и B, а также калия.

¹ Дашков В. Н., Воробей А. С. Технологический процесс сухой очистки картофеля машиной с профилированными вальцами // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве : мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 т. Минск : Типография РУП НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2010. С. 265–268.

Другими исследователями [2] приведены агрономические принципы эффективного использования ресурсов и развития отрасли, описано применение физиологических и агрономических принципов в развитии картофельной промышленности. В статье А. Зальцмана и соавторов [3] исследованы физико-механические свойства клубней и их применение при предварительном проектировании машины для очистки клубнеплодов; измерены физические свойства клубней: длина, вес, диаметр и толщина кожицы; определены коэффициенты трения поверхности клубня о древесину, сталь и алюминий; измерен коэффициент сопротивления качению. Другими учеными [4] разработан и изучен способ отделения картофеля от почвенных комков в среде кипящего слоя; установлено, что песок является хорошей и недорогой средой для данной цели. Для исследования метода в полевых условиях построена и апробирована опытная установка; результаты экспериментальных исследований показали, что машина может эффективно отделять картофель от комков почвы. Китайскими и тайваньскими исследователями [5] изучена экспериментальная установка ультразвуковой очистки овощных культур; приведены результаты процесса мойки. При проведении эксперимента использованы три типа продукции: салат, капуста и картофель. Полученные результаты свидетельствуют о том, что урон после мойки составляет 0 %, а клубни картофеля очищаются быстрее остальных культур. В работе В. Н. Дашкова и А. С. Воробья² рассмотрен технологический процесс сухой очистки картофеля машиной с профилированными вальцами, описано устройство и работа машины по сухой очистке картофеля. Основным рабочим органом машины являются вальцы профилированной формы. Описан технологический процесс сухой очистки

картофеля, который положен в основу разработки машины для сухой очистки картофеля марки МСОК-5. Другими авторами [6] исследована возможность отделения комьев почвы от картофеля по инфракрасному отражению, описана система отделения почвы и различных примесей. Приведено описание конструктивно-технических решений, включающих в себя электрооптический узел с несколькими идентичными наборами оптики, датчики и электронные схемы, один набор для каждого канала и сортировочный блок с несколькими идентичными механическими воротами, расположенными рядом с разгрузочной частью канального конвейера.

Результаты исследования инновационных технологий процесса очистки клубней показывают, что повышение эффективности качества очистки от связанного грунта с растительными остатками зависит от рациональной конструктивно-технологической системы и оптимальных конструктивно-режимных параметров устройства [7]. Предложена конструктивно-технологическая система роторно-щеточного очистителя с обоснованием конструктивно-режимных параметров: частоты вращения диска, угла наклона и частоты вращения щетки. Китайскими учеными [8] представлена машина для мойки овощей и фруктов с использованием ультразвуковой технологии. Машина для мойки производит два уровня ультразвуковой частоты: 140 кГц для мойки плодов и овощей с эффектом, позволяющим разлагать пестициды, и 80 кГц.

С целью решения проблемы низкой эффективности разделения и высокой степени повреждения клубней в работе других ученых [9] описан механизм очистки картофеля, определены и описаны конструктивные параметры устройства для очистки и сортировки. Другими китайскими исследователя-

² Там же.

ми [10] разработан новый аппарат для разделения почвы и клубней; впервые предложено подобное устройство, приводимое в действие линейным двигателем.

В статье А. Л. Рапинчука и соавторов [11] описан процесс разработки и изготовления стенда для исследования очистки картофеля, получены экспериментальные зависимости удельной энергоемкости процесса, производительности, эффективности очистки картофеля и повреждаемости клубней от режимных и конструктивных параметров машины. Китайскими исследователями [12] описаны процессы разработки и изготовления экспериментального образца установки для сухой очистки картофеля, а также представлены результаты анализа полученных графических и математических зависимостей. Отмечено, что наибольшее влияние на производительность оказывают частота вращения, угол наклона и статическая нагрузка на картофель.

Н. И. Джабборовым и А. М. Захаровым [13] рассмотрены вопросы трудосбережения при производстве картофеля, повышения качества и конкурентоспособности отечественной товарной продукции, а также повышения экологической чистоты продовольственного картофеля. В работе И. М. Фомина, Г. А. Логинова и А. М. Захарова [14] изложены основные принципы аспирационно-водяного способа очистки воздуха и методика его экологической оценки в процессе предреализационной обработки картофеля. Выполнен аналитический обзор и оценка технологии очистки клубнеплодов, а также соответствующих машин и оборудования. В качестве критериев оценки использованы показатели экономической эффективности и экологической безопасности технологического процесса.

Авторами другой статьи [15] исследованы аэродинамические свойства картофеля и почвенных материалов, а также коэффициент сопротивления

для создания устройства разделения клубней картофеля и комков почвы воздухом. Работа иранских исследователей [16] посвящена изучению экспериментально-теоретических аэродинамических свойств клубней картофеля. Ученые определяли и сравнивали данные свойства с помощью вертикальной аэродинамической трубы.

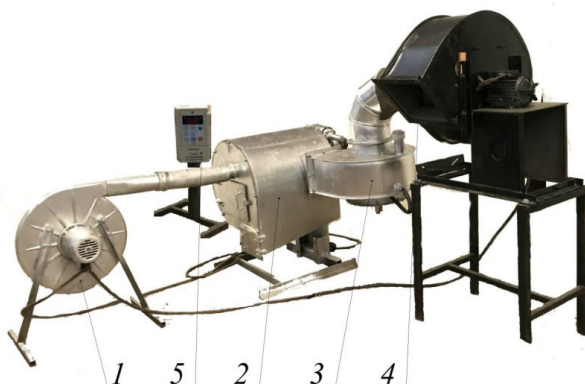
В статье Н. И. Джабборова, А. М. Захарова и А. В. Зыкова [17] изложены результаты экспериментальных исследований предреализационной обработки картофеля аэродинамическим способом на экспериментальной установке ПОКАС-1 ИАЭП. Приведены закономерности изменения массы почвенных частиц, отделяющейся с поверхности клубней, в виде эмпирических зависимостей от управляемых факторов: температуры воздуха и частоты вращения барабана. Подтверждена научная гипотеза о целесообразности применения нового разработанного в ИАЭП – филиале ФГБНУ ФНАЦ ВИМ аэродинамического способа предреализационной обработки клубнеплодов.

Материалы и методы

Объектом экспериментальных исследований стал технологический процесс предреализационной обработки клубнеплодов аэродинамическим способом в экспериментальной установке ПОКАС-1 ИАЭП.

Предметом исследований стали закономерности изменения потребной мощности, производительности экспериментальной установки и затрат энергии на процесс обработки картофеля аэродинамическим способом. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 1.

Температура окружающей среды при проведении экспериментов составляла 21 °С. Средняя масса проб картофеля на всех повторностях эксперимента составляла 2 500 г. Повторность проведения всех вариантов эксперимента – трехкратная. В качестве агента очистки использовалась вода в емкости



Р и с. 1. Экспериментальная установка ПОКАС-1 ИАЭП для предреализационной обработки клубнеплодов (картофеля) аэродинамическим способом: 1 – насос-вентилятор; 2 – камера с барабаном; 3 – сепаратор (водяной фильтр); 4 – насос-вентилятор; 5 – регулятор частоты вращения барабана

F i g. 1. The experimental installation POKAS-1 IIEP for pre-sale treatment of tuber crops (potato) by aerodynamic method: 1 – ventilation-pump; 2 – chamber with the drum; 3 – separator (water filter); 4 – ventilator-pump; 5 – drum RPM control

3 объемом 5 л, что позволило очищать проходящий через сепаратор (фильтр) воздух до необходимых параметров.

Краткая техническая характеристика установки: вес очистителя барабанного типа – 75 кг; вес напорного вентилятора – 10 кг; вес вентилятора на выходе – 35 кг; вес частотного регулятора – 5 кг; вместимость резервуара воды для очистки воздуха – 5 л; максимальная вместимость барабана для корнеклубнеплодов (картофеля) – 15 кг; общая масса установки для очистки картофеля аэродинамическим способом – 125 кг.

Разработана программа и методика экспериментальных исследований, где подробно изложен перечень параметров и показателей работы экспериментальной установки, а также методика их измерения.

В частности, определены максимальная загрузка барабана, время опыта, число оборотов барабана, температура воздуха на входе в вентилятор, температура воздуха на выходе из форсунки в барабане, первоначальная масса картофеля до очистки, масса картофеля после очистки, расход воды для очистки воздуха на выходе из барабана, расход элек-

трической энергии и потребная мощность экспериментальной установки.

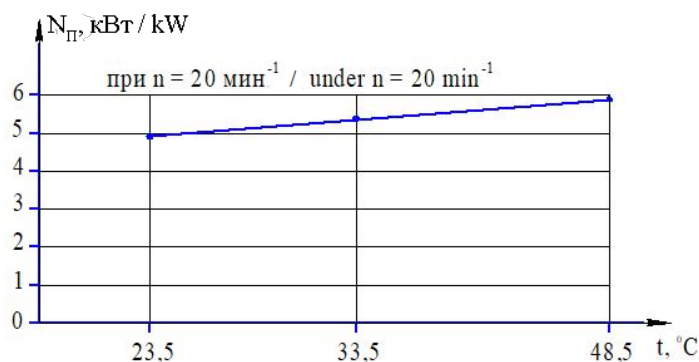
Результаты исследования

В результате обработки и анализа экспериментальных данных установлена зависимость изменения потребной мощности установки для очистки картофеля аэродинамическим способом от температуры воздуха на выходе из форсунки. В качестве примера на рис. 2 представлена графическая зависимость потребной мощности экспериментальной установки от температуры воздуха на выходе из форсунки при постоянной частоте вращения барабана $n = 20 \text{ min}^{-1}$.

В табл. 1 приведены эмпирические зависимости для определения потребной мощности $N_{\text{п}}$ экспериментальной установки от температуры воздуха t на выходе из форсунки при фиксированных значениях частоты вращения барабана.

Энергоемкость технологического процесса предреализационной обработки картофеля аэродинамическим способом определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_i = E_{\text{п}} + E_{\text{о}} + \frac{E_{\text{м}} + E_{\text{ж}}}{W_{\text{ч}}}, \text{ МДж/т, (1)}$$



Р и с. 2. Зависимость потребной мощности экспериментальной установки для очистки картофеля аэродинамическим способом от температуры воздуха на выходе из форсунки при постоянной частоте вращения барабана $n = 20 \text{ мин}^{-1}$

F i g. 2. Dependence of required power of the experimental installation for aerodynamic potato treatment on the nozzle outlet air temperature under the fixed drum rotation frequency $n = 20 \text{ мин}^{-1}$

Т а б л и ц а 1

Table 1

Эмпирические зависимости для определения потребной мощности экспериментальной установки N_{Π} от температуры воздуха t на выходе из форсунки, кВт
Empirical dependences to determine the required power N_{Π} (kW) of the experimental installation against the nozzle outlet air temperature (t)

Частота вращения барабана n , мин^{-1} / Drum rotation frequency n , мин^{-1}	Расчетная формула / Calculation formula
10	$N_{\Pi} = -0,000750t^2 + 0,095132t + 2,984736$
15	$N_{\Pi} = -0,00075t^2 + 0,095132t + 3,014736$
20	$N_{\Pi} = -0,00075t^2 + 0,095132t + 3,074736$

где E_{Π} – прямые энергетические затраты, выраженные расходом электрической энергии, МДж/т; E_o – затраты энергии, выраженные расходом воды в фильтрующем элементе установки, МДж/т; E_m – энергоёмкость экспериментальной установки на единицу сменного времени, МДж/ч; $E_{\text{ж}}$ – энергетические затраты живого труда на единицу сменного времени, МДж/ч.

Энергоёмкость экспериментальной установки на единицу сменного времени определяется по формуле:

$$E_m = \frac{M_y \cdot \alpha_y}{100} \left(\frac{a_m}{T_{\text{нм}}} + \frac{a_{\text{мт}}}{T_{\text{зн}}} \right), \text{ МДж/ч, } (2)$$

где M_y – масса экспериментальной установки, кг; α_y – энергетический эквивалент экспериментальной установки, МДж/кг; a_m – отчисления на реновацию экспериментальной установки, %; $a_{\text{мт}}$ – отчисления на текущий ремонт экспериментальной установки, %; $T_{\text{нм}}$ – нормативная годовая загрузка экспериментальной установки, ч; $T_{\text{зн}}$ – зональная годовая загрузка экспериментальной установки, ч.

Энергетические затраты живого труда на единицу сменного времени можно определить из выражения:

$$E_{\text{ж}} = n_{\text{ч}} \cdot \alpha_{\text{ж}}, \text{ МДж/ч, } (3)$$

где n_G – число основных рабочих; $\alpha_{ж}$ – энергетический эквивалент затрат живого труда, МДж/ч.

Прямые энергетические затраты $E_{п}$, выраженные расходом электрической энергии, определяются из выражения:

$$E_{п} = \frac{N_{п} \cdot K_{э} (1 + f_{э})}{W_{ч}}, \text{ МДж/т,} \quad (4)$$

где $N_{п}$ – потребная мощность установки, кВт; $W_{ч}$ – производительность установки, т/ч; $K_{э}$ – переводный коэффициент, учитывающий коэффициент полезного действия (КПД) электрических станций и сетей, $K_{э} = 3,6$; $f_{э}$ – коэффициент, учитывающий дополнительные затраты энергии на производство 1 кВт·ч, МДж/кВт·ч.

Затраты энергии E_o , выраженные расходом воды в фильтрующем элементе установки, определяются по формуле:

$$E_o = \alpha_o \cdot H_{в}, \quad (5)$$

где $H_{в}$ – расход воды на очистку воздуха при обработке клубнеплодов аэродинамическим способом, м³/т; α_o – расход энергии на испарение 1 м³ воды, МДж/м³.

Часовая производительность установки определяется из выражения:

$$W_{ч} = \frac{0,06 \cdot Q}{E_o}, \text{ т/ч,} \quad (6)$$

где Q – вместимость барабана, кг; t_o – продолжительность очистки, мин.

Значение потребной мощности $N_{п}$, соответствующее оптимальному режиму работы, обеспечивающему максимальное отделение почвенных частиц от клубней, определяется согласно формуле 3 в табл. 1. При $n = 20$ мин⁻¹ и наиболее приемлемой температуре воздуха на выходе из форсунки $t = 40$ °С оптимальное значение потребной мощности $N_{п} = 5,68$ кВт.

Экспериментальные исследования проведены в различных режимах работы установки.

Экспериментальные данные позволили установить эмпирическую зависимость для определения массы Δ отделившихся почвенных частиц с поверхности картофеля от температуры воздуха t на выходе из форсунки (при постоянной частоте вращения барабана $n = 20$ мин⁻¹), которая выглядит следующим образом:

$$\Delta = 0,03467t^2 + 2,77600t - 33,09133. \quad (7)$$

Согласно выражению (7), оптимальная температура подаваемого из форсунки воздуха t при фиксированном значении частоты вращения барабана $n = 20$ мин⁻¹, обеспечивающая максимальное отделение почвенных частиц от картофеля, составляет 40,03 °С.

Результаты обработки и оценки опытных данных показывают, что оптимальный режим обработки картофеля соответствует частоте вращения барабана $n = 20$ мин⁻¹ и температуре воздуха на выходе из форсунки $t = 40$ °С.

В табл. 2 приведены энергетические и технико-экономические показатели технологического процесса обработки картофеля.

Увеличение затрат энергии E_o , выраженное расходом воды в фильтрующем элементе, объясняется тем, что по мере повышения температуры воздуха t усиливается испарение; это приводит к некоторому повышению расхода воды в фильтрующем агенте.

Минимум затрат энергии E_o и энергоемкости технологического процесса \mathcal{E}_i обеспечивается при оптимальной температуре воздуха t на выходе из форсунки, когда наблюдается наибольшее отделение почвенных частиц от клубней (табл. 2).

Графическая зависимость энергозатрат $E_{п}$ (МДж/т), выраженных расходом электрической энергии, от температуры воздуха на выходе из форсунки представлена на рис. 3.

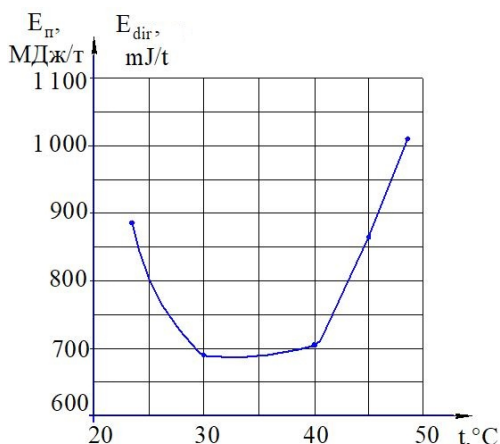
Таблица 2

Table 2

Энергетические и технико-экономические показатели технологического процесса обработки картофеля на экспериментальной установке ПОКАС-1 ИАЭП при фиксированном значении частоты вращения барабана $n = 20 \text{ мин}^{-1}$

Energy, technical and economic indicators of the technological process of potato treatment on the experimental installation POKAS-1 IIEEP under the fixed drum rotation frequency $n = 20 \text{ мин}^{-1}$

Температура воздуха при выходе из форсунки $t, ^\circ\text{C}$ / The nozzle outlet air temperature, $t, ^\circ\text{C}$	Потребная мощность установки $N_n, \text{ кВт}$ / Required power of the installation, $N_n, \text{ kW}$	Прямые энергетические затраты $E_n, \text{ МДж/т}$ / Direct energy inputs $E_{dir}, \text{ мДж/т}$	Затраты энергии E_o , выраженные расходом воды, МДж/т / Energy inputs E_w , expressed as water consumption, мДж/т	Энергоемкость экспериментальной установки $E_m, \text{ МДж/ч}$ / Energy intensity of the experimental installation $E_{inst}, \text{ мДж/ч}$	Энергетические затраты живого труда $E_{ж}, \text{ МДж/ч}$ / Energy inputs for direct labour $E_{dir, lab}, \text{ мДж/ч}$	Часовая производительность установки $W_n, \text{ т/ч}$ / Hourly throughput of the installation $W_h, \text{ т/ч}$	Энергоемкость технологического процесса $E_p, \text{ МДж/т}$ / Energy intensity of technological process $E_p, \text{ мДж/т}$
23,5	4,92	885,6	0,051	1,78	1,26	0,0250	1 007,250
40,0	5,68	710,0	0,065	1,78	1,26	0,0360	794,510
48,5	5,92	1 009,1	0,072	1,78	1,26	0,0264	1 124,323



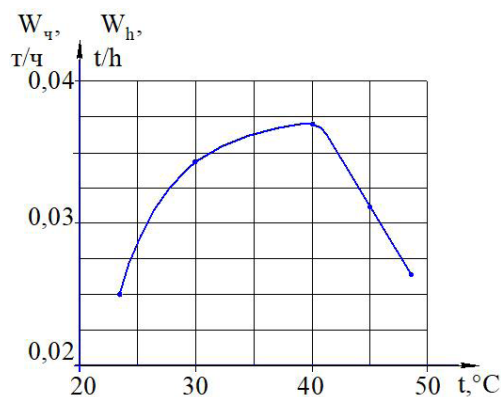
Р и с. 3. Зависимость прямых энергозатрат E_{Π} от температуры воздуха t на выходе из форсунки при фиксированном значении частоты вращения барабана $n = 20 \text{ мин}^{-1}$

F i g. 3. Dependence of direct energy inputs (E_{dir}) on the nozzle outlet air temperature (t) under the fixed drum rotation frequency $n = 20 \text{ мин}^{-1}$

С использованием опытных данных установлена эмпирическая зависимость энергозатрат E_{Π} от температуры воздуха t на выходе из форсунки:

$$E_{\Pi} = 1,83323t^2 - 127,05230t + 2858,92977. \quad (8)$$

Графическая зависимость часовой производительности экспериментальной установки W_n (т/ч) от температуры воздуха t на выходе из форсунки показана на рис. 4.



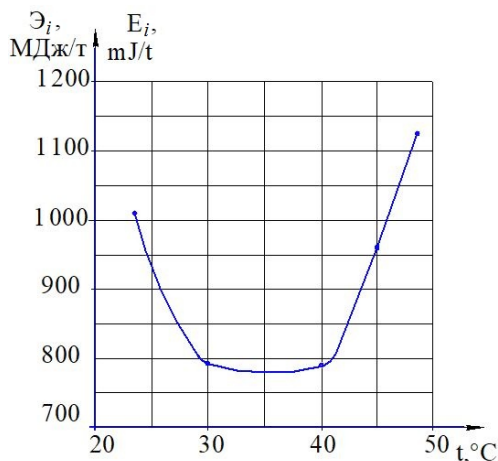
Р и с. 4. Зависимость часовой производительности экспериментальной установки W_n от температуры воздуха t на выходе из форсунки (при фиксированном значении частоты вращения барабана $n = 20 \text{ мин}^{-1}$)

F i g. 4. Dependence of the hourly throughput (W_h) of the experimental installation on the nozzle outlet air temperature (t) under the fixed drum rotation frequency $n = 20 \text{ мин}^{-1}$

Закономерность изменения часовой производительности экспериментальной установки W_G от температуры воздуха t на выходе из форсунки описывается эмпирической зависимостью:

$$W_q = -0,000072t^2 + 0,00523t - 0,05820. \quad (9)$$

Графическая зависимость энергоёмкости \mathcal{E}_i технологического процесса обработки картофеля аэродинамическим способом от температуры воздуха t на выходе из форсунки представлена на рис. 5.



Р и с. 5. Зависимость энергоёмкости (\mathcal{E}_i) технологического процесса предреализационной обработки картофеля аэродинамическим способом от температуры воздуха t на выходе из форсунки при фиксированном значении частоты вращения барабана $n = 20 \text{ мин}^{-1}$

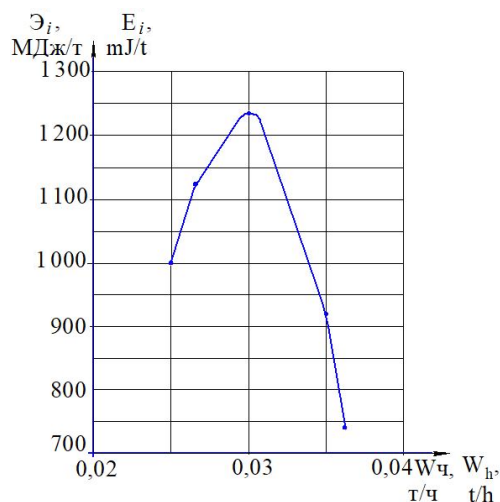
Fig. 5. Dependence of the energy intensity (E_i) of the technological process of pre-sale potato treatment by aerodynamic method on the nozzle outlet air temperature (t) under the fixed drum rotation frequency $n = 20 \text{ min}^{-1}$

Эмпирическая зависимость энергоёмкости технологического процесса \mathcal{E}_i от температуры воздуха t на выходе из форсунки выглядит следующим образом:

$$\mathcal{E}_i = 2,06779t^2 - 144,19828t + 3253,97017. \quad (10)$$

Зависимость энергоёмкости технологического процесса \mathcal{E}_i от часовой производительности W_q эксперимен-

тальной установки представлена на рис. 6.



Р и с. 6. Зависимость энергоёмкости (\mathcal{E}_i) технологического процесса обработки картофеля от часовой производительности W_q при фиксированном значении частоты вращения барабана $n = 20 \text{ мин}^{-1}$

Fig. 6. Dependence of the energy intensity (E_i) of the technological process of potato treatment on the hourly throughput (W_h) under the fixed drum rotation frequency $n = 20 \text{ min}^{-1}$

На основе опытных данных установлена эмпирическая зависимость энергоёмкости \mathcal{E}_i технологического процесса от часовой производительности W_q экспериментальной установки:

$$\mathcal{E}_i = -10725372,020W_q^2 + 634907,693W_q - 8162,085. \quad (11)$$

Экспериментальные данные и установленные зависимости свидетельствуют о том, что энергоёмкость технологического процесса предреализационной обработки картофеля аэродинамическим способом с увеличением производительности с 0,025 т/ч до 0,030 т/ч возрастает. При дальнейшем повышении производительности с 0,030 т/ч до 0,036 т/ч энергоёмкость процесса резко снижается, что связано с температурным режимом и энергопотреблением установки. При работе с температурой ниже

оптимальной затраты электроэнергии и производительность работы уменьшаются, а время обработки увеличивается. Работа экспериментальной установки при повышенных температурных режимах влечет за собой резкое увеличение потребления электроэнергии, которая тратится на нагрев воздуха, что не соответствует оптимальным режимам работы, обеспечивающим эффективность технологического процесса.

Обсуждение и заключение

Экспериментальные данные и установленные закономерности изменения показателей оценки эффективности предреализационной обработки картофеля аэродинамическим способом показывают, что на энергоемкость процесса наибольшее влияние оказывают температурный режим и производительность экспериментальной установки. Это свидетельствует о том, что на основе полученных данных можно разработать более высокопроизводительные машины, которые позволят существенно снизить энергоемкость про-

цесса предреализационной обработки картофеля.

На основе теоретических и экспериментальных исследований разработан и предложен обобщенный метод, который позволяет определить потребляемую мощность, производительность аэродинамической установки и затраты энергии на процесс очистки картофеля. Обобщенный метод включает в себя математические модели для определения и прогнозирования показателей оценки эффективности предреализационной обработки картофеля аэродинамическим способом.

Установлено, что на энергоемкость процесса обработки картофеля наибольшее влияние оказывают температурный режим и производительность экспериментальной установки, а существенное снижение энергоемкости технологического процесса может быть достигнуто посредством повышения производительности труда за счет разработки более высокопроизводительных машин.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Camire M. E., Kubow S., Donnelly D. J. Potatoes and human health // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2009. Vol. 49, Issue 10. P. 823–840. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408390903041996>
2. Scott R. K., Wilcockson S. J. Application of physiological and agronomic principles to the development of the potato industry // *The Potato Crop* / Ed. P. M. Harris. Boston : Springer, 1978. P. 678–704. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7210-1_18
3. Separating potatoes from clods and stones in a fluidized bed medium / A. Zaltzman [et al.] // *Transactions of the ASAE*. 1983. Vol. 26, no. 4. P. 987–990. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.34061>
4. Ohwovoriole E. N., Oboli S., Mgbеke A. C. C. Studies and preliminary design for a cassava tuber peeling machine // *Transactions of the ASAE*. 1988. Vol. 31, no. 2. P. 380–385. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.30718>
5. Zhang X. W., Chiu Y. J., Yang C. H. Design and experiment of ultrasonic cleaning for crops // *Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vol. 201–202. P. 697–700. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.201-202.697>
6. Story A. G., Raghavan G. S. V. Sorting potatoes from stones and soil clods by infrared reflectance // *Transactions of ASAE*. 1973. Vol. 16, no. 2. P. 304–309. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.37508>
7. Constructive-regime parameters of rotor-brush cleaner for tuberous roots dry cleaning / B. Nuralin [et al.] // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2018. Vol. 40. P. 113. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1004-0>
8. Dual-frequency ultrasonic washing machine for fruits and vegetables / Z. Changping [et al.] // 2015 IEEE International Conference on Consumer Electronics. 2015. P. 152–153. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCE-TW.2015.7216828>

9. Design and experiment of potato cleaning and sorting machine / X. Wang [et al.] // Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery. 2017. Vol. 48, Issue 10. P. 316–322. DOI: <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.040>
10. **Gao G., Zhang D., Liu J.** Design of a new soil-tuber separation device on potato harvesters // Computer and Computing Technologies in Agriculture IV. CCTA 2010. IFIP Advances in Information and Communication Technology / Eds. D. Li, Y. Liu, Y. Chen. 2011. Vol. 346. P. 604–612. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-18354-6_71
11. Экспериментальные исследования процесса сухой очистки картофеля / А. Л. Рапичук [и др.] // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. 2010. № 3. С. 67–72.
12. Separating mechanism analysis and parameter optimization experiment of swing separation sieve for potato and soil mixture / S. Xie [et al.] // Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery. 2017. Vol. 48, Issue 11. P. 156–164. DOI: <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.019>
13. **Джаббаров Н. И., Захаров А. М.** Методика экологической оценки аспирационно-водяной очистки воздуха при обработке картофеля аэродинамическим способом // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2017. № 91. С. 138–145.
14. **Фомин И. М., Логинов Г. А., Захаров А. М.** Техничко-технологическая модернизация картофелеводства в товаропроизводящих хозяйствах Северо-Запада РФ // Сборник научных докладов ВИМ. 2011. Т. 1. С. 95–103.
15. **Hallee N. D.** Aerodynamic properties of potatoes and associated soil materials // Transactions of the ASAE. 1972. Vol. 15, no. 2. P. 303–307. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.37892>
16. **Abedi G., Abdollahpour S., Bakhtiari M. R.** Aerodynamic properties of potato tubers to air-flow separation from stones and clods // International Journal of Vegetable Science. 2019. Vol. 25, no. 1. P. 87–94. DOI: <https://doi.org/10.1080/19315260.2018.1478920>
17. **Джаббаров Н. И., Захаров А. М., Зыков А. В.** Оценка эффективности применения аэродинамического способа для предреализационной обработки картофеля // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2018. № 95. С. 136–143. DOI: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10040>

Поступила 04.10.2018; принята к публикации 05.12.2018; опубликована онлайн 29.03.2019

Об авторах:

Джаббаров Нозим Исмоилович, ведущий научный сотрудник, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196625, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филътровское ш., д. 3), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: A-7780-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8910-2625>, nozimjon-59@mail.ru

Захаров Антон Михайлович, старший научный сотрудник, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196625, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филътровское ш., д. 3), кандидат технических наук, ResearcherID: S-4113-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3501-0543>, bauermw@mail.ru

Зыков Андрей Владимирович, научный сотрудник, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196625, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филътровское ш., д. 3), ResearcherID: A-7155-2015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3435-7468>, zav35@list.ru

Заявленный вклад соавторов:

Н. И. Джаббаров – научное руководство, формулирование основной концепции исследования и структуры статьи, написание первоначального варианта статьи; А. М. Захаров – обработка и анализ экспериментальных данных, анализ научных источников, формулирование выводов; А. В. Зыков – участие в исследованиях и обработка экспериментальных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Camire M., Kubow S., Donnelly D. Potatoes and human health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2009; 49(10):823-840. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408390903041996>
2. Scott R.K., Wilcockson S.J. Application of physiological and agronomic principles to the development of the potato industry. In: P.M. Harris (Eds.) *The Potato Crop*. Boston: Springer; 1978. p. 678-704. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7210-1_18
3. Zaltzman A., Feller R., Mizrach A., Schmilorvitch Z. Separating potatoes from clods and stones in a fluidized bed medium. *Transactions of the ASAE*. 1983; 26(4):987-990. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.34061>
4. Ohwovoriole E.N., Oboli S., Mgbekwe A.C.C. Studies and preliminary design for a cassava tuber peeling machine. *Transactions of the ASAE*. 1988; 31(2):380-385. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.30718>
5. Zhang X.W., Chiu Y.J., Yang C.H. Design and experiment of ultrasonic cleaning for crops. *Applied Mechanics and Materials*. 2012; 201-202:697-700. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.201-202.697>
6. Story A.G., Raghavan G.S.V. Sorting potatoes from stones and soil clods by infrared reflectance. *Transactions of ASAE*. 1973; 16(2):304-309. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.37508>
7. Nuralin B., Bakushev A., Janaliev Y., Dussenov M., Kubasheva Z., Omarova N. et al. Constructive-regime parameters of rotor-brush cleaner for tuberous roots dry cleaning. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2018; 40:113. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1004-0>
8. Changping Z., Bin W., Runhang G., Yitao L., Jin Z., Zhenbing H. et al. Dual-frequency ultrasonic washing machine for fruits and vegetables. *International Conference on Consumer Electronics*. 2015. p. 152-153. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCE-TW.2015.7216828>
9. Wang X., Sun J., Xu Y., Li X., Cheng P. Design and experiment of potato cleaning and sorting machine. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. 2017; 48(10):316-322. DOI: <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.040>
10. Gao G., Zhang D., Liu J. Design of a new soil-tuber separation device on potato harvesters. In: D. Li, Y. Liu, Y. Chen (Eds) *Computer and Computing Technologies in Agriculture IV*. CCTA 2010. IFIP Advances in Information and Communication Technology. 2011; 346:604-612. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-18354-6_71
11. Rapinchuk A.L., Vorobey A.S., Brench A.A., Belohvostov G.I. Experimental research of process of dry clearing of potato. *Vesti Natsyonalnaya akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh nauk* = News of National Academy of Sciences of Belarus. Series of Physical and Technical Sciences. 2010; 3:67-72. (In Russ.)
12. Xie S., Wang C., Deng W., Li X., Qi S. Separating mechanism analysis and parameter optimization experiment of swing separation sieve for potato and soil mixture. *Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery*. 2017; 48(11):156-164. DOI: <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.019>
13. Dzhabbarov N.I., Zakharov A.M. Methods for environmental assessment of aspiration-water cleaning of air in aerodynamic treatment of potatoes. *Tekhnologii i tekhnicheskiye sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanised Crop and Livestock Production. 2017; 91:138-145. (In Russ.)

14. Fomin I.M., Loginov G.A., Zakharov A.M. Technical and technological modernization of potato growing in the commodity-producing farms of the North-West of the Russian Federation. *Sbornik nauchnykh dokladov VIM* = Collection of Scientific Reports of VIM. 2011; 1:95-103. (In Russ.)
15. Hallee N.D. Aerodynamic properties of potatoes and associated soil materials. *Transactions of the ASAE*. 1972; 15(2):303-307. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.37892>
16. Abedi G., Abdollahpour S., Bakhtiari M.R. Aerodynamic properties of potato tubers to airflow separation from stones and clods. *International Journal of Vegetable Science*. 2019; 25(1):87-94. DOI: <https://doi.org/10.1080/19315260.2018.1478920>
17. Dzhabborov N.I., Zakharov A.M., Zykov A.V. Evaluation of aerodynamic method of pre-sale treatment of potato. *Tekhnologii i tekhnicheskiye sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktov rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanised Crop and Livestock Production. 2018; 95:136-143. DOI: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10040> (In Russ.)

Received 04.10.2018; revised 05.12.2018; published online 29.03.2019

About authors:

Nozim I. Dzhabborov, Leading Researcher, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, p. o. Tiarlevo, Saint Petersburg 196625, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: A-7780-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8910-2625>, nozimjon-59@mail.ru

Anton M. Zakharov, Senior Researcher, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, p. o. Tiarlevo, Saint Petersburg 196625, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: S-4113-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3501-0543>, bauermw@mail.ru

Andrey V. Zykov, Researcher, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, p. o. Tiarlevo, Saint Petersburg 196625, Russia), ResearcherID: A-7155-2015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3435-7468>, zav35@list.ru

Contribution of the authors:

N. I. Dzhabborov – academic supervision, formulation of the basic concept of investigations and the structure of the paper; A. M. Zakharov – processing and analysis of experimental data, review of scientific sources, drawing of conclusions; A. V. Zykov – participation in investigations, processing of experimental data.

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



Результаты экспериментальных исследований сепарации вороха лука-севка на прутковом элеваторе с асимметрично установленными встряхивателями

А. В. Сибирёв*, А. Г. Аксенов, М. А. Мосяков

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

*sibirev2011@yandex.ru

Введение. Существующие машины для уборки корнеплодов и лука не обеспечивают качественных показателей сепарации вороха корнеплодов, что приводит к нарушению агротехнических требований в процессе уборки. Необходим поиск новых решений по улучшению качественных показателей сепарации корнеплодов, а именно повышению полноты сепарации и снижению количества повреждений.

Материалы и методы. В статье представлена конструкция лабораторной установки по определению качественных показателей сепарации вороха лука-севка на прутковом элеваторе с асимметрично установленными пассивным эллиптическим встряхивателем и поддерживающим роликом. Описана методика проведения и результаты лабораторных исследований по определению качественных показателей сепарации вороха лука-севка на экспериментальном прутковом элеваторе.

Результаты исследования. Приведены результаты лабораторных исследований пруткового элеватора по определению качественных показателей сепарации вороха лука-севка. Определено, что максимальная полнота сепарации вороха лука-севка составляет 98 % при поступательной скорости движения полотна пруткового элеватора $v_{эл} = 1,55\text{--}1,68$ м/с, подаче вороха лука-севка $Q_{вп} = 19,7\text{--}27,1$ кг/с и межосевом расстоянии между пассивным эллиптическим встряхивателем и поддерживающим роликом $S = 0,29\text{--}0,42$ м.

Обсуждение и заключение. Применение пруткового элеватора с асимметричным расположением эллиптического встряхивателя и поддерживающего ролика позволяет повысить полноту сепарации луковиц лука-севка на 20 %, а повреждения луковиц снизить на 11 % по сравнению с симметричным расположением встряхивателей.

Ключевые слова: экспериментальный прутковый элеватор, подача вороха, поступательная скорость движения, качество сепарации, лук-севок, повреждение

Для цитирования: Сибирёв А. В., Аксенов А. Г., Мосяков М. А. Результаты экспериментальных исследований сепарации вороха лука-севка на прутковом элеваторе с асимметрично установленными встряхивателями // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 1. С. 91–107. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.091-107>

Благодарности: Исследование проведено при государственной поддержке молодых российских ученых – кандидатов наук МК – 4002.2018.8.



The Results of the Experimental Study of Onions Separation Using a Rod Elevator with Asymmetric Installed Burners

A. V. Sibirev*, A. G. Aksenov, M. A. Mosyakov

Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russia)

*sibirev2011@yandex.ru

Introduction. Existing machines for harvesting root crops and onions do not have efficient indicators describing separation of root crops that leads to incompliance with agrotechnical requirements to harvesting root crops. New methods should be found to increase quality of root crop separation, including the qualitative indicators, and to cut losses.

Materials and Methods. The article describes the design of a laboratory unit for determining qualitative indicators of the seed onion heap separation using a rod elevator with the asymmetric passive elliptical shaker and supporting roller. The authors describe the method and results of laboratory studies to determine qualitative indicators of seed onion heap separation at an experimental rod elevator.

Results. The results of the laboratory study of the rod elevator are cited and qualitative indices of seed onion heap separation are defined. The maximum completeness of separation of the seed onion heap is 98 %, when the forward speed of the web of the rod elevator is $v_{el} = 1.55\text{--}1.68$ m/s, the supply of heap of onion-seeding $Q_B = 19.7\text{--}27.1$ kg/s and the interaxial distance between the passive elliptical shaker and the supporting roller is within the range of $S = 0.29\text{--}0.42$ m.

Discussion and Conclusion. The use of a rod elevator with the asymmetric elliptical shakers and supporting roller allows increasing the completeness of separation of seed onions by 20 % and to cut the bulb damage by 11 %, compared to symmetrical arrangement of the shakers.

Keywords: experimental rod elevator, heap feed, forward speed, separation quality, onions, losses

For citation: Sibirev A.V., Aksenov A.G., Mosyakov M.A. The Results of the Experimental Study of Onions Separation Using a Rod Elevator with Asymmetric Installed Burners. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(1):91-107. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.091-107>

Acknowledgements: The study was conducted with the state support of young Russian scientists – candidates of sciences MK – 4002.2018.8.

Введение

Качество работы машины для уборки корнеплодов и лука определяется в первую очередь работой выкапывающего рабочего органа, т. к. от его типа и технологических параметров зависят конструктивно-технологические параметры сепарирующих устройств [1].

Теоретическим и экспериментальным обоснованием технологического процесса сепарации корнеклубнеплодов и лукавиз в разное время занимались С. Н. Борычев, Н. В. Бышов, Н. И. Верещагин, Н. Ф. Диденко, Н. Н. Колчин, Р. Р. Камалетдинов, К. З. Кухмазов, Н. П. Ларю-

шин, А. М. Ларюшин, Л. М. Максимов, А. А. Протасов, Э. С. Рейнгарт, Г. К. Рембалович, А. А. Сорокин, М. Б. Угланов, И. А. Успенский, Н. В. Фирсов, В. А. Хвостов, В. М. Цециновский, В. И. Шляхетский и другие ученые.

Известно, что качество сепарации корнеплодов, лука и картофеля зависит прежде всего от условий возделывания. Как правило, данные культуры возделываются на легких по механическому составу почвах с целью повышения качества сепарации и снижения тягового сопротивления уборочной машины при извлечении корнеплодов из почвы.

При уборке корнеплодов для повышения качества сепарации очень важно поддерживать почву в рыхлом (вспушенном) состоянии.

При подкапывании корнеплодов происходит совместное поступление на сепарирующие рабочие органы прочных почвенных комков, которые являются трудноотделимыми с щелевых рабочих органов уборочных машин и способствуют повреждению корнеплодов при взаимодействии с комками почвы [2], что приводит к ухудшению товарных качеств производимой продукции.

Наиболее распространенными корнеизвлекающими рабочими органами машин для уборки корнеплодов и лука являются подкапывающие лемехи.

Основным недостатком данных рабочих органов является повышенный забор почвенного пласта совместно с корнеплодами, что приводит к снижению качественных показателей сепарации товарной продукции на очистительных рабочих органах [3].

Альтернативой подкапывающим рабочим органам являются теребильные рабочие органы. Технологический процесс их работы характеризуется сниженным извлечением почвенных комков совместно с корнеплодами; однако данные рабочие органы обладают повышенными потерями извлекаемой продукции, т. к. при уборке некоторых видов овощных корнеплодов и лукович происходит отмирание ботвы и, как следствие, объект захвата теребильным рабочим органом отсутствует.

Предпосылкой для разрешения возникшей противоречивой ситуации является оснащение сепарирующих поверхностей уборочных машин различными видами интенсификаторов сепарации, которые при увеличении полноты отделения корнеплодов от почвенно-растительных примесей также повышают степень повреждения сепарируемой продукции.

Целью работы является повышение качества сепарации корнеплодов, луко-

виц и картофеля на прутковом элеваторе с асимметрично установленными встряхивателями.

Обзор литературы

Анализ конструкций существующих машин для уборки корнеплодов и лука и изучение патентно-технической литературы позволили выявить недостатки в конструкции сепарирующих рабочих органов машин для уборки корнеплодов и лукович [4], которые не позволяют обеспечить качественное выполнение технологического процесса сепарации товарной продукции.

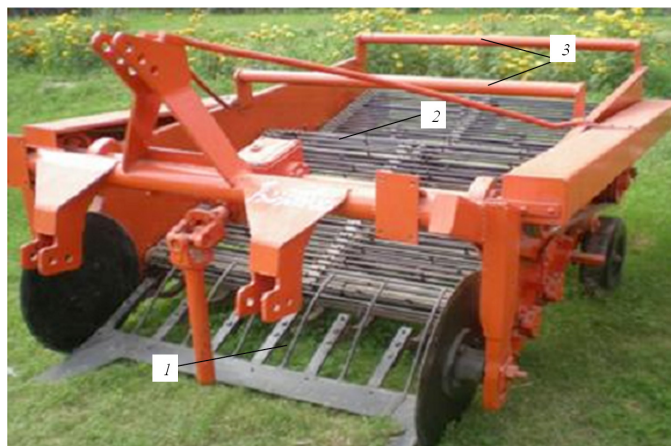
Существует машина для уборки картофеля [5], состоящая из основных элементов, а именно подкапывающего лемеха 1, сепарирующего пруткового элеватора 2 и поддерживающих стержней 3 (рис. 1).

Основной отличительной особенностью представленной выше уборочной машины является исполнение подкапывающего рабочего органа 1 (рис. 2) и сепарирующего пруткового элеватора 3 (рис. 3).

Подкапывающий рабочий орган представляет собой комбинацию рыхлительного (1) и подкапывающего (2) элементов с щелевыми отверстиями предварительной сепарации 3, образованными рабочей поверхностью подкапывающего элемента 2.

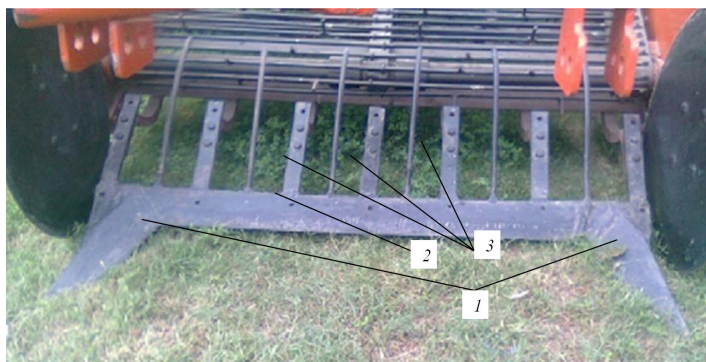
Рыхлительный элемент (1) подкапывающего рабочего органа осуществляет предварительное рыхление подкапываемого почвенного пласта с целью сокращения поступления почвенных комков на сепарирующие рабочие органы, интенсифицируя процесс очистки корнеплодов от соизмеримых почвенных комков, а также снижая величину повреждений товарной продукции от соударений с почвенными комками на прутковом элеваторе уборочной машины.

Подкапывающий элемент 2 осуществляет извлечение корнеплодов из почвы с предварительной сепарацией через щелевые отверстия предварительной сепарации 3.



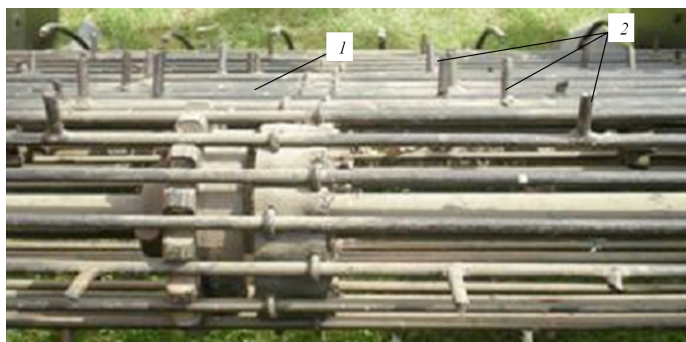
Р и с. 1. Общий вид машины для уборки корнеплодов: 1 – подкапывающий орган; 2 – сепарирующий прутковый элеватор; 3 – поддерживающие стержни

F i g. 1. General view of a machine for harvesting root crops:
1 – scrounging; 2 – separating rod elevator; 3 – supporting rods



Р и с. 2. Общий вид подкапывающего органа: 1 – рыхлительный элемент; 2 – подкапывающий элемент; 3 – щелевые отверстия предварительной сепарации

F i g. 2. General view of the digging body: 1 – ripping element;
2 – digging element; 3 – slotted preseparation apertures



Р и с. 3. Общий вид сепарирующего пруткового элеватора: 1 – пруток; 2 – стержень

F i g. 3. General view of the separating rod elevator: 1 – bar; 2 – kernel

К недостаткам данного подкапывающего органа следует отнести повышенные потери корнеплодов через щелевые отверстия 3 подкапывающего элемента 2; кроме того, данное конструктивное исполнение подкапывающего рабочего органа не снижает величину повреждений сепарируемой продукции на прутковом элеваторе ввиду недостаточного рыхления почвенного слоя расположения корнеплодов.

Для интенсификации процесса сепарации вороха корнеплодов сепарирующая поверхность пруткового элеватора выполнена с расположенными на прутках 1 стержнями 2 (рис. 3).

Основным назначением стержней является разрушение почвенных комков, поступающих с подкапывающего рабочего органа уборочной машины. Однако, кроме процесса разрушения непосредственно почвенных комков, происходит интенсивное силовое воздействие стержней 2 на корнеплоды, что повышает степень повреждения сепарируемой продукции.

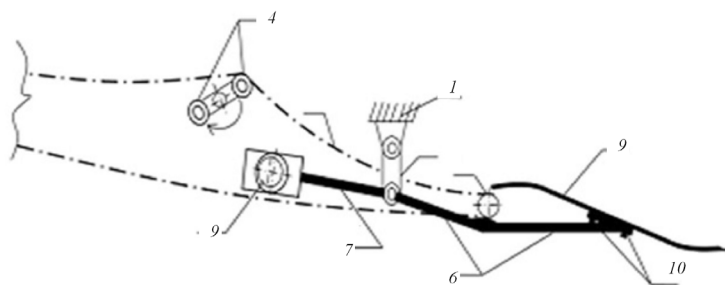
Известна конструкция сепарирующего пруткового элеватора (рис. 4), интенсификатором сепарации в котором является пассивный двухплечико-

вый встряхиватель 4, расположенный под верхней ветвью полотна пруткового элеватора 3 [6].

Кроме того, передняя часть полотна пруткового элеватора со стороны подкапывающего лемеха 9 совершает колебания в вертикальной плоскости при воздействии кронштейна крепления 6 подкапывающего лемеха 9 на поддерживающий ролик 5, что обеспечивает дополнительное силовое воздействие на почвенный пласт и тем самым интенсифицирует процесс сепарации почвенно-растительных примесей.

К недостаткам данной конструкции пруткового элеватора следует отнести повышенное повреждение корнеплодов при переходе с одного каскада на другой, а также невозможность рассредоточения вороха корнеплодов по всей ширине транспортера.

Анализ технических средств механизированной уборки корнеплодов позволяет сделать вывод о том, что функционирующие элементы уборочной машины с различными типами интенсификаторов сепарации не обеспечивают качественные показатели уборки корнеплодов по таким показателям, как полнота сепарации и повреждение корнеплодов.



Р и с. 4. Схема сепарирующего пруткового элеватора:

- 1 – рама; 2 – тяга; 3 – прутковый элеватор; 4 – двухплечиковый встряхиватель;
5 – поддерживающий ролик; 6 – кронштейн крепления;
7 – промежуточный кронштейн; 8 – эксцентриковый вал; 9 – подкапывающий лемех;
10 – крепление лемеха

F i g. 4. The scheme of separating bar elevators: 1 – frame; 2 – thrust; 3 – bar elevator;
4 – double-shoulder shaker; 5 – support roller; 6 – mounting bracket;
7 – intermediate bracket; 8 – eccentric shaft; 9 – scrounging; 10 – bracing

Материалы и методы

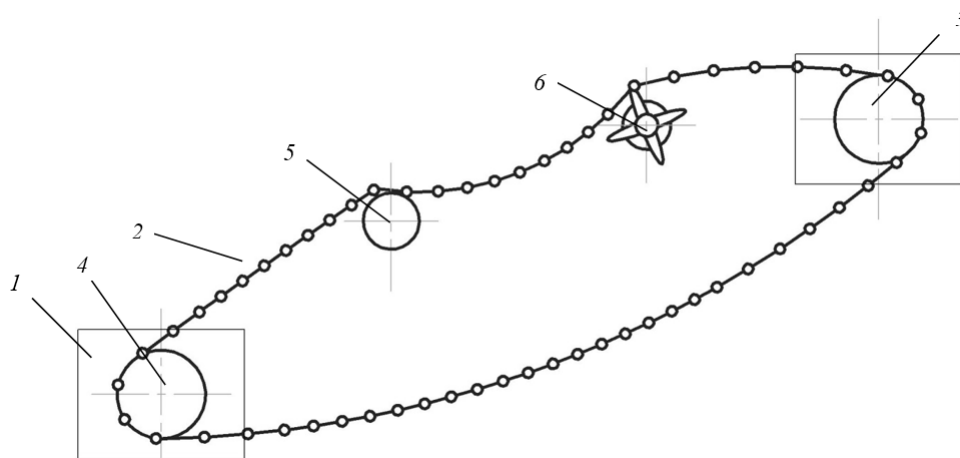
Исследования проведены в соответствии с методикой СТО АИСТ 8.7-2013 «Испытания сельскохозяйственной техники. Машины для уборки овощных и бахчевых культур. Методы оценки функциональных показателей»¹.

Для обеспечения качественных показателей сепарации корнеплодов и луковиц разработан сепарирующий транспортер корнеклубнеуборочной машины (патент РФ на изобретение № 2638190 [7–9]), изображенный на рис. 5.

Сепарирующий транспортер машины для уборки корнеплодов и лука содержит раму 1 с прутковым элеватором 2, под верхней ветвью которого установлены ведущие 3, ведомые 4 и поддерживающие 5 ролики и встряхиватели 6. Встряхиватели 6 и поддерживающие ролики 5 расположены по обеим сторонам пруткового элевато-

ра с чередованием по длине и ширине и несовпадением фаз их подъема и опускания противоположных сторон пруткового элеватора 2.

При данном расположении встряхивателей 6 и поддерживающих роликов 5 на сепарирующем транспортере обеспечивается щадящий режим сепарации корнеплодов при повышении качества сепарации в результате увеличения пути и времени взаимодействия корнеплодов с поверхностью пруткового элеватора 2 за счет бокового перемещения сепарируемого продукта при минимальном повреждении. Данное обстоятельство обеспечивается режимом работы встряхивателей 6, расположенных под противоположными сторонами пруткового элеватора 2 в противофазе. При этом ворох корнеплодов и луковиц совершает перемещение с противоположных сторон расположения встряхивателей 6 под прутковым элеватором 2 к стороне



Р и с. 5. Схема сепарирующего пруткового элеватора с асимметричным расположением встряхивателей: 1 – рама; 2 – прутковый элеватор; 3 – ведущий ролик; 4 – ведомый ролик; 5 – поддерживающий ролик; 6 – встряхиватель

Fig. 5. The scheme of a separating rod elevator with asymmetrical arrangement of shakers: 1 – frame; 2 – bar elevator; 3 – driving roller; 4 – driven roller; 5 – support roller; 6 – shaker

¹ СТО АИСТ 8.7-2013. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины для уборки овощных и бахчевых культур. Методы оценки функциональных показателей. М., 2014. III, 81 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/555625983>

расположения поддерживающих роликов 5 (рис. 6).

Сепарирующий транспортер корнеклубнеуборочной машины работает следующим образом. Ворох корнеплодов с подающего транспортера или с подкапывающего рабочего органа поступает на прутковый элеватор 2. По мере продвижения вороха по прутковому элеватору 2 происходит подъем стороны 7 пруткового элеватора 2 встряхивателем 6. Подъем и дальнейшее перемещение вороха достигается в результате приобретения ускорения, сообщаемого встряхивателем 6 прутковому элеватору 2, которое больше ускорения свободного падения. В результате подъема встряхивателем 6 стороны пруткового элеватора 2 и опускания противоположной стороны ворох корнеплодов совершает перемещение от стороны расположения встряхивателей 6 к стороне расположения поддерживающих роликов 5, что обеспечивает смещение вороха к центру пруткового элеватора 2 под углом α к горизонту и приводит к деформации почвенного пласта путем его излома и разрыхления, а также равномерному распределению вороха по всей ширине рабочей поверхности пруткового элеватора 2 и улучшению процесса сепарации. Для определения качественных показателей сепарации вороха корнеплодов, а именно луковец

лука-севка сорта «Штутгартен Ризен», на прутковом элеваторе с установленными пассивным эллиптическим встряхивателем и поддерживающим роликом была изготовлена лабораторная установка, общий вид которой представлен на рис. 7.

Определены следующие качественные показатели сепарации:

- повреждения луковец лука-севка (формула 1);

- полнота сепарации вороха лука-севка [10].

Повреждения луковец определялись по формуле:

$$\Pi = \frac{G_{\text{пов}}}{G_{\text{ст}} - G_{\text{пов}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

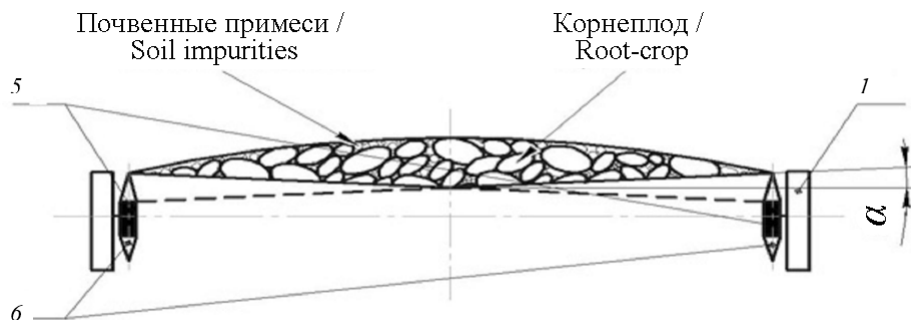
где $G_{\text{пов}}$ – масса поврежденных стандартных луковец в ворохе, кг; $G_{\text{ст}}$ – масса сепарируемых луковец в ворохе, кг.

Полноту сепарации вороха лука-севка определяли по формуле:

$$v = \frac{v_{\text{п}}^{\text{и}} - v_{\text{п}}^{\text{к}}}{v_{\text{п}}^{\text{и}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

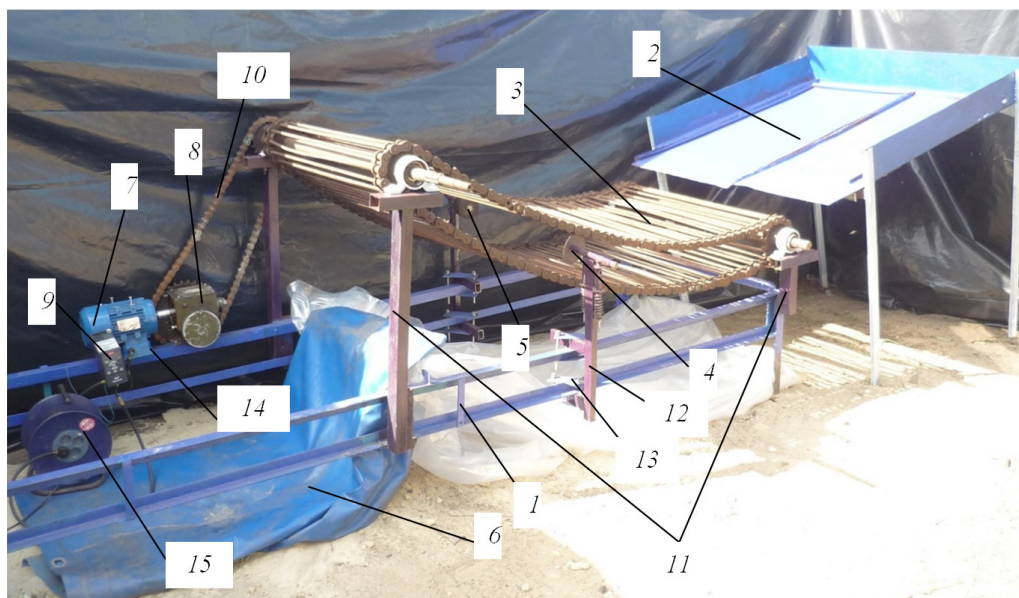
где $v_{\text{п}}^{\text{и}}$ – масса почвенных примесей в исходном ворохе, кг; $v_{\text{п}}^{\text{к}}$ – масса почвенных примесей в контейнере (невыведенные примеси), кг.

Состав вороха и основные физико-механические свойства его компонен-



Р и с. 6. Технологический процесс работы сепарирующего пруткового элеватора с асимметричным расположением встряхивателей

F i g. 6. Technological process of work scheme of a separating rod elevator with asymmetrical arrangement of shakers



Р и с. 7. Общий вид лабораторной установки для определения влияния технологических параметров сепарирующего пруткового элеватора с асимметричным расположением встряхивателей на качественные показатели сепарации вороха лука-севка: 1 – рама; 2 – емкость для предварительного размещения вороха; 3 – сепарирующий прутковый элеватор; 4 – эллиптический встряхиватель; 5 – цилиндрический ролик; 6 – брезент сепарированной продукции; 7 – электродвигатель; 8 – редуктор одноступенчатый; 9 – преобразователь частотный; 10 – передача цепная; 11 – стойки опорные; 12 – стойки встряхивателей; 13 – кронштейн соединительный; 14 – плита опорная; 15 – фильтр сетевой

F i g. 7. General view of the laboratory installation for determining the influence of the technological parameters of a separating rod elevator with the asymmetric arrangement of the shakers on the qualitative indicators of heap separation: 1 – frame; 2 – container for preliminary placement of heaps; 3 – separating rod elevator; 4 – elliptical shaker; 5 – cylindrical roller; 6 – canvas of separated products; 7 – electric motor; 8 – single-stage reducer; 9 – frequency converter; 10 – transmission chain; 11 – support pillars; 12 – shaker stands; 13 – bracket connecting; 14 – support plate; 15 – network filter

тов были выбраны с учетом результатов полевых исследований, проведенных в 2015–2016 гг. в АО «Озеры» (Московская область) при влажности почвы 18 %: луковицы лука-севка – 65 %; примеси – 35 %, в т. ч.:

- растительные примеси – 5 %;
- мелкие почвенные примеси – 15 %;
- комки почвы, сравнимые по размерам со стандартной фракцией луковиц лука-севка (поперечный размер) – 10 %;
- комки почвы, имеющие больший поперечный размер – 5 %.

С целью определения уровня значимости каждого фактора, оказывающего влияние на выбранный критерий оптимизации – полноту сепарации вороха лука-севка – проводился отсеивающий эксперимент.

Выявление небольшого количества наиболее значимых факторов позволило облегчить дальнейшее изучение и описание процесса сепарации экспериментальным прутковым элеватором, которые могут быть проведены с применением методов математической теории планирования эксперимента.

После проведения отсеивающего эксперимента были поставлены поисковые опыты по определению наиболее перспективного вида встряхивающего устройства, обеспечивающего высокие качественные показатели сепарации. С этой целью под полотном пруткового элеватора установлены исследуемые встряхиватели, а именно трехкулачковые и эллиптические, и проведены исследования в соответствии с планом эксперимента.

Результаты исследования

Анализ результатов отсеивающих экспериментов проведен путем построения диаграмм рассеяния. Результаты проведения отсеивающего эксперимента после внесения корректировок представлены на рис. 8.

Все факторы с уровнями их варьирования нанесены по оси абсцисс, опытные значения критерия оптимизации – по оси ординат. Визуальным наблюдением по количеству выделяющихся точек на диаграмме рассеяния оценивался уровень влияния фактора на критерий оптимизации, по результатам проведения которого были выбраны три основных значимых фактора: x_1 – поступательная скорость движения прут-

кового элеватора, м/с; x_2 – подача вороха лука-севка, кг/с; x_3 – межосевое расстояние между пассивным встряхивателем и поддерживающим роликом, м.

Результаты проведенных поисковых исследований представлены в табл. 1 и 2 и на рис. 9.

Анализ проведенных поисковых исследований позволяет заключить, что с увеличением поступательной скорости движения пруткового элеватора происходит повышение полноты сепарации и повреждений луковиц вне зависимости от подачи вороха лука-севка и используемого вида встряхивателя.

Однако качественные показатели сепарации вороха лука-севка на прутковом элеваторе с эллиптическими встряхивателями выше, чем у элеватора, оснащенного трехкулачковыми встряхивателями.

Данная тенденция наблюдается как при увеличении скорости движения пруткового элеватора в интервале от 1,4 до 1,8 м/с, так и при увеличении подачи вороха от 15 до 40 кг/с по полноте сепарации вороха до 3,5 % и повреждениям луковиц до 3,8 %.

Результаты проведенных поисковых исследований отражают перспектив-

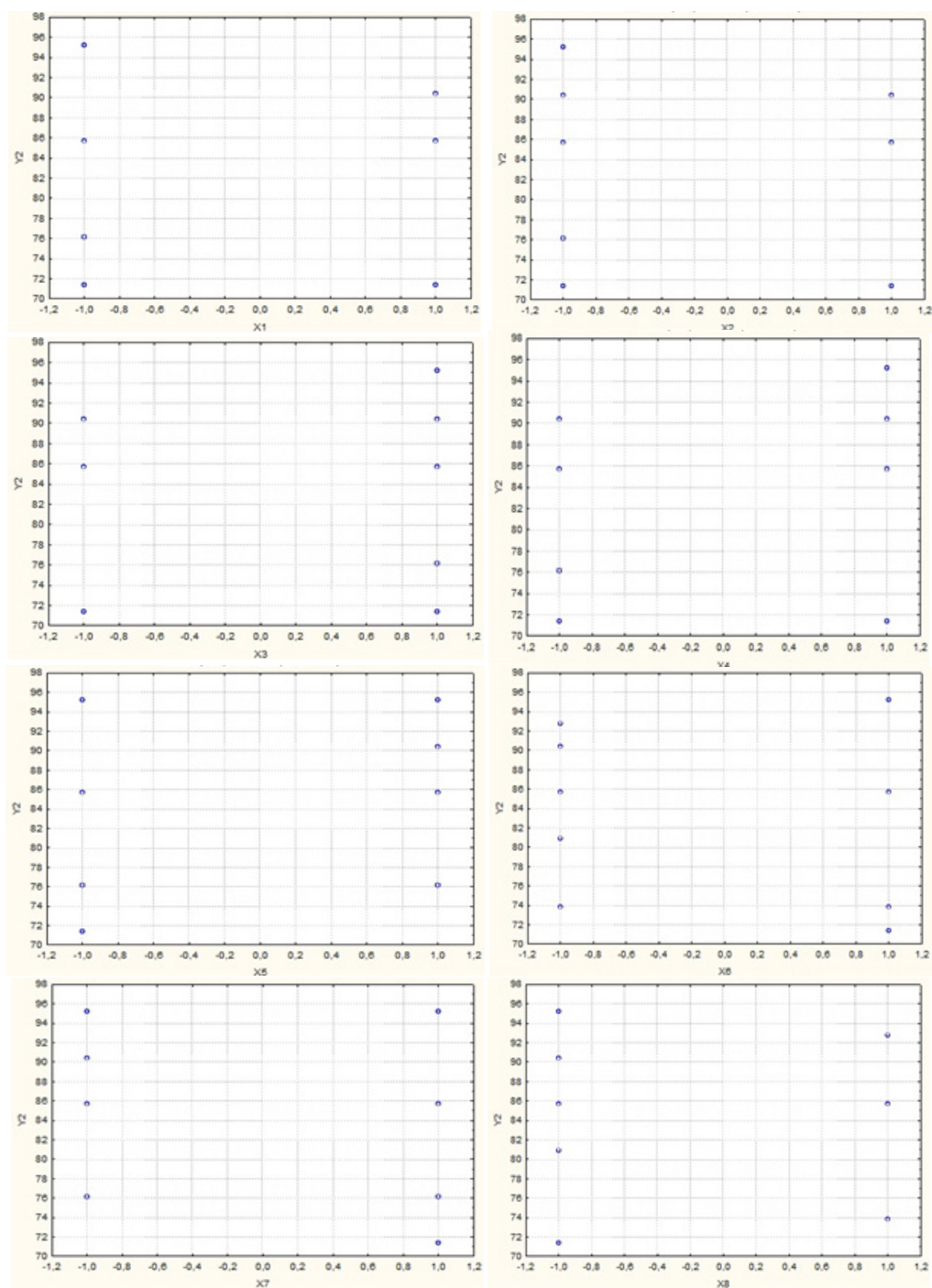
Таблица 1

Table 1

Результаты поисковых исследований по определению повреждений луковиц лука-севка в зависимости от типа встряхивателя, расположенного под прутковым элеватором

The results of exploratory studies to determine the damage of onions, depending on the type of shaker, located under the bar elevator

Подача вороха лука- севка, кг/с / Giving of lots of onions, kg/s	Сепарирующий прутковый элеватор / Separating bar elevator					
	Эллиптический встряхиватель / Elliptical shaker			Трехкулачковый встряхиватель / Three-cam shaker		
	Поступательная скорость движения пруткового элеватора, м/с / The progressive speed of the movement of the rod elevator, m/s					
	1,4	1,6	1,8	1,4	1,6	1,8
15	1,7	3,0	3,3	2,6	3,3	3,3
20	1,3	2,8	3,0	2,2	2,7	3,0
25	1,2	2,8	3,0	2,0	2,4	3,0
30	1,5	2,7	2,4	1,7	1,8	2,4
35	1,5	2,2	2,3	1,4	1,3	2,3
40	1,2	2,2	2,2	1,2	1,2	2,2



Р и с. 8. Диаграммы рассеяния результатов наблюдений после корректировок

F i g. 8. The diagrams of scattering of observation results after adjustments

**Результаты поисковых исследований по определению полноты
сепарации вороха лука-севка в зависимости от типа встряхивателя,
расположенного под прутковым элеватором**

**The results of exploratory studies to determine the completeness of separation
of seed onion heap, depending on the type of a shaker, located under the bar elevator**

Подача вороха лука-севка, кг/с / Giving of lots of onions, kg/s	Сепарирующий прутковый элеватор / Separating bar elevator					
	Эллиптический встряхиватель / Elliptical shaker			Трехкулачковый встряхиватель / Three-cam shaker		
	Поступательная скорость движения пруткового элеватора, м/с / The progressive speed of the movement of the rod elevator, m/s					
	1,4	1,6	1,8	1,4	1,6	1,8
15	96,4	96,7	97,4	94,3	95,8	96,2
20	96,0	96,3	97,4	94,0	94,6	96,0
25	95,7	96,0	97,3	93,5	94,7	95,0
30	95,3	96,2	96,7	93,2	93,4	94,6
35	95,0	96,0	96,4	93,2	93,0	94,6
40	95,0	95,5	96,1	92,6	92,5	94,5

ность дальнейшего изучения эллиптических встряхивателей по повышенному показателю качества сепарации вороха лука-севка и минимальным повреждениям луковиц.

Результаты многофакторного эксперимента обрабатывались в компьютерной программе «STATISTICA 6.0»; были получены значения функций отклика – полнота сепарации вороха лука-севка при варьировании факторов – и адекватная математическая модель (формула 3), описывающая зависимость качества сепарации вороха лука-севка $v = f(v_{эл}, Q_{Бп}, S)$ в закодированном виде от выбранных факторов:

$$Y = 98,59 + 0,21x_1 - 0,26x_2 - 0,35x_3 - 0,81x_1^2 - 0,71x_2^2 - 0,38x_3^2 + 0,02x_1x_2 + 0,29x_1x_3 - 0,5x_2x_3. \quad (3)$$

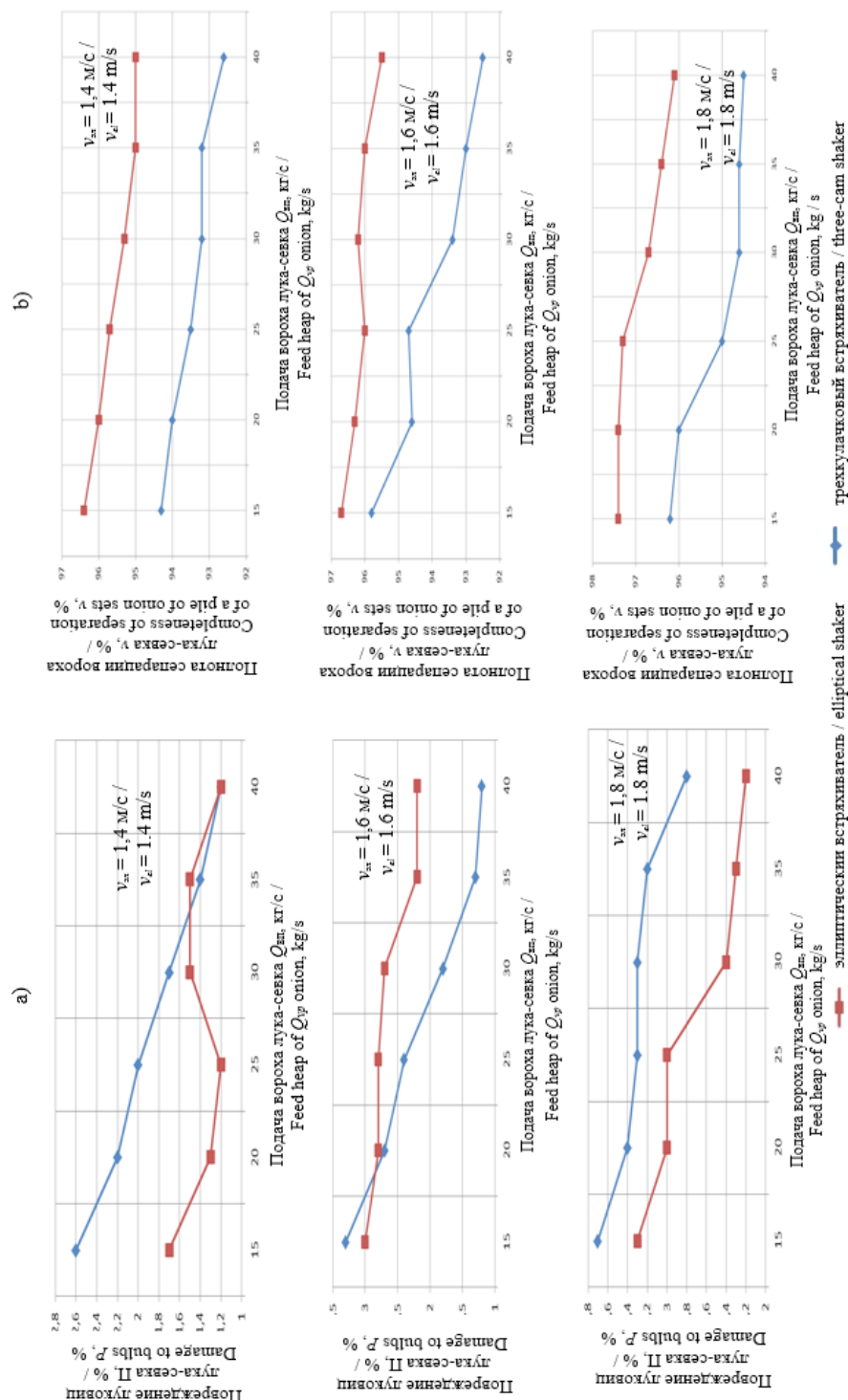
Подставляя попеременно значения $x_1, x_2, x_3 = 0$ в уравнение (3), получаем двумерные сечения поверхности отклика, характеризующего показатель качества сепарации вороха лука-севка в зависимости от выбранных факторов, представленный системой уравнений:

$$\begin{cases} x_1 = 0 : Y = 98,59 - 0,26x_2 - 0,35x_3 - 0,71x_2^2 - 0,38x_3^2 - 0,5x_2x_3, \\ x_2 = 0 : Y = 98,59 + 0,21x_1 - 0,35x_3 - 0,81x_1^2 - 0,38x_3^2 + 0,29x_1x_3, \\ x_3 = 0 : Y = 98,59 + 0,21x_1 - 0,26x_2 - 0,81x_1^2 - 0,71x_2^2 + 0,02x_1x_2. \end{cases} \quad (4)$$

При дифференцировании системы уравнений (4) определяем координаты центра поверхности отклика в зависимости от выбранных факторов в закодированном и раскодированном видах (табл. 3), после подстановки которых получаем значения функции отклика в центре поверхности. Двухмерные сечения поверхности отклика строились на основании данных из табл. 1 и представлены на рис. 10–12.

Уравнение (4) с учетом значимости коэффициентов регрессии можно представить в следующем виде:

$$Y = 17,387 + 60,43v_{эл} + 2,77Q_{Бп} + 40,75S - 20,31v_{эл}^2 - 0,02Q_{Бп}^2 - 38,75S^2 - 0,02v_{эл}Q_{Бп} + 15,2v_{эл}S - 1,32Q_{Бп}S. \quad (5)$$



Р и с. 9. Зависимость качественных показателей сепарации вороха лука-севка почвой от типа встряхивателя:

а) повреждение луковиц лука-севка; б) полнота сепарации вороха луковиц лука-севка

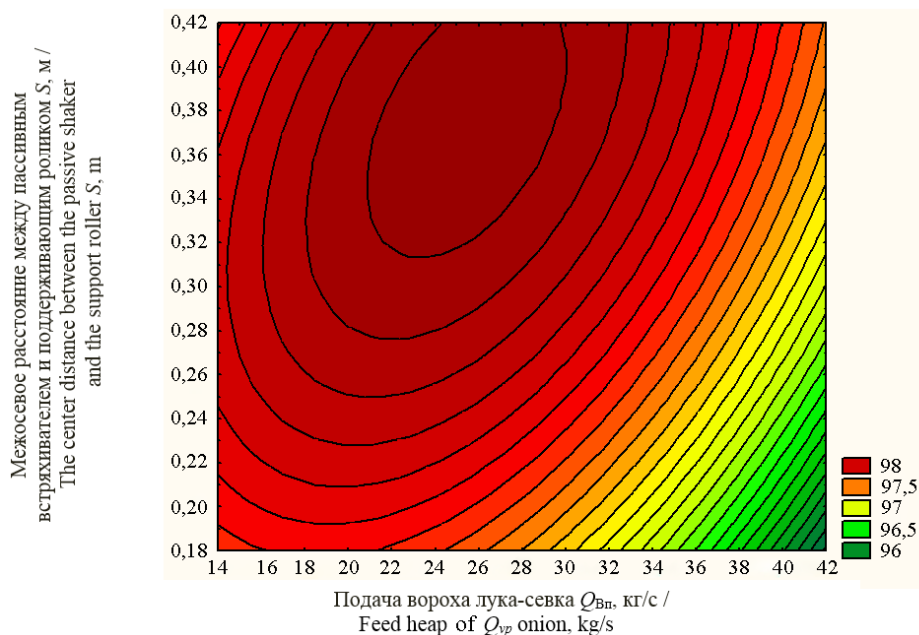
Fig. 9. Dependence of quality indicators of separation of a pile of onions by soil on the type of shaker:

а) damage to onions; б) completeness of separation of seed onion heap

Координаты центра поверхности отклика

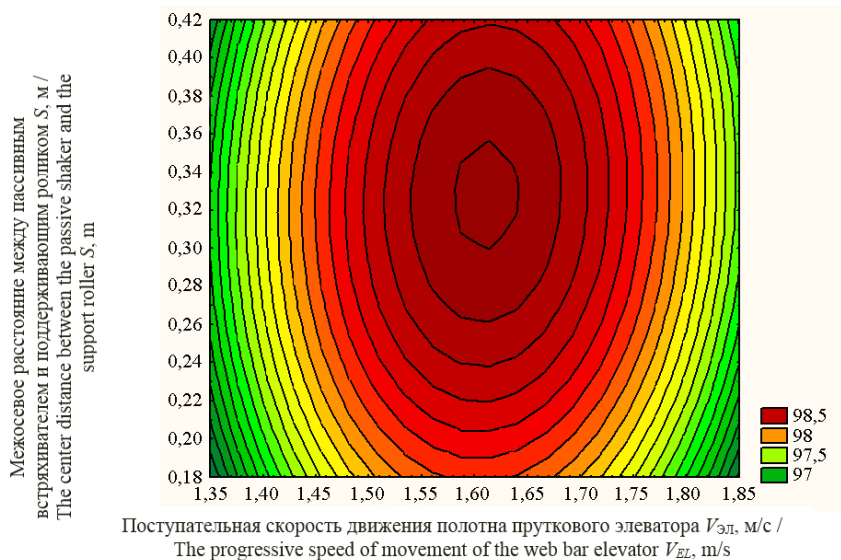
The center coordinates of the response surface

Координаты центра поверхности отклика / Coordinates of the response surface center		Функции отклика в центре поверхности / Response functions in the center of the surface
Закодированный вид / Encoded view	Раскодированный вид / Decoded view	
$x_2 = 0,349$	$Q_{\text{Вн}} = 21,69 \text{ кг/с} / Q_{\text{вп}} = 21.69 \text{ kg/s}$	$Y_s = 98,55$
$x_3 = 0,472$	$S = 0,37 \text{ м} / S = 0.37 \text{ m}$	
$x_1 = 0,05$	$v_{\text{эл}} = 1,63 \text{ м/с} / v_{\text{EL}} = 1.63 \text{ m/s}$	$Y_s = 98,68$
$x_3 = 0,445$	$S = 0,33 \text{ м} / S = 0.33 \text{ m}$	
$x_1 = 0,13$	$v_{\text{эл}} = 1,62 \text{ м/с} / v_{\text{EL}} = 1.62 \text{ m/s}$	$Y_s = 98,51$
$x_2 = 0,18$	$Q_{\text{Вн}} = 23,8 \text{ кг/с} / Q_{\text{вп}} = 23.8 \text{ kg/s}$	



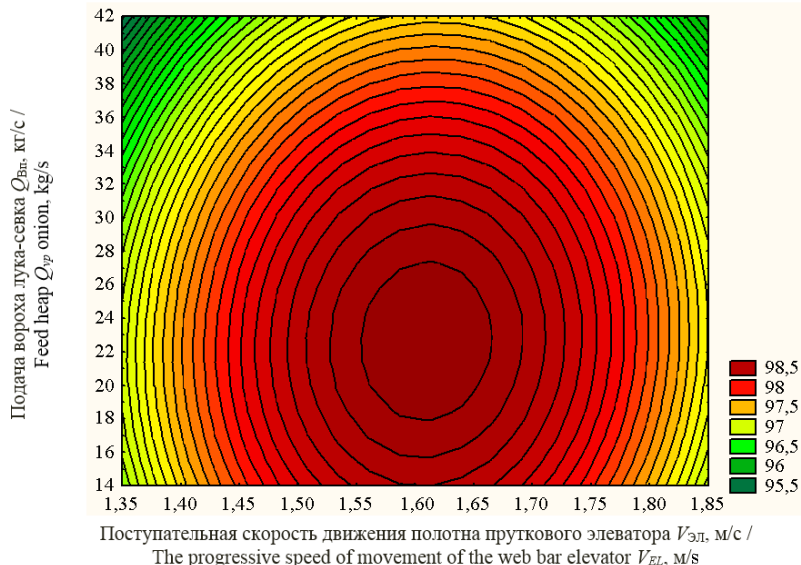
Р и с. 10. Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость полноты сепарации вороха лука-севка от подачи вороха лука-севка (кг/с) и межосевого расстояния между пассивным встряхивателем и поддерживающим роликом (м)

Fig. 10. Two-dimensional cross-section of the response surface, characterizing the dependence of the completeness of the onion-seed separation from the infeed of the onion-seed heap (kg/s) and the interaxial distance between the passive shaker and the supporting roller (m)



Р и с. 11. Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость полноты сепарации вороха лука-севка от поступательной скорости движения полотна пруткового элеватора (м/с) и межосевого расстояния между пассивным встряхивателем и поддерживающим роликом (м)

Fig. 11. Two-dimensional cross-section of the response surface, characterizing the dependence of the completeness of the seed onion heap separation from the translational velocity of the web of the rod elevator (m/s) and the interaxial distance between the passive shaker and supporting roller (m)



Р и с. 12. Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость полноты сепарации вороха лука-севка от поступательной скорости движения полотна пруткового элеватора (м/с) и подачи вороха лука-севка (кг/с)

Fig. 12. Two-dimensional cross-section of the response surface, characterizing the dependence of the completeness of the onion-shear separation from the translational velocity of the web of the rod elevator (m/s) and the feeding of the onion-seed heap (kg/s)

Обсуждение и заключение

Результаты экспериментальных лабораторных исследований сепарирующего пруткового элеватора с асимметрично установленными пассивным эллиптическим встряхивателем и поддерживающим роликом позволяют сделать выводы о том, что максимальная полнота

сепарации вороха лука-севка составляет 98 % при поступательной скорости движения полотна пруткового элеватора $v_{эл} = 1,55–1,68$ м/с, подаче вороха лука-севка $Q_{вп} = 19,7–27,1$ кг/с и межжосевом расстоянии между пассивным эллиптическим встряхивателем и поддерживающим роликом в пределах $S = 0,29–0,42$ м.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Haverkort A. J., Struik P. C. Potato in progress: science meets practice. Wageningen : Wageningen Academic Publishers, 2005. 366 p.
2. Mayer V., Vejchar D., Pastorková L. Measurement of potato tubers resistance against mechanical loading // Research in Agricultural Engineering. 2008. Vol. 54, Issue 1. P. 22–31. URL: <http://www.agriculturejournals.cz/publicFiles/00885.pdf>
3. Development of potato harvesting model / A. U. Dongre [et al.] // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2017. Vol. 4, Issue 10. P. 1567–1570. URL: <https://www.irjet.net/archives/V4/i10/IRJET-V4I10288.pdf>
4. Farhadi R., Sakenian N., Azizi P. Design and construction of rotary potato grader (Part I) // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2012. Vol. 18, no. 2. P. 304–314. URL: <http://www.agrojournal.org/18/02-21-12.pdf>
5. Design modification and field testing of groundnut digger / M. Tauseef Asghar [et al.] // Asian Journal of Science and Technology. 2014. Vol. 5, Issue 7. P. 389–394. URL: https://www.researchgate.net/publication/274373280_DESIGN_MODIFICATION_AND_FIELD_TESTING_OF_GROUNDNUT_DIGGER
6. Natenadze N. The design and theoretical justification of a vibratory digger shovel // Mechanization in Agriculture. 2016. Vol. 62, Issue 1. P. 9–11. URL: <http://stumejournals.com/journals/am/2016/1/9/pdf>
7. Сепарирующий транспортер корнеклубнеуборочной машины : пат. 2638190 Рос. Федерация : МПК A01 C11/02 / Сибирёв А. В. [и др.] ; заявитель и патентообладатель ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. № 2544631 ; заявл. 10.03.2017; опубл. 12.12.2017. Бюл. № 35. 8 с. URL: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2638190&TypeFile=html
8. Сибирёв А. В., Аксенов А. Г., Мосяков М. А. Обоснование конструктивных и технологических параметров сепарирующего пруткового транспортера с асимметричным расположением встряхивателей // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». 2018. № 4. С. 15–20. DOI: <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-4-15-20>
9. Сибирёв А. В., Аксенов А. Г., Дорохов А. С. Уточненный расчет сепарирующей поверхности машины для уборки лука // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2018. Т. 12, № 3. С. 28–31. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-3-28-31>
10. Ларюшин А. М. Качественные показатели выкапывающего устройства лукоуборочной машины // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2008. № 3. С. 46–47.

Поступила 09.01.2018; принята к публикации 23.07.2018; опубликована онлайн 29.03.2019

Об авторах:

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

Аксенов Александр Геннадьевич, заведующий, отдел технологий и машин в овощеводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат технических наук, ResearcherID: V-5572-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9546-7695>, 1053vim@mail.ru

Мосяков Максим Александрович, младший научный сотрудник, лаборатория разработки технологий и машин для обработки почвы, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ResearcherID: A-8482-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5151-7312>, mosyak88maks67@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. В. Сибирёв – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, подготовка начального варианта текста и формулирование выводов; А. Г. Аксенов – проведение критического анализа экспериментальных и теоретических исследований; М. А. Мосяков – литературный и патентный анализ, верстка и редактирование текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Haverkort A.J., Struik P.C. Potato in progress: science meets practice. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2005.
2. Mayer V., Vejchar D., Pastorková L. Measurement of potato tubers resistance against mechanical loading. *Research in Agricultural Engineering*. 2008; 54(1):22-31. Available at: <http://www.agriculture-journals.cz/publicFiles/00885.pdf>
3. Dongre A.U., Battase R., Dudhale S., Patil V.R., Chavan D. Development of potato harvesting model. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017; 4(10):1567-1570. Available at: <https://www.irjet.net/archives/V4/i10/IRJET-V4I10288.pdf>
4. Farhadi R., Sakenian N., Azizi P. Design and construction of rotary potato grader. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2012; 18(2):304-314. Available at: <http://www.agrojournal.org/18/02-21-12.pdf>
5. Asghar M.T., Ghafoor A., Munir A., Iqbal M., Ahmad M. Design modification and field testing of groundnut digger. *Asian Journal of Science and Technology*. 2014; 5(7):389-394. Available at: https://www.researchgate.net/publication/274373280_DESIGN_MODIFICATION_AND_FIELD_TESTING_OF_GROUNDNUT_DIGGER
6. Natenadze N. The design and theoretical justification of a vibratory digger shovel. *Mechanization in Agriculture*. 2016; 62(1):9-11. Available at: <http://stumejournals.com/journals/am/2016/1/9/pdf>
7. Sibiryov A.V., Aksenov A.G., Kolchin N.N., Ponomarev A.G., inventors. Federal State Budgetary Scientific Institution “Federal Scientific Agroengineering Center VIM”, assignee. Separating conveyor of the harvesting machine. RU Patent 2638190. 2017 Dec 12. Available at: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2638190&TypeFile=html (In Russ.)
8. Sibiryov A.V., Aksenov A.G., Mosyakov M.A. Determining design and technological parameters of the separating rod conveyor with asymmetrical shakers. *Vestnik Federalnogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya «Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V. P. Goryachkina»* = Vestnik of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education “Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin”. 2018; 4:15-20. DOI: <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-4-15-20> (In Russ.)
9. Sibirev A.V., Aksenov A.G., Dorokhov A.S. Proximate design of onion harvester separating surface. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2018; 12(3):28-31. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-3-28-31> (In Russ.)



10. Laryushin A.M. Qualitative indicators of the digging device of an onion harvesting machine. *Traktory i selskokhozyaystvennyye mashiny* = Tractors and Agricultural Machines. 2008; 3:46-47. (In Russ.)

Received 09.01.2018; revised 23.07.2018; published online 29.03.2019

About authors:

Alexey V. Sibirev, Senior Researcher, Chair of Technology and Machines in Vegetable Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5^{1st} Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: M-6230-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>, sibirev2011@yandex.ru

Aleksandr G. Aksenov, Head, Chair of Technology and Machines in Vegetable Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5^{1st} Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: V-5572-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9546-7695>, 1053vim@mail.ru

Maxim A. Mosyakov, Junior Researcher, Laboratory of Technology Development and Machines for Tillage, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5^{1st} Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), ResearcherID: A-8482-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5151-7312>, mosyak88maks67@mail.ru

Contribution of the authors:

A. V. Sibirev – scientific management, formulation of the basic research concept, preparation of the initial text version and drawing conclusions; A. G. Aksenov – critical analysis of experimental and theoretical studies; M. A. Mosyakov – literary and patent analysis, word processing and text editing.

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 629.3.025.2

DOI: 10.15507/2658-4123.029.201901.108-123



Синтез и изучение свойств стабилизатора металлического порошка в смазочной композиции

**В. В. Сафонов^{1*}, В. В. Остриков², В. В. Венскайтис¹,
К. В. Сафонов¹, А. С. Азаров¹**

¹ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный
университет им. Н. И. Вавилова» (г. Саратов, Россия)

²ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский
институт использования техники и нефтепродуктов
в сельском хозяйстве» (г. Тамбов, Россия)

*safonov2010sgau@yandex.ru

Введение. Современные технологии получения порошкообразных материалов позволяют получать частицы с размерами 0,1–0,5 мкм. Порошки с такой дисперсностью обладают очень высокой поверхностной энергией и, как следствие, уникальными свойствами. Данные порошки применяются в качестве добавок к моторному маслу как средство образования поверхностной пленки с высокими трибологическими свойствами. Однако широкое применение ультра-наноразмерных порошкообразных материалов как добавок к маслу ограничивается их седиментацией и агрегацией частиц. В результате размеры кристаллов металла увеличиваются до нескольких десятков мкм и начинают задерживаться масляными фильтрами двигателей, что приводит к снижению их эффективности и даже к забиванию маслопроводящих каналов, а также схватыванию трущихся поверхностей деталей. Наиболее технически грамотным решением для придания смазочной композиции седиментационной устойчивости является использование химических стабилизаторов, образующих на поверхности частиц металла тончайшую пленку, которая не только препятствует агрегации частиц, но и длительное время удерживает их в суспензии во взвешенном состоянии.

Материалы и методы. В качестве стабилизаторов дисперсных металлических порошков в смазочных композициях применяются органические соединения различных классов. В статье приведены результаты анализа ряда стабилизаторов дисперсных металлических порошков и предложены новые составы: апиэзон МН, полиэтиленгликольсебацнат и товарный стабилизатор апиэзона Л. Описан синтез данных стабилизаторов и методика изучения их стабилизационной активности.

© Сафонов В. В., Остриков В. В., Венскайтис В. В., Сафонов К. В., Азаров А. С., 2019



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

Результаты исследования. Представлены результаты анализа стабилизационной активности разработанных препаратов в сравнении с базовым вариантом – олеиновой кислотой. Полученные данные показывают, что добавка сложного эфира этиленгликольсебацата не оказала стабилизирующего действия на смазочную композицию. Синтезированный препарат апиезон МН и товарный реагент апиезон L проявляют стабилизационные свойства в отношении металлических порошков смазочной композиции, сравнимые со свойствами олеиновой кислоты.

Обсуждение и заключение. Поскольку апиезоновые смазки представляют собой смесь углеводородов, их коррозионная активность значительно ниже, чем у олеиновой кислоты, поэтому их можно рекомендовать для практического использования.

Ключевые слова: смазочная композиция, ультрадисперсный порошок, стабилизатор, седиментационная устойчивость, углеводородный стабилизатор, апиезон, сложный эфир полиэтиленгликольсебацат, олеиновая кислота

Для цитирования: Синтез и изучение свойств стабилизатора металлического порошка в смазочной композиции / В. В. Сафонов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 1. С. 108–123. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.108-123>

The Synthesis and Study of Metal Powder Stabilizer Properties in Lubrication Compositions

V. V. Safonov^{1*}, V. V. Ostrikov², V. V. Venskaytis¹,
K. V. Safonov¹, A. S. Azarov¹

¹Saratov State Agrarian University named after N. I. Vavilov
(Saratov, Russia)

²All-Russian Research Institute for Use of Machinery
and Petroleum Products in Agriculture (Tambov, Russia)

*safonov2010sgau@yandex.ru

Introduction. Modern manufacturing technologies of powder materials allow obtaining particles sized 0.1–0.5 μm . Powders with such dispersion have a very high surface energy and, consequently, unique properties. Powders with a given size can be used as an additive to motor oil to form the surface film with high tribological properties. However, the widespread use of ultra-nanoscale powder materials as additives to motor oil limits sedimentation and aggregation of the particles. As a result, the dimensions of the metal crystals increase to dozens of microns and their particles are then retained by oil filters of engines that leads to efficiency decrease and even to clogging oil-conducting channels and to setting the friction surfaces of the parts. The most technically competent solution for increasing sedimentation resistance of the lubricant composition is the use of chemical stabilizers forming the thinnest film at the surface of metal particles, which not only hinders particle aggregation, but also keeps them suspended for a long time.

Materials and Methods. As stabilizers of dispersed metal powders in lubricant compositions, organic compounds of various classes are used. The analysis of several stabilizers of disperse metal powders is given in the paper and new compositions are proposed: apiezon MN, polyethylene glycol sebacate and commodity stabilizer apiezon L. The methods of stabilizers synthesis and examination of their activity are described.

Results. The stabilization activity of the developed preparations was compared to the basic version: oleic acid. Addition of the ester of ethylene glycol sebacate had no stabilizing effect on the lubricant composition. The synthesized MN and Mg reagent apiezon L show stabilizing properties with respect to metallic powders of the lubricant composition, comparable with the properties of oleic acid.

Discussion and Conclusion. Since apiezon greases are a mixture of hydrocarbons, their corrosivity is much lower than that of oleic acid, they can be recommended for practical use.

Keywords: lubricant composition, ultrafine powder, stabilizer, sedimentation stability, hydrocarbon stabilizer, apiezon, polyethylene glycol-colesebacin ester, oleic acid

For citation: Safonov V.V., Ostrikov V.V., Venskaytis V.V., Safonov K.V., Azarov A.S. The Synthesis and Study of Metal Powder Stabilizer Properties in Lubrication Compositions. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(1):108-123. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.108-123>

Введение

Использование мелкодисперсных металлических порошков в качестве наполнителей моторных масел с целью реметаллизации трущихся поверхностей началось в 70-х гг. XX в. Практическое применение подобных технологий стало возможным благодаря разработке процесса получения чрезвычайно мелких (нанокристаллических) частиц различных металлов и сплавов. Диспергирование металла производится либо конденсацией металлического газа в условиях искусственно созданного глубокого вакуума, либо методом ультразвукового диспергирования. Такие технологии позволяют получать частицы размером не более 0,3 мкм¹.

Известный способ получения устойчивых коллоидных растворов, содержащих стабилизированные порошки металлов с частицами размером 30–100 нм, представляет собой электрохимическое восстановление металла на катоде, в ультразвуковом поле и водно-органическом растворе электролита с растворимым анодом. Формирующиеся на электроде кластеры сбиваются с его поверхности ультразвуком и стабилизируются поверхностно-активным веществом [1; 2].

Существует технология получения ультра-нанодисперсного порошка методом плазменной перекомденсации, основанной на испарении крупнодисперсного порошка (сырья) или прутка необходимого металла в плазменном потоке с температурой до

6 000–8 000 °К и конденсации пара до требуемого размера. Полученные таким образом частицы характеризуются следующими параметрами: размер частиц – 0,01–0,03 мкм, удельная поверхность – 100–150 м²/г [3]. Частицы, сформированные в таких условиях, имеют строго сферическую форму и, вследствие этого, уникальные свойства. Механизм действия препарата основан на том, что частицы такого малого размера обладают очень высокой поверхностной энергией и, помещенные в моторное масло, легко взаимодействуют с трущимися деталями двигателя и мельчайшими частицами износа.

Нанокристаллические частицы попадают в дефект поверхности, притягиваются им и остаются на поверхности. Частицы обладают эффектом дальнего действия, т. е. притягивают к себе сверхтонкие частицы износа. В результате образуется слой с особой структурой, который обладает пластичностью и износостойкостью. Этот вновь образованный слой уменьшает и компенсирует износ в процессе эксплуатации. Регулярное применение автопрепаратов с ультра-нанодисперсными металлическими порошками позволяет увеличить ресурс двигателя минимум в 2 раза [4–6].

Наряду с порошками металлов, их механических смесей, оксидов, бинарных сплавов в качестве твердой фазы для смазочных композиций часто применяются ультра-наноразмерные порошки графита, алмазов, дисульфидов

¹ Елисеев А. А., Лукашин А. В. Функциональные наноматериалы ; под ред. Ю. Д. Третьякова. М. : Физматлит, 2010. 456 с.

молибдена и вольфрама, а также природных минералов.

Добавка Wagner Universal Micro-Ceramic Oil, применяемая в двигателях и механических коробках передач, содержит мельчайшие керамические частицы нитрида бора. Атомарный кондиционер металла Maximum Transmission for Diesel Truck для автоматических трансмиссий представляет собой двухкомпонентный продукт, который объединяет в себе ревитализант 3-го поколения и кондиционер металла. Средство формирует на рабочих поверхностях металлокерамическое покрытие, благодаря чему восстанавливается геометрия деталей, а также компенсируется износ деталей АКП [7–9].

Среди металлосодержащих добавок отечественного производства известны Кластер, РиМЕТ, Ресурс-Дизель, «Ремол», в состав которых введены высокодисперсные порошки мягких металлов (Cu, Pb, Sn, Ag, Zn, Au) и их сплавов [4–6; 10–12]. К препаратам, содержащим слоистые гидросиликаты магния (серпентины), относятся РВС, НИОД, АРТ, ТСК-М, СУПРОТЕК, Живой металл, RUTEC Reanimator, МЕГАФОРС, ЭДИАЛ, РВД, ХАДО, ТРИБО, SUPRO, Motor doctor.

В Саратовском аграрном университете разработаны составы приработочных, эксплуатационных и эксплуатационно-восстановительных смазочных композиций «Кластер». Применение приработочных добавок к маслу «Кластер-П» позволило сократить период обкатки, уменьшить начальный износ деталей, снизить часовой расход топлива; повысить противозадирную стойкость деталей, увеличить мощность двигателя [10]. Поверхностные слои, сформированные в процессе стендовой обкатки двигателей, сравнительно быстро изнашиваются в условиях реальной эксплуатации. Поэтому для данных условий были разработаны эксплуатационные смазочные композиции [11].

Эксплуатационные присадки представляют собой суспензию ультра-наноразмерных порошкообразных добавок легированных сплавов цветных металлов в моторном масле с добавлением необходимого количества ПАВ. В отличие от обкаточных составов, эксплуатационные смазочные композиции имеют более легкоплавкие фракции, что позволяет увеличить диапазон нагрузочно-скоростного и температурного режимов действия добавок. В результате проведения комплекса испытаний была разработана гамма эксплуатационных и эксплуатационно-восстановительных добавок к маслу «Кластер» [4–6; 10–12].

В результате взаимодействия ультра-наноразмерного порошка цветного металла с металлом деталей двигателя и частицами износа на поверхности деталей образуется защитный слой с ультрадисперсной структурой, способствующий повышению эксплуатационных показателей и долговечности двигателя.

Общей проблемой смазочных композиций с добавлением ультра-нанодисперсных металлических порошков является их седиментация и агрегация частиц. При увеличении размеров кристаллов металла или сплава до нескольких десятков мкм они начинают задерживаться масляным фильтром, и смазочная композиция не только теряет свою эффективность, но и может привести к забиванию маслопроводящих каналов и схватыванию трущихся поверхностей деталей. Кроме того, масляные фильтры центробежного типа разрушают суспензию за счет инерционных сил.

Наиболее значительна седиментация суспензии в период хранения препарата до эксплуатации и при длительном простое автотехники. Производители реметаллизантов рекомендуют перед непосредственным применением препарата энергично встряхивать флакон в течение 20–30 с, а сразу после взбалтывания влить содержимое флакона

в моторное масло через маслозаливную горловину двигателя и проверить наличие осадка, обнаруживаемого на дне флакона в случае недостаточно энергичного взбалтывания. При наличии осадка необходимо налить во флакон небольшое количество свежего моторного масла, снова энергично взболтать содержимое флакона или перемешать и влить суспензию в масло. Заливать препарат рекомендуют непосредственно перед поездкой, либо сразу после заливки запустить двигатель и дать ему поработать на холостом ходу в течение 7–10 мин. с целью равномерного распределения частиц препарата по всему объему масла.

Однако наиболее технически грамотным решением для придания смазочной композиции седиментационной устойчивости является использование химических стабилизаторов, образующих на поверхности частиц металла тончайшую пленку, которая не только препятствует агрегации частиц, но и длительное время удерживает их в суспензии во взвешенном состоянии.

Обзор литературы

Для стабилизации наночастиц серебра в гидрозолях используются низкомолекулярные стабилизаторы (в том числе катионные поверхностно-активные вещества, например, цитрат натрия [13; 14], а также природные или синтетические полимеры, в частности, поли-N-винилпирролидон [15–17]). Наиболее заметное место среди анионных полимеров занимают полимеры монокарбоновых кислот – полиакриловой и полиметакриловой [18–21] – или сополимеры этих кислот [22]. В научной литературе [23; 24] имеются сведения об использовании сополимеров дикарбоновой (малеиновой) кислоты для стабилизации различных наноразмерных материалов.

В качестве стабилизаторов дисперсных металлических порошков в смазочных композициях применяются органические соединения различных классов.

Известна металлоплакирующая смазка, в состав которой с целью повышения противозадирных и противоизносных свойств включены медный порошок и мыльная пластичная смазка. В качестве стабилизатора в данной смазке используется добавка 0,05–0,15 мас. % N-валерилсалициламида [25]. Однако из-за наличия мыльной композиции применение такой смазки для двигателей внутреннего сгорания невозможно.

Известна добавка в моторное масло, включающая минеральное масло, смесь порошков меди и свинца с частицами сферической формы диаметром 1,0–8,2 мкм и 1,0–2,7 мкм соответственно и жировую композицию в качестве стабилизатора [26]. Недостатком этой добавки является то, что при ее введении в моторное масло его окисляемость повышается на 11 %. Это может привести к снижению температурной стабильности граничных смазочных слоев и, как следствие, к повышению расхода масла.

В 1992 году группой авторов из научно-производственной фирмы «ВИРА» получены два патента на смазочные композиции «Ресурс-Дизель» [27] и «Ресурс-Форте» [28]. В качестве стабилизатора порошкообразного металлического наполнителя (никель, сплав никель-медь-фосфор, сплав медь-фосфор) в композиции «Ресурс-Дизель» использовались амиды общей формулы



где $\text{R} = \text{C}_{10}\text{H}_{21} \div \text{C}_{13}\text{H}_{27}$.

В смазочной композиции «Ресурс-Форте» стабилизатором является смесь N-метаноил-N-алканоилэтилендиаминов общей формулы



где $\text{R} = \text{C}_{10}\text{H}_{21} \div \text{C}_{13}\text{H}_{27}$.

Однако оба указанных стабилизатора в настоящее время не выпускаются.

Механизм действия традиционных стабилизаторов металлических

порошков заключается в следующем. Стабилизатор представляет собой соединение, молекула которого содержит как гидрофильный, так и гидрофобный фрагменты. Наиболее распространенными гидрофильными полярными группами являются карбоксильная группа $-\text{COOH}$, гидроксильная группа $-\text{OH}$, аминогруппа $-\text{NH}_2$, а также их функциональные производные, полученные замещением атома водорода в гидрофильной группе. Гидрофобные неполярные группы – это углеводородные радикалы либо жирного ряда (алкильные радикалы от C_{10} и выше), либо ароматической природы.

Засчет полярного фрагмента молекулы стабилизатора происходит химическое связывание с поверхностью наночастицы металла. Неполярная часть молекулы, растворимая в масле, образует своеобразную пленку на поверхности частицы, способствуя образованию дисперсной системы и препятствуя седиментации металла.

При всех достоинствах известных биполярных стабилизаторов, большинство из которых фактически представляет собой аналоги поверхностно-активных веществ, они обладают рядом существенных недостатков.

Во-первых, наличие гидрофильных групп заметно снижает растворимость стабилизатора в масле. Так, этилендиаминтетрауксусная кислота, октадециловый эфир триэтаноламина и другие потенциальные комплексообразователи малорастворимы в моторных маслах, что ограничивает поиск среди подобных соединений высокоэффективных стабилизаторов.

Во-вторых, наличие в молекуле стабилизатора кислотных функциональных групп (в первую очередь, карбоксильной, а также гидроксильной) делает стабилизатор коррозионно-опасной добавкой. Действительно, олеиновая кислота имеет при комнатной температуре незначительную величину константы диссоциации, однако при повы-

шении температуры до 90°C константа диссоциации увеличивается сразу на три порядка. При условии длительного воздействия на детали двигателя не исключена значительная коррозионная активность внесенного компонента.

Для поиска принципиально новых стабилизаторов нами предлагаются следующие два подхода.

Первый заключается в снижении полярности гидрофильного фрагмента молекулы стабилизатора с одновременным снижением константы диссоциации карбоксильной группы путем ее этерификации. Поскольку стабилизатор должен обладать достаточной температурной стабильностью и малой летучестью, предложено использовать для этих целей полимерный сложный эфир двухатомного спирта (этиленгликоля) и двухосновной карбоновой кислоты (адипиновой). При значительной относительной молекулярной массе (порядка 1 500–1 700) вещество обладает гидрофильным углеводородным фрагментом кислоты $(-\text{CH}_2-)_6$ и малополярным сложноэфирным фрагментом $-\text{COOCH}_2-$. Отсутствие свободных карбоксильных групп исключает коррозионное действие препарата.

Второй подход заключается в полном исключении из молекулы стабилизатора гидрофильного полярного фрагмента. Такой шаг кардинально решает проблему растворимости стабилизатора в масле и его коррозионной «лояльности». В качестве подобных стабилизаторов предлагается использовать жирноароматические углеводороды. Однако неясно, за счет чего предполагается координация с частицей металла. Координационным центром могут служить ароматические циклы углеводорода, обладающие высокой электронной плотностью на бензольных кольцах.

Материалы и методы

Для экспериментальной проверки теоретических предположений было принято решение синтезировать по

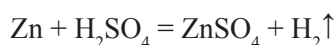
одному представителю обоих типов предлагаемых стабилизаторов, изучить их свойства по отношению к нанодисперсному порошку и в случае получения положительного результата подобрать промышленно выпускаемый аналог с эквивалентными структурой и свойствами.

Методика проведения экспериментальных исследований состоит из следующих этапов:

- синтез образцов стабилизаторов различной химической природы;
- получение смазочных композиций с ультра-нанометаллическим порошковым наполнителем методом ультразвукового диспергирования;
- изучение стабилизационных свойств синтезированных соединений и сравнение полученных результатов с наиболее распространенным поверхностно-активным веществом – олеиновой кислотой.

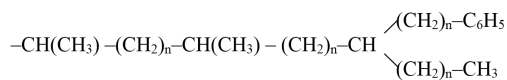
Синтез углеводородного стабилизатора апиезон МН проводили по следующей схеме. Неподвижная жидкая фаза для газо-жидкостной хроматографии апиезон М, выпускаемая фирмой MERCK (Германия), представляет собой смесь жирноароматических углеводородов, содержащих неопределенные этиленовые фрагменты. Непосредственно сам апиезон М непригоден для использования в качестве стабилизатора нанодисперсного порошка, поскольку при повышенных температурах работы двигателя в условиях каталитического действия металла будет происходить полимеризация вещества с последующим смолообразованием. Для предотвращения этого процесса принято решение прогидрировать двойные связи углеводородных цепей в мягких условиях молекулярным водородом в присутствии никелевого катализатора. Методика синтеза описана в научной литературе².

Образец препарата апиезон М (неподвижная жидкая фаза для газо-жидкостной хроматографии) массой 2,5 г растворяют в 50 мл тетрахлорметана и помещают в двугорлую колбу объемом 100 мл, снабженную барботажной трубкой и обратным холодильником. К раствору добавляют 0,5 г катализатора – порошка никеля Ренея. Суспензию нагревают на водяной бане до температуры 60 °С и в течение 2,5 ч через барботажную трубку пропускают из аппарата Киппа водород, получаемый в ходе реакции:



По окончании реакции порошок катализатора отделяют на фильтре Шотта. Полученный раствор переносят в колбу Вюрца и отгоняют растворитель, постепенно нагревая содержимое до 100 °С. Получают 2,5 г вязкой массы коричневого цвета – апиезон МН.

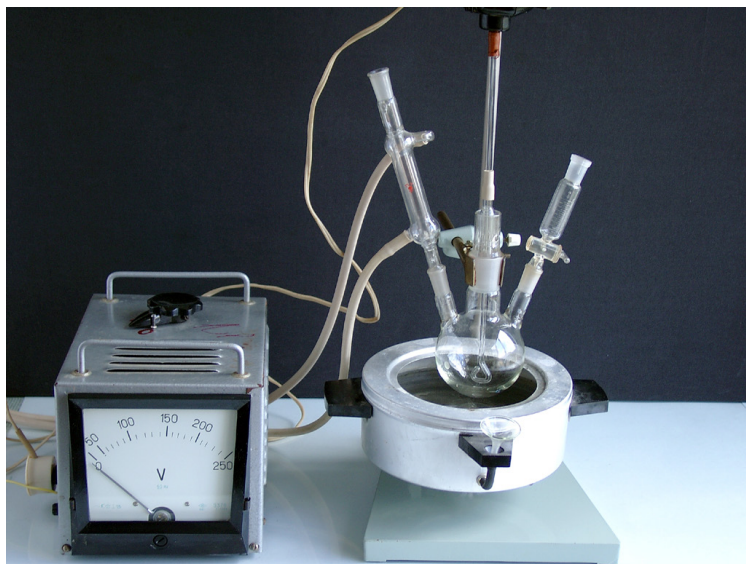
Структура полученного вещества может быть отражена следующей формулой:



Относительная молекулярная масса вещества – 950–1 000.

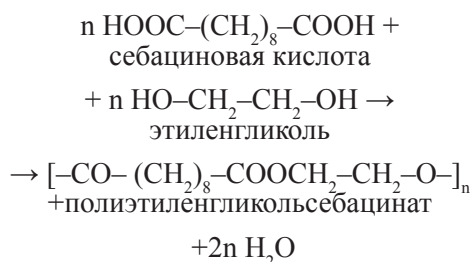
Синтез сложноэфирного стабилизатора полиэтиленгликольсебацата заключался в следующем: в трехгорлую круглодонную колбу объемом 500 мл, снабженную механической мешалкой, обратным холодильником и капельной воронкой (рис. 1), помещали раствор 20,2 г (0,1 моль) себаценовой кислоты в 200 мл этанола. Раствор нагревали на водяной бане до температуры 65 °С и в течение 1,5 ч при постоянном перемешивании добавляли по каплям раствор 6,2 г (0,1 моль) этиленгликоля в 100 мл этилового спирта. По окончании смешивания реагентов смесь про-

² Руководство по газовой хроматографии : в 2 ч. / Под ред. Э. Лейбница, Х. Г. Шруппе. М. : Мир, 1988. Ч. 2. 510 с. URL: <http://www.chromatogramma.ru/?q=articles/2010/07/03/rukovodstvo-po-gazovoi-khromatografii-pod-red-eleibnitsa-khg-shtruppe.html>



Р и с. 1. Лабораторная установка для получения стабилизатора
F i g. 1. The laboratory installation for stabilizer production

должали перемешивать при температу-
ре 70 °С в течение 2 ч.



Далее реакционную смесь перели-
вали в колбу Вюрца и отгоняли раство-
ритель, постепенно повышая температу-
ру до 100 °С. Образовавшуюся вязкую
массу выливали на металлический
лист или керамическую плитку и высу-
шивали в течение 72 ч. Затвердевший
полимер измельчали механическим
способом. Выход полиэтиленгликоль-
себацината составил 18,9 г (83 % от
теоретического).

Методика изучения стабилизацион-
ных свойств синтезированных соеди-
нений заключалась в следующем. На-
вески препаратов определенной массы
растворяли в известном объеме ди-

хлорметана. В химический стакан объ-
емом 500 мл помещали 400 мл базово-
го минерального масла М-10Г₂к ГОСТ
8581-78 и определенный объем раство-
ра стабилизатора. Смесь перемешивали
с помощью ультразвуковой установки
УЗГИ-05 до получения равномерного
раствора. К полученному раствору до-
бавляли 40 г порошкообразного метал-
лического наполнителя. Диспергирова-
ние ультразвуком проводили в течение
0,5 ч. Получали стабильную во време-
ни суспензию, которую использовали
в качестве смазочной композиции для
модификации моторного масла двига-
телей внутреннего сгорания.

Седиментационную устойчивость
композиции определяли следующим
образом. Смазочную композицию на-
ливали в четыре градуированных про-
бирки емкостью 15 мл. Через опреде-
ленные промежутки времени (10 ч)
измеряли высоту столба жидкости
и высоту слоя суспензии. Седимента-
ционную устойчивость рассчитывали
по формуле:

$$X = \frac{h}{H} \cdot 100\%,$$

где X – седиментационная устойчивость (%); h – высота слоя суспензии (мм); H – высота столба жидкости (мм).

По полученным данным строили график в координатах «седиментационная устойчивость (%) – время (ч)». В качестве эталона сравнения использовали добавку олеиновой кислоты в количестве 0,08 массовой части.

Результаты исследования

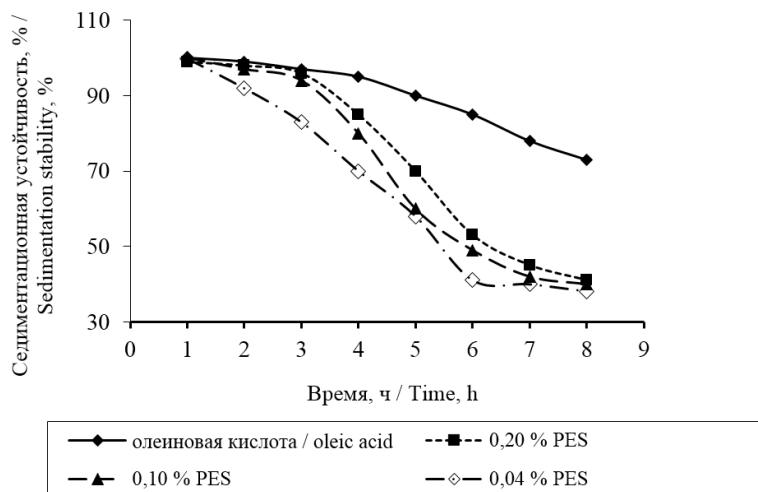
Стабилизационные свойства полиэтиленгликольсебацата изучали в смазочных композициях, содержащих 10 массовых частей масла М-10Г₂к ГОСТ 8581–78, одну массовую часть металлического порошка и стабилизатор в количестве 0,2, 0,1 и 0,04 массовых частей. Седиментационные диаграммы представлены на рис. 2.

Стабилизационные свойства апиезона МН изучали в смазочных композициях, содержащих 10 массовых частей масла, одну массовую часть металлического порошка и стабилизатор в количестве 0,2, 0,1 и 0,04 массовых частей. Седиментационные диаграммы в сравнении с олеиновой кислотой представлены на рис. 3.

Поскольку апиезон МН показал удовлетворительную стабилизационную активность, были изучены свойства товарного аналога синтезированного препарата – апиезон L производства фирмы MERCK (Германия). Эксперимент проводили с использованием смазочных композиций, содержащих 10 массовых частей масла, 1 массовую часть металлического порошка и стабилизатор в количестве 0,2, 0,1 и 0,04 массовых частей. Седиментационные диаграммы представлены на рис. 4.

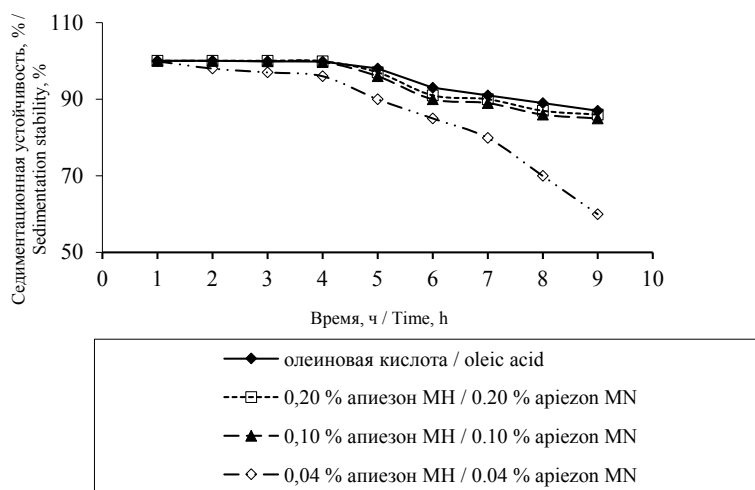
Анализ седиментационных диаграмм позволяет сделать вывод, что полимерный сложный эфир полиэтиленгликольсебацат показал неудовлетворительные свойства. Устойчивость суспензии оказалась значительно ниже, чем в случае использования олеиновой кислоты: уже через 6 ч наблюдалось заметное расслоение.

При использовании в качестве стабилизатора апиезона МН получен положительный результат. Седиментационная устойчивость суспензии оказалась на уровне эталона (олеиновой кислоты).



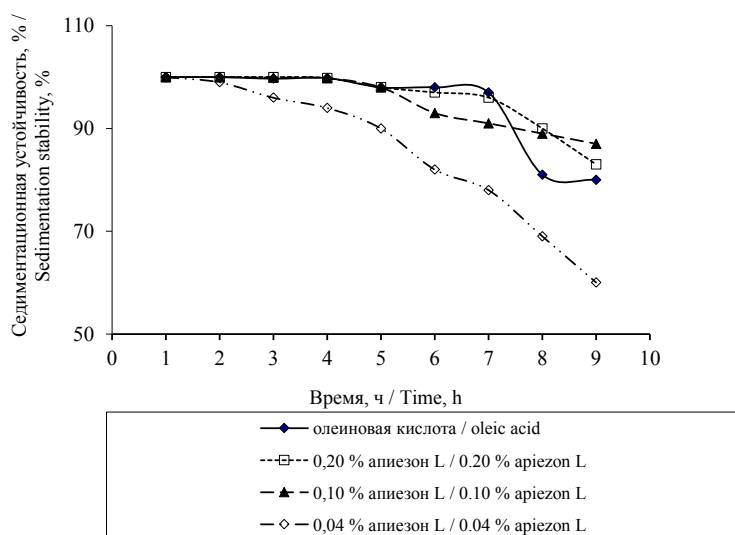
Р и с. 2. Стабилизационные свойства полиэтиленгликольсебацата в сравнении с олеиновой кислотой при разном количестве (мас. %) стабилизатора

F i g. 2. Stabilization properties of polyethylene glycolsebacate in comparison with oleic acid with different amounts (wt. %) stabilizer



Р и с. 3. Стабилизационные свойства апиезона МН в сравнении с олеиновой кислотой при разном количестве (мас. %) стабилизатора

F i g. 3. Stabilization properties of apieson MN in comparison with oleic acid with different amounts (wt. %) stabilizer



Р и с. 4. Стабилизационные свойства апиезона L в сравнении с олеиновой кислотой при разном количестве (мас. %) стабилизатора

F i g. 4. Stabilization properties of apieson L in comparison with oleic acid with different amounts (wt. %) stabilizer

Начало расслоения смазочной композиции зарегистрировано лишь через 96 ч, что несколько раньше, чем для олеиновой кислоты. Однако дальнейшая скорость седиментации составляла всего 0,5–0,8 % в течение 24 ч, что меньше, чем для стабилизатора сравнения.

Как и следовало ожидать, с увеличением массовой доли стабилизатора седиментационная устойчивость смазочной композиции увеличивалась. Однако верхний предел стабилизатора в композиции принят равным 0,2 массовых частей, поскольку при более

Т а б л и ц а 1

Table 1

Аналоги продукции отечественного производства и продукции Shell
Analogues of domestic production and of Shell products

Shell	Отечественный аналог / Domestic analog
Смазки пластичные / Plastic greases	
Alvania RL 3	1-13
Alvania RL 1	15B / 15V
Mytilus A	AMC-1 / AMS-1
Mytilus B	AMC-3 / AMS-3
Alvania RL 2	БНЗ-3 / BNZ-3
Aviation Grease S 7108	БУ / Petrol-resisting grease
Apiезон AP 101	Вакуумная / Vacuum grease
AeroShell Grease 15A, 22	ВНИИ НП-207 / VNII NP-207

высоком его содержании существенно возрастает вязкость масла.

После получения положительного результата с гидрированным апиезоном далее были изучены стабилизационные свойства его аналога – товарного реактива апиезон L. Такая замена оказалась бы выгодна с точки зрения исключения стадии синтеза, значительно удорожающего стоимость композиции. Апиезон L выпускается фирмой MERCK (Германия) и используется в качестве неподвижной жидкой фазы в газо-жидкостной хроматографии.

По своей химической структуре апиезон L мало отличается от гидрированного апиезона МН и также представляет собой смесь жирноароматических углеводородов. Вещество имеет вид коричневой вязкой массы, хорошо растворяется в моторном масле.

Эксперимент подтвердил высокую эффективность апиезона L в качестве стабилизатора: его свойства мало отличались от свойств апиезона МН.

Анализ информационных источников показал, что апиезоны выпускает английская фирма M&I Materials Ltd Ariezon – производитель и поставщик вакуумных смазочных материалов. Как было выяснено, апиезоновые смазки

применяются в качестве высокоэффективных смазочных материалов в вакуумной технике. Подобные смазки выпускаются фирмой SHELL. В табл. 1 приведены отечественные аналоги продукции этой фирмы, где в качестве замены апиезона AP 101 предлагается обычная отечественная вакуумная смазка.

Обсуждение и заключение

1. Синтезированный препарат апиезон МН и товарный реагент апиезон L проявляют стабилизационные свойства в отношении металлических порошков смазочной композиции, сравнимые со свойствами олеиновой кислоты.

2. Поскольку апиезоновые смазки представляют собой смесь углеводородов, их коррозионная активность значительно ниже, чем у олеиновой кислоты, что указывает на перспективность их применения.

3. Добавка сложного эфира этиленгликоля и предельной дикарбоновой кислоты (этиленгликольсебагината) не оказала стабилизирующего действия на смазочную композицию.

4. В дальнейшем наибольший интерес представляют исследования отечественных аналогов апиезоновых смазок на предмет их стабилизационных свойств.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Исследование физико-химических свойств и триботехнической эффективности наночастиц мягких металлов и их смесей в вазелиновом масле / А. С. Кужаров [и др.] // Наноинженерия. 2013. № 5 (23). С. 43–48.
2. **Бурлакова В. Э., Косогова Ю. П., Дроган Е. Г.** Влияние наноразмерных кластеров меди на триботехнические свойства пары трения сталь-сталь в водных растворах спиртов // Вестник Донского государственного технического университета. 2015. Т. 15, № 2 (81). С. 41–47. DOI: <https://doi.org/10.12737/11590>
3. Способ получения ультрадисперсного порошка и устройство для его осуществления : пат. 2207933 Рос. Федерация : МПК⁷ В 22 F9/12 / Кириллин А. В. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Кириллин А. В. № 2001118997/02 ; заявл. 10.07.2001; опубл. 10.07.2003. 6 с. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2207933>
4. **Сафонов В. В., Добринский Э. К.** Повышение ресурса тракторных дизелей за счет металлосодержащих добавок к маслу // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2001. № 4. С. 17–18.
5. **Сафонов В. В., Шишурин С. А., Александров В. А.** Повышение эффективности эксплуатации сельскохозяйственной техники за счет применения наноматериалов // Нанотехника. 2009. № 4 (20). С. 79–80.
6. Применение наноматериалов при техническом сервисе автотракторной техники / В. В. Сафонов [и др.] // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. 2009. № 3 (34). С. 62–66.
7. Наноматериалы для продления послеремонтного ресурса тракторных трансмиссий и экономии топлива / В. П. Лялякин [и др.] // Технология металлов. 2011. № 1. С. 25–27.
8. Эксплуатационные испытания двигателей ЗМЗ-4062 при добавлении в моторное масло нано-препарата фирмы «Wagner» Universal – Micro-Ceramic Oil / Р. Ю. Соловьев [и др.] // Труды ГОСНИТИ. 2013. Т. 112, ч. 1. С. 119–127.
9. Исследование трибосоставов на основе гексагонального нитрида бора / Д. А. Гительман [и др.] // Труды ГОСНИТИ. 2014. Т. 115. С. 66–70.
10. Наноматериалы в ресурсосберегающих технологиях обеспечения работоспособности агрегатов сельскохозяйственной техники / В. В. Сафонов [и др.] // Вестник Челябинского государственного агроинженерного университета. 2008. Т. 51. С. 62–69.
11. **Сафонов В. В., Добринский Э. К.** Нанодисперсные металлосодержащие добавки к моторным маслам // Машинно-технологическая станция. 2004. № 1. С. 42–44.
12. Смазочная композиция : пат. 2123030 Рос. Федерация, МПК⁶ C10M 125/00, C10M 125:04, C10M 125:22, C10M 125:24, C10N 30:06 / Сафонов В. В. [и др.] ; заявители и патентообладатели Сафонов В. В. [и др.]. № 97116529/04 ; заявл. 07.10.1997 ; опубл. 10.12.1998, Бюл. № 34. – 5 с.
13. Сравнительное исследование свойств гидрозолей серебра, полученных цитратным и цитрат-сульфатным методами / О. В. Дементьева [и др.] // Коллоидный журнал, 2008. Т. 70, № 5. С. 607–619.
14. Controlling the shapes of silver nanocrystals with different capping agents / J. Zeng [et al.] // Journal of the American Chemical Society. 2010. Vol. 132, Issue 25. P. 8552–8553. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja103655f>
15. **Bonet F., Tekaiia-Elhsissen K., Sarethy K. V.** Study of interaction of ethylene glycol/PVP phase on noble metal powders prepared by polyol process // Bulletin of Materials Science. 2000. Vol. 23, Issue 3. P. 165–168. URL: <https://www.ias.ac.in/article/fulltext/boms/023/03/0165-0168>
16. Стабилизация наночастиц серебра с помощью сополимеров малеиновой кислоты / Н. А. Самойлова [и др.] // Коллоидный журнал. 2013. Т. 75, № 4. С. 455–467. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0023291213040083>
17. **Ershov B. G., Henglein A.** Reduction of Ag⁺ on polyacrylate chains in aqueous solution // The Journal of Physical Chemistry B. 1998. Vol. 102, Issue 52. P. 10663–10666. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp981906i>

18. Фотохимическое восстановление катионов серебра в полиэлектrolитной матрице / М. В. Кирюхин [и др.] // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. 2000. Т. 42, № 6. С. 1069–1073. URL: http://polymsci.ru/static/Archive/2000/VMS_2000_T42_6/VMS_2000_T42_6_1069-1073.pdf
19. Stable silver clusters and nanoparticles prepared in polyacrylate and inverse micellar solutions / Z. Zhang [et al.] // The Journal of Physical Chemistry B. 2000. Vol. 104, Issue 6. P. 1176–1182. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp991569t>
20. In situ fabrication of polyacrylate-silver nanocomposite through photoinduced tandem reactions involving eosin dye / L. Balan [et al.] // Polymer. 2010. Vol. 51, Issue 6. P. 1363–1369. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2009.05.003>
21. Процесс борогидридного восстановления Ag^+ в водных растворах сополимера акриловой кислоты и акриламида / В. Д. Буикликий [и др.] // Коллоидный журнал. 2012. Т. 74, № 1. С. 10–14.
22. Potent immunomodulating activities of polyvinyladenine and (vinyladenine-alt-maleic acid) copolymer / M. Akashi [et al.] // Journal of Bioactive and Compatible Polymers. 1989. Vol. 4, Issue 2. P. 124–136. DOI: <https://doi.org/10.1177/088391158900400203>
23. Hydrophobic nanocrystals coated with an amphiphilic polymer shell: a general route to water soluble nanocrystals / T. Pellegrino [et al.] // Nano Letters. 2004. Vol. 4, Issue 4. P. 703–707. DOI: <https://doi.org/10.1021/nl035172j>
24. Design of an amphiphilic polymer for nanoparticle coating and functionalization / C.-A. J. Lin [et al.] // Small. 2008. Vol. 4, Issue 3. P. 334–341. DOI: <https://doi.org/10.1002/sml.200700654>
25. Металлоплакирующая смазка : а. с. 1214735 СССР : МКИ³ С 10 М 133/16 / А. С. Кузжаров [и др.] (СССР). № 3731704/23-04 ; заявл. 24.01.84 ; опубл. 28.02.86, Бюл. № 8. 3 с. URL: <http://patents.su/3-1214735-metalloplakiruyushhaya-smazka.html>
26. Lubricant additive : pat. 4204968 US, 252/26, C10M 125/04; (IPC1-7): C10M 1/54; C10M 3/48 / Mack J. E., Mack P. K., inventors. CLM International Corp. (Englewood, CO), assignee. Filing 11.08.1978 ; publ. 27.05.1980. URL: <http://www.freepatentsonline.com/4204968.html>
27. Смазочная композиция «РЕСУРС-ДИЗЕЛЬ» : пат. 2019563 Рос. Федерация : МПК⁶ C10M 169/04, C10M 101/02, C10M 125/04, C10M 125/24, C10M 133/16, C10N 30/06 / Войтович Я. Н. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Научно-производственная фирма «ВИРА». № 5034800/04 ; заявл. 31.03.1992 ; опубл. 15.09.1994, Бюл. № 14. 5 с. URL: <http://ru-patent.info/20/15-19/2019563.html>
28. Смазочная композиция «РЕСУРС-ФОРТЕ» : пат. 2019562 Рос. Федерация, МПК⁶ C10M 169/04, C10M 101/02, C10M 125/04, C10M 133/16, C10N 30/06 / Войтович Я. Н. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Научно-производственная фирма «ВИРА». № 5034799/04 ; заявл. 31.03.1992 ; опубл. 15.09.1994, Бюл. № 14. 4 с. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/201/2019562.html>

Поступила 26.10.2018; принята к публикации 14.12.2018; опубликована онлайн 29.03.2019

Об авторах:

Сафонов Валентин Владимирович, профессор, кафедра технического обеспечения АПК, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (410012, Россия, г. Саратов, Театральная пл., 1), доктор технических наук, ResearcherID: W-1167-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6752-3242>, safonow2010sgau@yandex.ru

Остриков Валерий Васильевич, заведующий, лаборатория использования смазочных материалов и отработанных нефтепродуктов, ФГБНУ ВНИИТиН (392022, Россия, г. Тамбов, Ново-Рубежный пер., 28), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: U-9688-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2927-768X>, viitinlab8@bk.ru

Венский Вадим Викторович, доцент, кафедра технического обеспечения АПК, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова» (410012, Россия, г. Саратов, Театральная пл., 1), кандидат технических наук, ResearcherID: A-5810-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0919-0579>, mecb-2007@mail.ru

Сафонов Константин Валентинович, старший преподаватель, кафедры технического обеспечения АПК, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова» (410012, Россия, г. Саратов, Театральная пл., 1), ResearcherID: B-3252-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0813-2123>, professor-86@mail.ru

Азаров Александр Сергеевич, доцент, кафедры технического обеспечения АПК, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова» (410012, Россия, г. Саратов, Театральная пл., 1), кандидат технических наук, ResearcherID: A-4979-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1750-5553>, azarov444@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. В. Сафонов – формулирование основной концепции исследования, разработка плана статьи, подготовка начального варианта статьи; В. В. Остриков – постановка задач и разработка методики исследования, формирование выводов; В. В. Венский – анализ литературных источников и результатов исследования, доработка текста статьи; К. В. Сафонов – получение смазочных композиций с ультра-нанометаллическим порошковым наполнителем, изучение стабилизационных свойств синтезированных соединений; А. С. Азаров – синтез образцов стабилизаторов различной химической природы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Kuzharov A.S., Kuzharov A.A., Nguyen H., Ageev O.A., Konoplev B.G., Ryzhkin A.A. et al. Investigation of the physicochemical properties and tribological efficiency of nanoparticles of soft metals and their mixtures in petroleum jelly oil. *Nanoinzheneriya* = Nanoengineering. 2013; 5:43-48. (In Russ.)
2. Burlakova V.E., Kosogova Y.P., Drogin E.G. Effect of copper nanoclusters on the tribological properties of steel-steel friction pair in alcohol aqueous solutions. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Vestnik of Don State Technical University. 2015; 15(2):41-47. DOI: <https://doi.org/10.12737/11590> (In Russ.)
3. Kirillin A.V., Dobrinsky E.K., Krasnyukov E.A., Malashin S.I., inventors. Kirillin A.V., assignee. The method of obtaining ultrafine powder and device for its implementation. RU Patent 2207933. 2001 Jul 10. Available at: <http://www.freepatent.ru/patents/2207933> (In Russ.)
4. Safonov V.V., Dobrinsky E.K. Increasing the resource of tractor diesels due to metal-containing additives to oil. *Traktory i selskokhozyaystvennyye mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2001; 4:17-18. (In Russ.)
5. Safonov V.V., Shishurin S.A., Aleksandrov V.A. Improving the efficiency of operation of agricultural machinery through the use of nanomaterials. *Nanotekhnika* = Nanotechnology. 2009; 4:79-80. (In Russ.)
6. Safonov V.V., Aleksandrov V.A., Azarov A.S., Shishurin S.A. Application of nanomaterials during technical service of automotive vehicles. *Vestnik MGAU* = MSAU Bulletin. 2009; 3:62-66. (In Russ.)
7. Lyalyakin V.P., Olkhovatsky A.K., Gitelman D.A., Shavkunov A.P. Nanomaterials for extending the post-repair resource of tractor transmissions and fuel economy. *Tekhnologiya metallov* = Metal Technology. 2011; 1:25-27. (In Russ.)
8. Soloviev R.Yu., Olkhovatsky A.K., Gritsenko A.V., Kukov S.S., Bakaykin D.D., Gitelman D.A. Operational testing of ZMZ-4062 engines when adding Wagner Universal nanopreparation to motor oil – Micro-Ceramic Oil. *Trudy GOSNITI* = Proceedings of GOSNITI. 2013; 112(1):119-127. (In Russ.)
9. Gitelman D.A., Dunaev A.V., Kolokolnikov V.N., Podzharaya K.S., Solov'ev Yu.R. Investigation of tribosomes based on hexagonal boron. *Trudy GOSNITI* = Proceedings of GOSNITI. 2014; 115:66-70. (In Russ.)

10. Safonov V.V., Aleksandrov V.A., Azarov A.S., Shishurin S.A., Safonov K.V. Nanomaterials in resource-saving technologies to ensure the operability of agricultural machines. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo agroinzhenernogo universiteta* = Chelyabinsk State Agroengineering University Bulletin. 2008; 51:62-69. (In Russ.)
11. Safonov V.V., Dobrinsky E.K. Lubricating composition with components of nanostructured materials. *Mashinno-tekhnologicheskaya stantsiya* = Machine Technological Station. 2004; 1:42-44. (In Russ.)
12. Safonov V.V., Dobrinsky E.K., Buylov V.N., Semin A.G., Mityushkin A.A., Venskaytis V.V., inventors and assignee. Lubricating composition. RU Patent 2123030. 1998 Dec 10. (In Russ.)
13. Dementieva O.V., Malkovsky A.V., Filippenko M.A., Rudoy V.M. Comparative study of the properties of silver hydrosols obtained by citrate and citrate-sulphate methods. *Kolloidnyy zhurnal* = Colloid Journal. 2008; 70(5):607-619 (In Russ.)
14. Zeng J., Zheng Y., Rycenga M., Tao J., Li Z.-Y., Zhang Q. et al. Controlling the shapes of silver nanocrystals with different capping agents. *Journal of the American Chemical Society*. 2010; 132(25):8552-8553. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja103655f>
15. Bonet F, Tekaiia-Elhsissen K., Sarethy K.V. Study of interaction of ethylene glycol/PVP phase on noble metal powders prepared by polyol process. *Bulletin of Materials Science*. 2000; 23(3):165-168. Available at: <https://www.ias.ac.in/article/fulltext/boms/023/03/0165-0168>
16. Samoilova N.A., Blagodatskikh I.V., Kurskaya E.A., Krayukhina M.A., Vyshivannaya O.V., Abramchuk S.S. et al. Stabilization of silver nanoparticles using maleic acid copolymers. *Kolloidnyy zhurnal* = Colloid Journal. 2013; 75(4):455-467. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0023291213040083> (In Russ.)
17. Ershov B.G., Henglein A. Reduction of Ag⁺ on polyacrylate chains in aqueous solution. *The Journal of Physical Chemistry B*. 1998; 102(52):10663-10666. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp981906i>
18. Kiryukhin M.V., Sergeev B.M., Prusov A.N., Sergeev V.G. Photochemical reduction of silver cations in a polyelectrolyte matrix. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya. Seriya B.* = High Molecular Compounds. Series B. 2000; 42(6):1069-1073. Available at: http://polymsci.ru/static/Archive/2000/VMS_2000_T42_6/VMS_2000_T42_6_1069-1073.pdf (In Russ.)
19. Zhang Z., Patel R.C., Kothari R., Johnson C.P., Friberg S.E., Aikens P.A. Stable silver clusters and nanoparticles prepared in polyacrylate and inverse micellar solutions. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2000; 104(6):1176-1182. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp991569t>
20. Balan L., Malval J.-P., Schneider R., Nouen D.L., Loughnot D.-J. In-situ fabrication of polyacrylate-silver nanocomposite through photoinduced tandem reactions involving eosin dye. *Polymer*. 2010; 51(6):1363-1369. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2009.05.003>
21. Buiklisky V.D., Levchenko V.F., Popov F.A., Sheremet M.Yu. Ag⁺ borohydride reduction process in aqueous solutions of acrylic acid copolymer and acrylamide. *Kolloidnyy zhurnal* = Colloid Journal. 2012; 74(1):10-14. (In Russ.)
22. Akashi M., Iwasaki H., Miyauchi N., Sato T., Susamoto J., Takemoto K. Potent immunomodulating activities of polyvinyladenine and (vinyladenine-alt-maleic acid) copolymer. *Journal of Bioactive and Compatible Polymers*. 1989; 4(2):124-136. DOI: <https://doi.org/10.1177/088391158900400203>
23. Pellegrino T., Manna L., Kudera S., Liedl T., Koktysh D., Rogach A.L. et al. Hydrophobic nanocrystals coated with an amphiphilic polymer Shell: A general route to water soluble nanocrystals. *Nano Letters*. 2004; 4(4):703-707. DOI: <https://doi.org/10.1021/nl035172j>
24. Lin C.-A.J., Sperling R.A., Li J.K., Yang T.-Y., Li P.-Y., Zanella M. et al. Design of an amphiphilic polymer for nanoparticle coating and functionalization. *Small*. 2008; 4(3):334-341. DOI: <https://doi.org/10.1002/smll.200700654>
25. Kuzharov A.S., Onischuk N.Yu., Komarchuk L.A., Ryabukhin Yu.I. Metal-plating grease. USSR Certificate of Authorship 1214735. 1986 Feb 28. Available at: <http://patents.su/3-1214735-metalloplakiruyushhaya-smazka.html> (In Russ.)
26. Mack J.E., Mack P.K., inventors. CLM International Corp., assignee. Lubricant additive. US Patent 4204968. 1980 May 27. Available at: <http://www.freepatentsonline.com/4204968.html>

27. Voytovich Ya.N., Bregman M.M., Vipser A.B., Dobrinskiy E.K., Karaulov A.K., Kachalkova M.I. et al., inventors. Scientific Production Company "VIRA", assignee. Lubricating composition "RESOURCE-DIESEL". RU Patent 2019563. 1994 Sept 15. Available at: <http://ru-patent.info/20/15-19/2019563.html> (In Russ.)

28. Voytovich Ya.N., Bregman M.M., Vipser A.B., Dobrinsky E.K., Karaulov A.K., inventors. Scientific Production Company "VIRA", assignee. Lubricating composition "RESOURCE-FORTE" RU 2019562 1994 Sept 15. Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/201/2019562.html> (In Russ.)

Received 26.10.2018; revised 14.12.2018; published online 29.03.2019

About authors:

Valentin V. Safonov, Professor, Chair of Technical Support of the Agro-Industrial Complex, Saratov State Agrarian University named after N. I. Vavilov (1 Teatralnaya Sq., Saratov 410012, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: W-1167-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6752-3242>, safonow2010sgau@yandex.ru

Valery V. Ostrikov, Head, Laboratory for the Use of Lubricants and Waste Oil Products, All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture (28 Novo-Rubezhny Lane, Tambov 392022, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: U-9688-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2927-768X>, viitinlab8@bk.ru

Vadim V. Venskaytis, Associate Professor, Chair of Technical Support of the Agro-Industrial Complex, Saratov State Agrarian University named after N. I. Vavilov (1 Teatralnaya Sq., Saratov 410012, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: A-5810-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0919-0579>, mech-2007@mail.ru

Konstantin V. Safonov, Senior Lecturer, Chair of Technical Support of the Agro-Industrial Complex, Saratov State Agrarian University named after N. I. Vavilov (1 Teatralnaya Sq., Saratov 410012, Russia), ResearcherID: B-3252-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0813-2123>, professor-86@mail.ru

Alexandr S. Azarov, Associate Professor, Chair of Technical Support of the Agro-Industrial Complex, Saratov State Agrarian University named after N. I. Vavilov (1 Teatralnaya Sq., Saratov 410012, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: A-4979-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1750-5553>, azarov444@yandex.ru

Contribution of the authors:

V. V. Safonov – formulation of the main concept of a research, development of the plan of article, preparation of initial version of article; V. V. Ostrikov – statement of tasks and development of a technique of a research, formation of conclusions; V. V. Venskaytis – the analysis of references and results of a research, completion of the text of article; K. V. Safonov – receiving lubricant compositions with ultra-nanometal powder filler, studying of stabilization properties of the synthesized connections; A. S. Azarov – synthesis of samples of stabilizers of various chemical nature.

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



Методика определения величины утилизационного сбора для выведенной из эксплуатации самоходной техники

**В. И. Игнатов*, А. С. Дорохов, В. С. Герасимов,
В. А. Денисов**

*ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр
ВИМ» (г. Москва, Россия)*

**ignatoww@inbox.ru*

Введение. В статье приведены результаты исследований, целью которых являлось определение одного из важнейших параметров, обеспечивающих возможность формирования в России системы утилизации отходов от выведенной из эксплуатации материалоёмкой техники и оборудования – оптимальной величины утилизационного сбора. Целью статьи является определение данного параметра для самоходной техники. Обзор исследований, касающихся обращения с отходами производства и потребления в странах-лидерах в этом направлении и в России, позволил проанализировать варианты решения данной проблемы, а также модели экономического сопровождения систем утилизации выведенной из эксплуатации техники в России и за рубежом. Показано, что до настоящего времени в России отсутствует методика определения оптимальной величины утилизационного сбора.

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи разработаны методика, алгоритм и компьютерные программы. Необходимая информация была получена в 12 регионах России в процессе анкетирования предприятий агропромышленного комплекса, использующих сельхозтехнику и технику специализированных производств, а также в полевых испытаниях на агропредприятиях, использующих эту технику; раскрыты методы ее обработки. В статье приведен перечень параметров, обеспечивающих разработку алгоритма и компьютерных программ, с помощью которых была определена оптимальная величина утилизационного сбора.

Результаты исследования. Разработанные методика, алгоритм и компьютерные программы позволили определить оптимальную величину утилизационного сбора для создания системы утилизации самоходной техники. Показано, что по мере становления системы утилизации выведенной из эксплуатации техники эта величина будет снижаться. Результаты работы были использованы при разработке постановления Правительства России.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты показали, что утилизационный сбор влияет на конкурентоспособность самоходной техники. Рассмотрены как положительные, так и отрицательные стороны завышения введенного в России утилизационного сбора на транспортные средства. Доказана необходимость создания системы утилизации транспортных средств, экономическую базу которой в полной мере может обеспечить введенный в России утилизационный сбор.

Ключевые слова: утилизация отходов, утилизационный сбор, выведенная из эксплуатации техника, система утилизации, утилизация сельскохозяйственной техники

Для цитирования: Методика определения величины утилизационного сбора для выведенной из эксплуатации самоходной техники / В. И. Игнатов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 1. С. 124–139. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.124-139>

© Игнатов В. И., Дорохов А. С., Герасимов В. С., Денисов В. А., 2019



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

The Principles for Determining Recycling Fee on Decommissioned Equipment

V. I. Ignatov*, A. S. Dorokhov, V. S. Gerasimov,
V. A. Denisov

Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russia)

*ignatoww@inbox.ru

Introduction. The article presents the results of the research, whose purpose was to determine the optimal value of the recycling fee for decommissioned self-propelled machinery. A review of the studies on the management of production and consumption waste in the leading countries and Russia, allowed us to analyze solutions to this problem and models of economic support for disposal systems of decommissioned equipment. There is no method of determining the optimal recycling fee in Russia so far.

Materials and Methods. Methods, algorithm and computer programs were developed to solve this problem. The necessary information was obtained by the course of the survey conducted in 12 regions of Russia among agricultural enterprises using agricultural machinery and equipment of specialized production, and from tests at agricultural enterprises using this technology; the methods of the said information are shown. The paper gives a list of parameters that ensure the development of the algorithm and computer programs that were used to determine the optimal recycling fee.

Results. The developed method of determination, algorithm and computer programs allowed determining the optimal recycling fee to create a system of recycling self-propelled technology. It is shown that as the system for recycling decommissioned equipment develops, this value will decrease. The results of the study were used in preparing a Russian Government Regulation.

Discussion and Conclusion. The results of the study showed that the recycling fee affects the competitiveness of self-propelled equipment. Both positive and negative sides of increasing the introduced in Russia recycling fee for vehicles are considered. It is proved that it is necessary to create a system of recycling these vehicles, the economic base of which can be fully provided by the recycling fee introduced in Russia.

Keywords: waste disposal, recycling fee, decommissioned machinery, recycling system, agricultural machinery recycling system

For citation: Ignatov V.I., Dorokhov A.S., Gerasimov V.S., Denisov V.A. The Principles for Determining Recycling Fee on Decommissioned Equipment. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(1):124-139. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.124-139>

Введение

За относительно короткий, по меркам истории, период времени количество жителей Земли увеличилось в 3,9 раза и продолжает расти. Если в 2000 г. население планеты составляло 6 251 млн. человек, то к июлю 2015 г. – уже около 7 256 млн. В настоящее время каждый житель планеты ежедневно «производит» в среднем 1,5–2 кг отходов потребления, поэтому проблема утилизации отходов приобрела социальное значение, особенно для мегаполисов.

Мировое сообщество в течение XX в. увеличило производство продукции машиностроения более чем в 100 раз, США – более чем в 300 раз, Япония – более чем в 500 раз¹, и в последние годы объем производства увеличивается. Для производства продукции машиностроения к настоящему моменту из недр Земли извлечено природных ресурсов столько же, сколько люди извлекли их за всю историю своего существования. При этом образовалось огромное количество отходов

¹ Мировая экономика: глобальные тенденции за 100 лет / Под ред. И. С. Королева. М. : Юрист, 2003. 604 с.

производства, в том числе и от отслужившей свой срок техники. Общеизвестно, что в настоящее время многие страны (Германия², Япония [1], Польша³ и др.), природные ресурсы которых ограничены, повторно используют до 95 % компонентов, входящих в состав отходов. На заседании Совета по стратегическому развитию и приоритетным проектам⁴ президент России В. В. Путин сообщил, что в России накопилось около 100 млрд. т неутилизованных отходов производства и потребления и предложил создать действенный механизм их утилизации, поскольку показатель использования полезных компонентов отходов в России намного ниже, чем за рубежом.

В значительной мере это связано со спецификой организационно-экономических принципов, изменившихся после распада СССР. В советский период система рециклинга отходов в СССР была одной из самых эффективных в мире и служила примером для большинства стран⁵. Однако за последние 30 лет страны-лидеры, используя и совершенствуя опыт СССР, а также применяя информационно-коммуникационные технологии, ушли далеко вперед в решении проблемы рециклинга отходов. Теперь уже Россия пытается перенять у них данные технологии.

В начале 2018 г. решение проблемы отходов поставлено на государственный контроль. В соответствии

с распоряжением Правительства РФ от 25.01.2018 г. № 84-р Россия, по примеру стран-лидеров, взяла курс на создание промышленности по утилизации отходов, разработав стратегию ее развития⁶. Однако, как видно из текста данной стратегии, ее доминирующим направлением является решение социальной проблемы – создание эффективной системы утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО). Следует отметить, что в силу идентичности организационно-технологических принципов утилизации ТКО в странах-лидерах и в России в ближайшие годы эта социально значимая проблема может быть решена в нашей стране за счет трансфера зарубежных технологий и оборудования, в том числе мусороперерабатывающих заводов.

В данной статье акцент сделан на том, каким образом решается задача ресурсосбережения в России и за рубежом. Если учесть, что основной объем материальных ресурсов, включая невозполнимые, используется для производства продукции машиностроения, в том числе различных видов техники, то с учетом ограниченности природных ресурсов их возвращение в промышленность для повторного использования имеет глобальное значение. В то же время в стратегии⁷ отсутствует направление на создание системы утилизации выведенной из эксплуатации материалоемкой техники и оборудования

² Lucas R. End-of-life vehicle regulation in Germany and Europe – problems and perspectives. A discussion paper of the project «Autoteile per Mausclick». Wuppertal papers. 2001. № 113. 30 p. URL: <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/1201/file/WP113.pdf>

³ Alwaeli M. End-of-life vehicles recycling and the route to compliance with EU directive targets: the case of Poland // Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Science and Technology. Part 1. Athens : University of the Aegean, 2013. P. 591–606.

⁴ Заседание Совета по стратегическому развитию и приоритетным проектам. Президент России. URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/53333>

⁵ Рециклинг ресурсов – первый шаг к экологическому социализму / под ред. Г. И. Цуцкаревой. М. : ЛЕНАНД, 2018. 432 с.

⁶ Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года : утв. постановлением Правительства Рос. Федерации от 25 янв. 2018 г. № 84-р. URL: <http://static.government.ru/media/files/y8PMkQGZLfbY7jhn6QMruaKoferAowzJ.pdf>

⁷ Там же.

(ВЭТ). Несмотря на то, что Россия приняла ряд нормативно-законодательных документов, в том числе Федеральный закон «Об отходах производства и потребления»⁸, в котором декларируется создание системы утилизации некоторых видов ВЭТ, государственная программа по созданию подобной системы отсутствует.

При этом экономическая база для создания ВЭТ в виде утилизационного (экологического) сбора в России начала формироваться в 2012 г. Величина утилизационного сбора (ВУС₆), с одной стороны, обеспечивает возможность создания системы утилизации техники (СУТ), с другой – снижает конкурентоспособность техники, поскольку ее производители, включая этот сбор в цену продукции, по сути, перекладывают эти затраты на потребителей. Поэтому ВУС₆ должна быть оптимальной, поддающейся расчету и понятной как производителям техники, так и ее потребителям. Но методика определения ВУС₆ на зарубежную технику – тема закрытая, а в России – не разработанная. Целью статьи является определение данного параметра для самоходной техники.

Обзор литературы

В настоящее время, разработав стратегию⁹, Правительство России, по сути, поставило проблему обращения с отходами на государственной контроль и начало новый цикл работ по

созданию в России национальной системы рециклинга отходов в соответствии с международными требованиями. Осуществляя этот вид деятельности, Правительство России опирается на общепринятые принципы организации такого рода систем, в том числе принцип «загрязнитель платит» и принцип расширенной ответственности производителей продукции за ее утилизацию после окончания срока использования.

Первый принцип реализован путем введения в 2012 г. утилизационного сбора на колесную технику¹⁰, а в 2016 г. – на самоходные машины¹¹. В мировой практике этот сбор используется для создания системы рециклинга отходов, в том числе отходов от ВЭТ.

Поправки, внесенные в закон¹² в 2014 г., законодательно закрепили расширенную ответственность производителей техники за утилизацию ВЭТ. К настоящему времени Россия создала основные предпосылки для формирования системы рециклинга отходов, в том числе для ВЭТ, аналогичной системе авторециклинга в Германии.

Проведенный сравнительный анализ большого количества литературных источников показал, что за рубежом наибольший интерес к созданию СУТ пришелся на 90-е гг. XX в. и начало XXI в.

Наиболее эффективными являются системы авторециклинга в Нидерлан-

⁸ Об отходах производства и потребления : федер. закон Рос. Федерации от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ (ред. от 31.12.2017) : принят Гос. Думой Федер. Собр. Рос. Федерации 22 мая 1998 г. : одобр. Советом Федерации Федер. Собр. Рос. Федерации 10 июня 1998 г. URL: <http://ivo.garant.ru/#/document/12112084/paragraph/59112:0>

⁹ Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года : утв. постановлением Правительства Рос. Федерации от 25 янв. 2018 г. № 84-п. URL: <http://static.government.ru/media/files/y8PMkQGZLfbY7jhn6QMruaKoferAowzJ.pdf>

¹⁰ Об утилизационном сборе в отношении колесных транспортных средств : постановление Правительства РФ от 30 авг. 2012 г. № 870 // Собр. законодательства Рос. Федерации. 2012 г. № 36. Ст. 4919.

¹¹ Об утилизационном сборе в отношении самоходных машин и (или) прицепов к ним и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации : постановление Правительства РФ от 06.02.2016 № 81 // Собр. законодательства Рос. Федерации. 2016. № 7. Ст. 991.

¹² Об отходах производства и потребления : федер. закон Рос. Федерации.

дах, Германии, США, Франции, Великобритании, Японии.

В результате анализа опубликованного в 2007 г. доклада¹³ Совету и Европейскому парламенту об осуществлении директивы 2000/53/ЕС 2002–2005 гг. определена эффективность систем утилизации транспортных средств. Из доклада следует, что уже в 2005 г. практически во всех странах ЕС подобные системы утилизации созданы, хотя и имеются определенные недостатки в их организации.

Основу систем рециклинга ВЭТ, функционирующих более чем в 50 странах (в ЕС и за его пределами), составляет Федеральный закон «Об экономическом рециклинге Германии»¹⁴. Он содержит более 500 страниц текста, в котором подробно расписаны все регламенты взаимоотношений между владельцами автотранспортных средств, производителями, перерабатывающими организациями и органами государственной власти. Сегодня многими экспертами этот закон признан образцом в вопросах организации авторециклинга.

В Германии производители автомобилей и импортеры формируют специальный резерв для финансирования утилизации ВЭТ, чтобы покрыть расходы на проведение утилизации; они же управляют системой. Сумма взноса составляет до 100 € на одну машину. О методике определения этого взноса информации нет.

Детальное описание управления системой утилизации транспортных средств, выведенных из эксплуатации в США, дано в соответствующем докладе¹⁵. В нем представлены пошаговое описание утилизации ВЭТ от первоначального демонтажа до переработки

компонентов отходов и удаления не утилизируемых отходов, а также стоимость проведения утилизационных работ на существующих предприятиях. При этом в стоимости утилизации не учитывается ряд статей затрат, в том числе стоимость разработки документации, затраты на создание самих предприятий и пр. В США уместно говорить не об управлении системой утилизации, а о ее координации. Саму систему авторециклинга формируют предприятия-демонтажеры, которые образуют Американскую ассоциацию рециклеров. Предприятия приобретают у последнего владельца автомобиль, и в зависимости от технического состояния машины ее владелец получает 50–80 \$.

Во Франции для управления авторециклингом Министерством по охране окружающей среды и Министерством промышленности создан орган «Accord cadre», использующий методы свободного рынка. Затраты предприятия на утилизацию, составляющие около 330 € на один автомобиль, окупаются доходами. Прочие статьи расходов несут другие организации: разработку законодательной базы – государство, технологическую базу – производители техники и т. д.

В Японии утилизационный сбор для обеспечения утилизации ВЭТ оплачивается покупателем при покупке нового автомобиля. Управляет системой специально созданный орган – Japan Automobile Recycling Promotion Center, сертифицированный Министерством экономики, торговли и промышленности и Министерством охраны окружающей среды. Конкретный размер суммы устанавливается производителем (импортером) автомобиля, но должен

¹³ Report from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the implementation of directive 2000/53/EC on end-of-life vehicles for the period 2002-2005. Brussels, 2007. 6 p. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52007DC0618&from=EN>

¹⁴ Bundesgesetz über das Wirtschaftliche Recycling von Deutschland (vom 10/07/1996).

¹⁵ Staudinger J., Keoleian G. A. Management of end-of-life vehicles (ELVs) in the US. Center for Sustainable System, Report No. CSS01-01. Ann Arbor ; Michigan : University of Michigan, 2001. 67 p. URL: <http://css.umich.edu/publication/management-end-life-vehicles-elvs-us>

согласовываться с контролирующими органами. Информация о методике определения ВУС₆ отсутствует.

Наибольший интерес представляет опыт утилизации ВЭТ в Нидерландах, где производители и импортеры автомобилей, как и в России, платят сбор на утилизацию автомобиля. При этом ВУС₆ в 1995 г составляла 113 €, с 1998 г. сократилась до 68 €, с 2000 г. – до 45 €, в настоящее время составляет 15 €. Системой авторециклинга управляет компания Auto Recycling Nederland (ARN), 100 % акций которой принадлежит фонду Auto & Recycling, созданному при участии правительства и автопроизводителей.

Определенный интерес представляет работа китайского ученого [2], в которой рассматривается роль величины субсидий на китайскую отрасль утилизации выведенной из эксплуатации продукции на примере автомобильных двигателей. Одновременно рассмотрены экологический эффект и экономические показатели утилизации продукции с использованием методологии системной динамики и метода компьютерного моделирования. Исследовано влияние величины государственных субсидий на ряд показателей, таких как работы производителя продукции по обеспечению ее утилизируемости на этапе проектирования; количество возвращаемых вторичных ресурсов и неиспользуемых отходов; прибыль предприятий, утилизирующих эту продукцию; цена загрязнения; социальное обеспечение и другие. Результаты исследования показали, что при всех прочих равных условиях существует оптимальная величина государственных субсидий, которая обеспечивает максимально возможное ресурсосбережение при проведении утилизации продукции, выведенной из эксплуатации.

Проведенный анализ систем утилизации показал, что, хотя требования

к деятельности по обращению с отходами являются общими, финансовые механизмы для создания систем утилизации ВЭТ в разных странах имеют свою специфику. При этом в ЕС используются три основные организационно-экономические и финансовые модели управления системой, учитывающие национальную специфику различных стран¹⁶.

В большинстве стран Евросоюза производители и импортеры техники самостоятельно создают индивидуальную систему утилизации (64 % стран) для выпускаемой ими техники в соответствии с национальными правовыми требованиями.

Эта модель является наиболее распространенной в ЕС. Преимущество этой системы проявляется в том, что производители уже на этапах проектирования и производства проводят работы по снижению трудоемкости утилизационных работ и самостоятельно финансируют утилизационные предприятия, обеспечивая их оптимальным технологическим и техническим оснащением. Это гарантирует снижение цены и повышение конкурентоспособности машины.

Производители могут избежать создания инфраструктуры для утилизации ВЭТ, если будут использовать коллективную систему (23 % стран) и услуги уже действующих предприятий для выполнения норм утилизации. Это позволяет снизить затраты на проведение утилизации. Такую модель использует примерно 1/4 часть стран ЕС. В этих странах производители и импортеры техники учреждают и финансируют некоммерческую организацию, отвечающую за управление системой утилизации ВЭТ. В данном случае эта организация является посредником между производителем техники и действующими утилизационными предприятиями, обеспечивает эти предприятия

¹⁶ Конференция «Утилизация транспортных средств в России» – YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=la-3vOoN2Aw>.

тия технологиями утилизации, которые разрабатывает производитель техники. Контроль над соблюдением технологий утилизации и выполнением норм утилизации государство оставляет за собой.

Самая непопулярная модель управления системой утилизации ВЭТ основана на законодательно введенном сборе (13 % стран), который обязаны уплачивать производители техники (утилизационный сбор) и импортеры (экологический сбор). Эти сборы поступают в госбюджет, а управление системой утилизации ВЭТ, в том числе контроль над выполнением норм утилизации и соблюдением ее технологий, берет на себя государство.

Именно такую модель выбрало Правительство России. По сути, данная модель управления системой утилизации ВЭТ аналогична той, которая использовалась в советский период. Отличие выбранной модели от прототипа заключается в том, что в СССР государство создавало, финансировало и контролировало инфраструктуру и технологии производства работ предприятий на всех этапах жизненного цикла техники; это касается и предприятий, осуществляющих рециклинг отходов всех видов, в том числе ВЭТ. Такая модель обеспечивала низкие цены на производимую технику, повышала ее конкурентоспособность и покупательную способность потребителей этой техники. Сейчас субсидирование работ по созданию системы утилизации ВЭТ должен осуществлять ее производитель, но в соответствии с законом

он может эти затраты включать в стоимость техники, т. е. фактически за утилизацию платит потребитель техники.

При этом следует отметить, что в России законодательная база системы утилизации создана позже остальных стран, постоянно дорабатывается (так, например, закон №89-ФЗ¹⁷ с момента принятия до настоящего времени претерпел более 30 редакций), а сама система пока находится на этапе обсуждения.

С необходимостью создания системы утилизации транспортных средств в России первыми столкнулись автопроизводители, экспортирующие свою продукцию, в том числе ПАО «АВТОВАЗ». В соответствии с международными требованиями производитель техники должен принимать участие в утилизации своей продукции после окончания ее использования. На предприятии была создана исследовательская лаборатория, которая, изучив опыт зарубежных стран [3], разработала мероприятия, обеспечивающие соответствие этим требованиям. Однако, ввиду отсутствия законодательного поля и механизма финансового обеспечения, в России система утилизации ВЭТ до сих пор не создана. Первая попытка ее создания¹⁸ носила декларативный характер, поскольку законодательная и финансовая базы для обеспечения такой системы были определены только в 2012 г. и только для одного вида техники¹⁹. Однако данное постановление способствовало созданию систем утилизации, в первую очередь для автомобильного транспорта [4]. В то

¹⁷ Об отходах производства и потребления : федер. закон Рос. Федерации от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ (ред. от 31.12.2017) : принят Гос. Думой Федер. Собр. Рос. Федерации 22 мая 1998 г. : одобр. Советом Федерации Федер. Собр. Рос. Федерации 10 июня 1998 г. URL: <http://ivo.garant.ru/#/document/12112084/paragraph/59112:0>

¹⁸ О проведении эксперимента по стимулированию приобретения новых автотранспортных средств взамен вышедших из эксплуатации и сдаваемых на утилизацию, а также по созданию в Российской Федерации системы сбора и утилизации вышедших из эксплуатации автотранспортных средств : постановление Правительства РФ от 31 дек. 2009 г. № 1194 // Собрание законодательства РФ. 2010 г. № 3. Ст. 319.

¹⁹ Об утилизационном сборе в отношении колесных транспортных средств : постановление Правительства РФ от 30 авг. 2012 г. № 870 // Собрание законодательства РФ. 2012 г. № 36. Ст. 4919.

же время в данном направлении учеными агропромышленного комплекса начата работа²⁰, которая продолжается и в настоящее время²¹ [5–8].

Существует еще множество исследований, посвященных изучению и созданию технологий проведения отдельных видов утилизационных работ, касающихся сбора и транспортировки ВЭТ²², сортировки деталей при утилизации²³, но их авторы не затрагивают вопрос определения ВУС₆.

Как уже отмечалось выше, в настоящее время в России ВУС₆ на транспортные средства, в соответствии с законом²⁴, назначается государством, и оно же должно обеспечивать финансирование всех затрат, которые необходимы для проведения утилизации за счет утилизационного сбора определенной величины. Однако, как показал анализ отечественных и зарубежных публикаций, касающихся утилизации ВЭТ, информация о методике определения ВУС₆ отсутствует. Это не только затрудняет анализ и определение оп-

тимального значения утильсбора, но и вызывает сомнения в правильности его определения со стороны производителей и потребителей техники.

Материалы и методы

При введении утильсбора на колесные транспортные средства²⁵ его величина была назначена в директивном порядке без аналитических расчетов, что вызвало негативную реакцию как производителей техники, так и ее потребителей. При подготовке Постановления Правительства РФ²⁶ было принято решение обосновать эту характеристику для создания системы утилизации самоходной техники, которая включает в себя сельскохозяйственную технику и технику специализированных производств. Разработчики данного постановления обратились в ГОСНИТИ (в настоящее время ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) с предложением выполнить работу по обоснованию ВУС₆ на сельхозтехнику²⁷ и технику специализированных производств²⁸. При выполнении этой работы исследователи

²⁰ Конкин М. Ю. Концептуальные основы и научное обеспечение технологической утилизации сельскохозяйственной техники : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2004. 38 с.

²¹ Игнатов В. И. Методология и технологические решения для проведения рециклинга машин и агрегатов в АПК : дис. ... д-ра технических наук. М., 2018. 460 с.

²² Aldoshin N. Zabezpečení sběru i transportu techniky na recyklaci // Sborník Mezinárodní vědecké konference nové směry ve využití zemědělské, dopravní a manipulační techniky ve vztahu k životnímu prostředí. 2012. P. 323–326.

²³ Aldoshin N. Use of Markov chains for definition of manpower of control and sorting of details // Quality and Reliability of Technical Systems. Nitra : Slovenska poľnohospodárska univerzita v Nitre, 2011. P. 10–13.

²⁴ Об отходах производства и потребления : федер. закон Рос. Федерации от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ (ред. от 31.12.2017) : принят Гос. Думой Федер. Собр. Рос. Федерации 22 мая 1998 г. : одобр. Советом Федерации Федер. Собр. Рос. Федерации 10 июня 1998 г. URL: <http://ivo.garant.ru/#/document/12112084/paragraph/59112:0>

²⁵ Об утилизационном сборе в отношении колесных транспортных средств : постановление Правительства РФ.

²⁶ Об утилизационном сборе в отношении самоходных машин и (или) прицепов к ним и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации : постановление Правительства РФ от 06.02.2016 № 81 // Собр. законодательства Рос. Федерации. 2016. № 7. Ст. 991.

²⁷ Актуализация Стратегии развития сельскохозяйственного машиностроения России на период до 2020 года по разделу подпрограммы: «Обоснование размеров утилизационного сбора для отдельных видов и категорий сельскохозяйственных машин (тракторы сельскохозяйственные, комбайны зерноуборочные, комбайны кормоуборочные, опрыскиватели, машины для уборки корнеплодов, машины для внесения минеральных и органических удобрений)» : отчет о НИР / В. С. Герасимов [и др.]. М. : ГОСНИТИ, 2014. 123 с.

²⁸ Проработка возможности введения утилизационного сбора на дорожно-строительную технику по разделу подпрограммы: «Машиностроение специализированных производств» госпрограммы РФ «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» : отчет о НИР / В. С. Герасимов [и др.]. М. : ГОСНИТИ, 2015. 122 с.

исходили из того, что создать систему одномоментно невозможно: для этого необходимо определенное время T_c . Авторами статьи была выдвинута гипотеза поэтапного формирования стратегии создания системы.

В соответствии с данной гипотезой период становления системы должен включать три этапа, показанные на рис. 1.

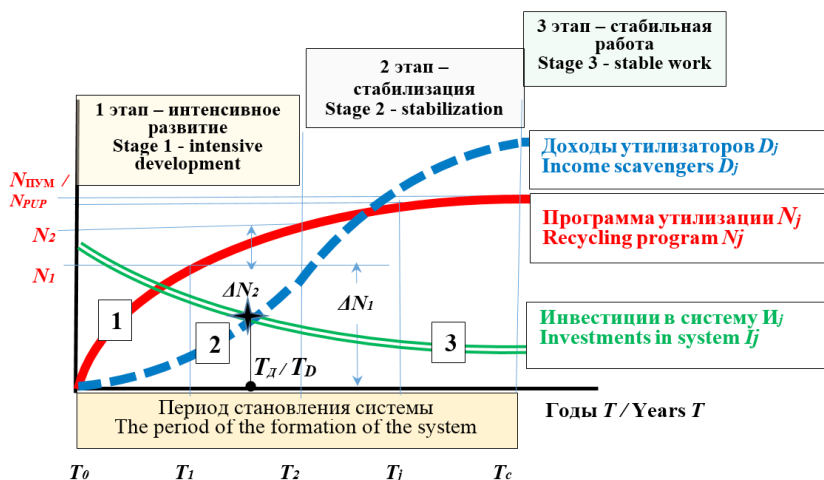
Наиболее сложным является этап интенсивного развития, который характеризуется созданием инфраструктуры, обеспечением ее технологическим оборудованием и технологической документацией, доработкой законодательной базы и выполнением других работ, требующих затрат. При постепенном увеличении программы утилизации каждый j -й год от $N_0 = 0$ до проектной мощности $N_{\text{тс}} = N_{\text{пум}}$ ежегодные инвестиции на этапе стабилизации системы будут уменьшаться, а утилизационные предприятия с момента T_c , когда система выйдет на проектную мощность $N_{\text{пум}}$, начнут получать стабильные доходы, превышающие инвестиции. В период стабильной рабо-

ты инвестиции на проведение утилизационных работ будут минимальными. Именно этот период формирования системы рассматривается в докладе²⁹ и других зарубежных работах.

Для упрощения процесса понимания взаимосвязи финансовых параметров, определяющих возможности создания системы утилизации ВЭТ, рассмотрим схему формирования данных параметров, которая приведена на рис. 2.

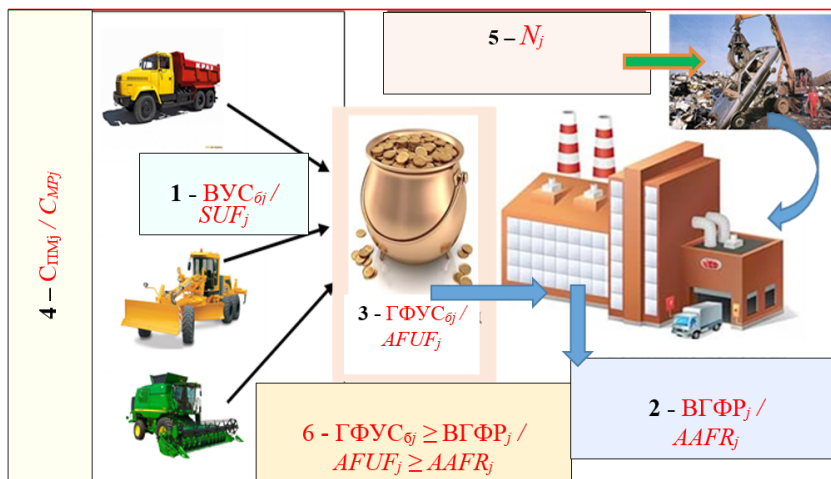
Основным параметром, определяющим финансовую сторону системы, является ВУС_{б_г} (рис. 2, поз. 1), который уплачивают производители за каждую i -ую машину, вводимую в эксплуатацию на территории России. На создание системы потребуются определенная величина годовых финансовых ресурсов (ВГФР_г, поз. 2). Для этого будет использоваться годовой фонд утилизационного сбора (ГФУС_{б_г}, поз. 3), который каждый j -й год накапливается в госбюджете.

Исходным посылом при разработке стратегии утилизации ВЭТ и определении значений ее параметров являлось



Р и с. 1. Принятая гипотеза формирования стратегия развития системы
F i g. 1. The accepted hypothesis of forming a system development strategy

²⁹ Report from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the implementation of directive 2000/53/EC on end-of-life vehicles for the period 2002-2005. Brussels, 2007. 6 p. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52007DC0618&from=EN>



Р и с. 2. Схема формирования финансовых параметров системы:

1 – величина утилизационного сбора ВУС_{6j}; 2 – величина годовых финансовых ресурсов ВГФР_j;

3 – годовой фонд утилизационного сбора ГФУС_{6j}; 4 – стоимость парка новых машин C_{пмj};

5 – парк утилизированных машин N_j; 6 – основное условие создания системы: ГФУС_{6j} ≥ ВГФР_j;

Fig. 2. The scheme for formation of financial parameters of the system: 1 – recycling fee amount SUF_j; 2 – annual financial resources amount AAFR_j; 3 – recycling fee annual fund AFUF_j; 4 – new machine park cost C_{mpj}; 5 – recycled machine park N_j; 6 – the main condition for creating a system: AFUF_j ≥ AAFR_j

условие преобладания доходной части над расходной, т. е.

$$\text{ГФУС}_{6j} \geq \text{ВГФР}_j, \quad (1)$$

а ВУС_{6j} при котором выполняется условие (1), будет оптимальной.

При соблюдении этого условия система будет полностью обеспечена финансовыми ресурсами на все виды работ, и это повысит вероятность ее разработки и внедрения.

В общем случае при определении годовых затрат, необходимых и достаточных для создания системы, требуется учитывать несколько базовых статей затрат, т. е.

$$\text{ВГФР}_j = Q_j = Q_{j1} + Q_{j2} + Q_{j3} + Q_{j4} - D_j, \quad (2)$$

где $Q_{j1} = Q_{ju} + Q_{j36}$ – затраты на формирование инфраструктуры системы (Q_{ju}) и разработку законодательной базы (Q_{j36}); $Q_{j2} = Q_{jнтд} + Q_{j26}$ – затраты производителя машин на разработку нормативно-технологических документов

и технологий (Q_{j2a}), а также на проведение безопасных и контролируемых утилизационных работ стоимостью Q_{j26} ; Q_{j3} – затраты на логистику; Q_{j4} – затраты на захоронения неиспользуемых отходов в j -ом году; D_j – доходы от реализации компонентов от ВЭТ.

Таким образом, определив ВГФР_j, требующихся для создания системы, и имея информацию о стоимости вводимого парка машин C_{пмj}, можно будет найти процентную ставку утилизационного сбора П_{сгj} для каждого года (этапа) становления системы в процентах или в денежном выражении для каждого типа (вида) техники. По договоренности с разработчиками был просчитан вариант, при котором время, необходимое для стабилизации системы, составило 3 г. В соответствии с принятой гипотезой необходимо было определить ежегодные значения ВУС_{6j} для каждого года (этапа).

Решение поставленной задачи потребовало разработать оригинальную методику, включающую определение целого ряда параметров:

- количество машин i -ого вида, находящихся в эксплуатации;
- цена одной новой машины i -ого вида, вводимой в эксплуатацию в j -ом году;
- количество утилизируемых машин всех видов в j -й год;
- масса одной машины i -ого вида;
- масса n -ого компонента в i -й машине;
- мощность и цена утилизационного предприятия k -ого вида;
- стоимость подготовительных и основных (утилизационных) работ для каждого i -ого вида машин в j -й год;
- затраты на транспортирование объектов утилизации работ в j -й год;
- затраты на разработку законодательных актов и технологий утилизации и др.

Необходимая информация была получена в 12 регионах России в процессе анкетирования предприятий АПК, использующих сельхозтехнику и технику специализированных производств, а также в полевых условиях на агропредприятиях, использующих такую технику. Значительная часть требуемой информации была получена от разработчиков постановления³⁰. Вся полученная информация была обработана с использованием методов математической статистики.

Для упрощения расчетов были разработаны алгоритм расчета³¹ [7] и компьютерные программы^{32; 33}. Более подробная информация о методике и результатах расчета приведена в различных публикациях³⁴ [6; 7].

Результаты исследования

Результаты показали, что утилизационный сбор является важным инструментом для решения проблемы утилизации ВЭТ. Величина этого сбора зависит от мощности системы, т. е. от количества ежегодно утилизируемой техники определенного вида, величины периода создания системы утилизации техники и темпов роста мощности рассматриваемой системы утилизации данной техники, т. е. от стратегии создания системы. Обязательным условием ее создания является преобладание доходной части над расходной.

Важным результатом исследования стала разработка стратегии создания системы и компьютерные программы расчета базовых величин, входящих в условие (1). Проведенные авторами расчеты с использованием данных программ позволили определить оптимальную величину ВУС₆ для сельскохозяйственной техники и техники специализированных производств для принятого варианта стратегии.

Компьютерные программы определения величин (1) позволяют рассчитать их численные значения при любых стратегиях создания системы на различных этапах ее развития.

При всех прочих условиях наиболее фондоемким этапом реализации стратегии создания системы утилизации ВЭТ конкретного вида является этап ее интенсивного развития (рис. 1), для завершения которого необходимо обеспечить финансирование всех видов работ, определяемых формулой (2).

³⁰ Об утилизационном сборе в отношении самоходных машин и (или) прицепов к ним и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации : постановление Правительства РФ от 06.02.2016 № 81 // Собр. законодательства Рос. Федерации. 2016. № 7. Ст. 991.

³¹ **Игнатов В. И.** Методология и технологические решения для проведения рециклинга машин и агрегатов в АПК : дис. ... д-ра технических наук. М., 2018. 460 с.

³² Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ : Определение затрат на создание системы утилизации сельскохозяйственной техники. Рег. № 2017613673 от 24.03.2017 г.

³³ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ : Определение эффективности системы утилизации техники специализированных производств. Рег. № 2017614301 от 11.04.2017 г.

³⁴ **Игнатов В. И.** Методология и технологические решения для проведения рециклинга машин и агрегатов в АПК.

Расчеты ВУС₆ на сельхозтехнику³⁵ [6] показали, что для проведения данного этапа развития системы «с нуля» (т. е. исходя из того, что ее инфраструктура и другие элементы полностью отсутствуют, а нормативно-законодательная база потребует доработки) достаточно будет ввести ставки утильсбора на сельхозтехнику в пределах 8 %.

Для успешного завершения данного этапа ВУС₆ может быть завышена, чтобы иметь резерв финансовых ресурсов для выполнения неучтенных видов работ. Так что завышение государством ВУС₆ на самоходную технику³⁶ можно считать закономерным явлением, при условии, что финансирование работ, определенных в формуле (2), будет осуществляться в соответствии с потребностями.

Согласно результатам расчетов, для реализации последующих этапов развития системы потребности в инвестициях будут снижаться, т. е. тренд изменения ВУС₆ коррелируется с аналогичным трендом, характеризующим изменение этой величины в Нидерландах (именно голландскую систему утилизации техники многие эксперты считают эталонной). Аналогичные результаты были получены для техники специализированных производств: ставки утильсбора для нее одного порядка со ставками на сельхозтехнику.

При проведении исследований было установлено, что затраты на проведение утилизационных работ в полной мере зависят от массы утилизируемой машины. Были просчитаны коэффициенты удельной мощности самоходной техники (соотношение мощности силовой

установки к массе машины: кВт/т). Величина этого коэффициента для парка самоходной техники изменяется более чем в 4 раза: от 10 до 45 кВт/т. Исходя из этого, в качестве идентификационной характеристики, определяющей ВУС₆ на самоходную технику, рекомендована масса машины; именно от массы зависят не только затраты на проведение утилизации, но и доходы, получаемые утилизаторами от реализации компонентов утилизируемой машины.

Полученные авторами результаты расчетов оптимальных значений ВУС₆ для самоходной техники были использованы при разработке Постановления Правительства³⁷.

Обсуждение и заключение

Правительство России, выбрав модель утилизации, основанную на утилизационном сборе, взяло на себя ответственность за создание системы утилизации ВЭТ. Базовой характеристикой, определяющей возможность создания данной системы при выбранной модели управления, является ВУС₆. Однако в России такая методика отсутствует, а зарубежные принципы определения этой характеристики в силу национальных особенностей, экономического положения и специфики организационно-законодательной базы в России неприменимы.

Однако практика показала, что введенная в Постановлении Правительства России³⁸ ВУС₆ на самоходную технику значительно превышает оптимальное значение. С одной стороны, это снижает конкурентоспособность самоходных машин и покупательную

³⁵ Актуализация Стратегии развития сельскохозяйственного машиностроения России на период до 2020 года по разделу подпрограммы: «Обоснование размеров утилизационного сбора для отдельных видов и категорий сельскохозяйственных машин (тракторы сельскохозяйственные, комбайны зерноуборочные, комбайны кормоуборочные, опрыскиватели, машины для уборки корнеплодов, машины для внесения минеральных и органических удобрений)»: отчет о НИР / В. С. Герасимов [и др.]. М. : ГОСНИТИ, 2014. 123 с.

³⁶ Об утилизационном сборе в отношении самоходных машин и (или) прицепов к ним и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации : постановление Правительства РФ от 06.02.2016 № 81 // Собр. законодательства Рос. Федерации. 2016. № 7. Ст. 991.

³⁷ Там же.

³⁸ Там же.

способность предприятий, использующих самоходную технику. Это вызвано, скорее всего, тем, что начавшаяся несколько лет назад экспансия зарубежной техники привела к ее доминированию в отраслях, использующих эту технику, в том числе и в АПК. Правительство России повысило одновременно и утилизационный, и экологический сборы, которые платят отечественные производители и импортеры. Так, например, ВУС₆ на новые сельхозтракторы колеблется в пределах 10,5–62 % от стоимости новой машины³⁹, а на машины, вводимые в эксплуатацию с наработкой более 3 лет (в основном это импортные машины), ВУС₆ составляет в пределах 66–190 % от стоимости машины. С другой стороны, полученные от утильсбора средства используются для субсидирования отечественных предприятий, производящих самоходную технику.

По мнению экспертов, резкое повышение ВУС₆ на приобретение российскими предпринимателями устаревшей самоходной техники должно существенно снизить поток такой техники, поступающей в Россию. Подобное повышение можно рассматривать как положительный фактор, обеспечивающий заградительный барьер от устаревшей зарубежной техники и способствующий развитию отечественного машиностроения.

Следует отметить, что назначение в Постановлении в качестве идентификационной характеристики ВУС₆ мощности силовой установки сельхозтехники некорректно. Авторы статьи полагают, что такой характеристикой должна быть масса машины, которая напрямую связана с затратами на ее утилизацию.

Обращает на себя внимание то, что утилизационный сбор на колесную технику взимается уже 6 лет, а на самоходную – почти 2 года, но вопрос о разработке и реализации системы утили-

зации техники пока не поставлен на государственный контроль.

К настоящему моменту годовой фонд утилизационного сбора, поступивший в госбюджет (предназначенный для финансирования работ по созданию систем утилизации колесной и самоходной техники) исчисляется десятизначными числами, а величина годовых ресурсов, затрачиваемых на создание системы, близка к нулю, т. е. соотношение (3) стремится к бесконечности:

$$ГФУС_{г/} / ВГФР_j \rightarrow \infty \quad (3).$$

Как показывают результаты исследования китайского ученого [2], величина инвестиций утилизационным предприятиям со стороны государства из Фонда утилизационного сбора влияет на объемы компонентов, извлекаемых из отходов ВЭТ. При снижении таких инвестиций предприятиям становится невыгодно заниматься компонентами, пользующимися низким спросом на рынке вторичных материалов, и эти компоненты вывозятся на свалки.

При ситуации, соответствующей условию (3), ожидать улучшения ситуации с утилизацией ВЭТ не приходится.

Отсутствие контролируемой государством системы утилизации ВЭТ не означает того, что такая техника не подвергается утилизации. Отсутствие данной системы приводит к уходу предприятий малого и среднего бизнеса «в тень». Происходящий в настоящее время процесс обращения с ВЭТ можно назвать «псевдоутилизацией», поскольку утилизационные предприятия, игнорируя требования ресурсосбережения и экологии, осуществляют утилизацию ВЭТ по «черным» схемам, нарушая законодательство России. О негативном влиянии данного процесса на экономику страны сказал на заседании Совета по стратегическому развитию и приоритетным проектам⁴⁰

³⁹ Там же.

⁴⁰ Заседание Совета по стратегическому развитию и приоритетным проектам. Президент России. URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/53333>

В. В. Путин, отметив, что этот вид деятельности сильно криминализован и требует создания эффективного механизма обращения с отходами.

По данным НП НСРО «РУСЛОМ.КОМ», через руки «черных» утилизаторов проходит около 60 % металлолома. При такой «утилизации» в металлолом и в последующую переплавку попадают пригодные для работы детали, которые могут служить в качестве запасных частей для самоходных машин [9], что практикуется за рубежом. Особенно это актуально для импортной техники, приобретение запасных частей для которой требует значительных затрат времени и финансов.

Для деталей с допустимым износом учеными разработаны технологии, которые позволяют восстанавливать 100 и более процентов начального ресурса детали [10].

В неиспользованные отходы попадают пластмасса, резина, стекло и другие компоненты утилизируемой самоходной техники, невостребованные и плохо реализуемые на вторичном рынке. При использовании технологий переработки, которые разработаны исследователями [11], безвозвратные потери этих компонентов сокращаются в разы.

Отсутствие государственного участия в создании систем утилизации ВЭТ приводит к тому, что количество неиспользованных отходов, которые размещаются без соблюдения экологических требований, возрастает; это приводит к ухудшению экологической обстановки в России. В результате этого государство

несет огромные материальные убытки от потери вторичных ресурсов, которые извлекаются из техники не полностью и реализуются в основном по «серым» схемам, без уплаты налогов. При этом для восстановления экологического равновесия потребуются средства, несоизмеримо большие, чем «экономия» Фонда утильсбора [12].

В то же время, по нашей информации, Правительством РФ уже подготовлен проект Постановления о введении утильсбора на продукцию тяжелого и энергетического машиностроения, пищевой промышленности, станкостроения. Информация о методике определения ВУС₆ и планах по созданию систем утилизации техники под государственным контролем отсутствует.

Публикации и другие научные разработки авторов по данной тематике показали, что размеры утилизационного сбора можно определить путем расчетов, исходя из стратегии развития системы утилизации определенного вида техники. В качестве базы для разработки расчетного механизма этого важного экономического параметра может быть использована представленная в данной статье методика. Правительству остается сделать несколько последовательных шагов: разработать конкретные параметры стратегии создания систем утилизации выведенной из эксплуатации техники различных видов, определить оптимальные параметры ВУС₆, финансировать создание и реализацию этих систем для решения проблемы рециклинга отходов производства и потребления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Hiratsuka J., Sato N., Yoshida H. J.** Current status and future perspectives in end-of-life vehicle recycling in Japan // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2014. Vol. 16, Issue 1. P. 21–30. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-013-0168-z>
2. **Chen M.** End-of-life vehicle recycling in China: Now and the future // *JOM*. 2005. Vol. 57, Issue 10. P. 20–26. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-005-0146-6>
3. **Петров Р. Л.** О мировом опыте организации национальных систем авторециклинга // *Рециклинг отходов*. 2008. № 5 (17). С. 2–11.

4. Трофименко Ю. В., Воронцов Ю. М., Трофименко К. Ю. Утилизация автомобилей : монография / под ред. Ю. В. Трофименко. М. : АКПРЕСС, 2011. 333 с.
5. Утилизация в системе обновления сельскохозяйственной техники в АПК : монография / В. И. Черноиванов [и др.]. М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. 124 с.
6. Утилизация сельскохозяйственной техники: проблемы и решения : науч. изд. / С. А. Соловьев [и др.]. М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2015. 172 с.
7. Ignatov V. I. Formation of equipment disposal system in the agro-industrial complex of Russia as a part of a unified production and consumption wastes handling system // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12, Issue 8. P. 2058–2072. URL: <http://medwelljournals.com/abstract/?doi=jea.sci.2017.2058.2072>
8. Утилизация техники в системе АПК : монография / Н. В. Алдошин [и др.]. М. : Триада, 2014. 222 с.
9. Aldoshin N. Secondary use of spare parts // AgritechScience. 2015. Vol. 9, no. 2. P. 1–10. URL: <http://www.agritech.cz/clanky/2015-2-2.pdf>
10. Hardening parts by chrome plating in manufacture and repair / V. K. Astanin [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. P. 032008. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/3/032008>
11. Астанин В. К. Технология мониторинга и рециклинга полимеров: математические аспекты : монография. Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2006. 120 с.
12. Экологические аспекты при проведении утилизации самоходной техники / В. С. Герасимов [и др.] // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22, № 4. С. 31–37. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-4-31-37>

Поступила 12.10.2018; принята к публикации 10.12.2018; опубликована онлайн 29.03.2019

Об авторах:

Игнатов Владимир Ильич, главный специалист, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), доктор технических наук, доцент, ResearcherID: T-4807-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8154-6379>, ignatowww@inbox.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, ResearcherID: H-4089-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>, dorokhov@rgau-msha.ru

Герасимов Валерий Сергеевич, ведущий специалист, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ResearcherID: T-4186-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4540-7408>, rosagroserve@list.ru

Денисов Вячеслав Александрович, руководитель научного направления «Обеспечение надежности сельскохозяйственной техники», ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: T-4062-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3245-394X>, va.denisov@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. И. Игнатов – подготовка начального варианта текста; А. С. Дорохов – методическое руководство; В. С. Герасимов – анализ и доработка текста; В. А. Денисов – подготовка и анализ литературных данных, редактирование текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Hiratsuka J., Sato N., Yoshida H.J. Current status and future perspectives in end-of-life vehicle recycling in Japan. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2014; 16(1):21–30. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-013-0168-z>

2. Chen M. End-of-life vehicle recycling in China: Now and the future. *JOM*. 2005; 57(10):20-26. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-005-0146-6>
3. Petrov R.L. [On the world experience in organization of vehicle recycling national systems]. *Retsikling otkhodov* = Waste Recycling. 2008; 5:2-11. (In Russ.)
4. Trofimenko Yu.V., Vorontsov Yu.M., Trofimenko K.Yu. [Vehicle recycling: A monograph]. Moscow: AKIPRESS, 2011. (In Russ.)
5. Chernoiivanov V.I., Gerasimov V.S., Solovyev R.Yu., Buryakov S.A., Rusakov A.N. [Utilization in system of agricultural machinery innovation in agriculture industrial complex]. Moscow: Rosinformagrotech; 2014. (In Russ.)
6. Solovyev S.A., Fedorenko V.F., Ignatov V.I., Gerasimov V.S., Makeev V.A., Golubev I.G. [Recycling of agricultural machinery: problems and solutions]. Moscow: Rosinformagrotekh; 2015. (In Russ.)
7. Ignatov V.I. Formation of equipment disposal system in the agroindustrial complex of Russia as a part of a unified production and consumption waste handling system. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017; 12(8):2058-2072. Available at: <http://medwelljournals.com/abstract/?doi=jeas.ci.2017.2058.2072>
8. Aldoshin N.V., Ivlev A.A., Leskonog Yu.A., Lylin N.A. [Recycling of equipment in system of agroindustrial complex: a monograph]. Moscow: Triada; 2014. (In Russ.)
9. Aldoshin N. Secondary use of spare parts. *AgritechScience*. 2015; 9(2):1-10. Available at: <http://www.agritech.cz/clanky/2015-2-2.pdf> (In Russ.)
10. Astanin V.K., Pukhov E.V., Stekolnikov Y.A., Emtsev V.V., Golikova O.A. Hardening parts by chrome plating in manufacture and repair. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 327:032008. DOI: <http://doi.org/10.1088/1757-899X/327/3/032008>
11. Astanin V.K. [Polymer monitoring and recycling technology: mathematical aspects: A monograph]. Voronezh: Voronezh State University Publ., 2006. (In Russ.)
12. Gerasimov V.S., Ignatov V.I., Pekhalsky I.A., Makuev V.A., Sirotov A.V. Ecological aspects of self-moving machines utilization. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* = Ecology and Industry of Russia. 2018; 22(4):31-37. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-4-31-37> (In Russ.)

Received 12.10.2018; revised 10.12.2018; published online 29.03.2019

About authors:

Vladimir I. Ignatov, Leading Researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5^{1st} Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), D.Sc. (Engineering), Associate Professor, ResearcherID: T-4807-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8154-6379>, ignatoww@inbox.ru

Aleksey S. Dorokhov, Professor, Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of RAS, Deputy Director on Scientific and Organizational Work, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5^{1st} Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: H-4089-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>, dorokhov@rgau-msha.ru

Valeriy S. Gerasimov, Leading Specialist, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5^{1st} Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), ResearcherID: T-4186-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4540-7408>, rosagroserv@list.ru

Viatcheslav A. Denisov, Head, Scientific Direction "Ensuring the Reliability of Agricultural Machinery", Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5^{1st} Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: T-4062-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3245-394X>, vim@vim.ru

Contribution of the authors:

V. I. Ignatov – preparation of the initial version of the text; A. S. Dorokhov – methodical part; V. S. Gerasimov – analysis and revision of the text; V. A. Denisov – preparation and analysis of literary data, editing the text.

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

Информация для авторов и читателей

Научный журнал «Инженерные технологии и системы» публикует оригинальные научные исследования, способствующие развитию науки в области инженерных систем и технологий.

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

- 01.04.01 Приборы и методы экспериментальной физики
- 01.04.05 Оптика
- 01.04.13 Электрофизика, электрофизические установки
- 05.20.01 Технологии и средства механизации сельского хозяйства
- 05.20.02 Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве
- 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве

Не допускается направление в редакцию уже опубликованных статей или статей, отправленных на публикацию в другие журналы. **В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий опубликованная статья будет ретрагирована (отозвана из печати).** Мониторинг несанкционированного цитирования осуществляется с помощью систем «Антиплагиат» и CrossCheck.

Журнал приветствует статьи, имеющие потенциально высокий импакт-фактор и/или содержащие материал о значительных достижениях в указанных направлениях. Особое внимание следует уделить качеству перевода. Желательно, чтобы он был выполнен носителем английского языка.

При подготовке статьи к публикации в журнале «Инженерные технологии и системы» необходимо учесть следующие пункты.

1. Указать **УДК**.

2. **Заголовок статьи** должен кратко и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного исследования. *Приводится на русском и английском языках.*

3. **Аннотация** (200–250 слов) выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В ней должны быть четко обозначены следующие составные части:

- 1) Введение (Introduction);
- 2) Материалы и методы (Materials and Methods);
- 3) Результаты исследования (Results);
- 4) Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion).

Приводится на русском и английском языках.

4. **Ключевые слова** (5–10) являются поисковым образом научной статьи. В связи с этим они должны отражать основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования. *Приводятся на русском и английском языках.*

5. **Благодарности.** В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам. *Приводятся на русском и английском языках.*

6. **Основной текст** статьи излагается на русском или английском языках.

1) Введение – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

2) Обзор литературы. Необходимо описать основные (последние по времени) исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы; выделить нерешенные вопросы в пределах общей проблемы, которым посвящена статья.

3) Материалы и методы. В данном разделе описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, использованная аппаратура; даются подробные сведения об объекте исследования; указывается последовательность выполнения исследования и обосновывается выбор используемых методов (наблюдение, опрос, тестирование, эксперимент, лабораторный опыт и т. д.).

4) Результаты исследования. Это основной раздел, цель которого – при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно эти данные.

5) Обсуждение и заключение. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области.

7. **Список использованных источников** (оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008). Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 30–40 источников. Из них за последние 3 года – не менее 20, иностранных – не менее 15. Следует указать DOI или адрес доступа в сети Интернет. *Оформляется на русском и английском языках.*

8. **Об авторах.** Ф.И.О., организация(и), адрес организации(й) (требуется указать все места работы автора, в которых выполнялись исследования (постоянное место, место выполнения проекта и др.)), должность и ученое звание, ORCID, ResearcherID, Scopus ID, электронная почта, телефон, почтовый адрес для отправки авторского экземпляра. Приводится на русском и английском языках.

9. **Заявленный вклад соавторов.** В конец рукописи необходимо включить примечания, в которых разъясняется фактический вклад каждого соавтора в выполненную работу. *Приводится на русском и английском языках.*

10. **Техническое оформление.**

1) Редакция принимает тексты, сохраненные в формате .doc, .docx, .rtf. Желательно использовать шрифт Times New Roman, кегль 14 и интервал 1,5 строки. Расстановка переносов вручную не допускается. Запрещается использовать двойные пробелы в тексте, а также выполнять отступы (красная строка), используя пробелы.

2) Формулы набираются сочетанием основного шрифта и шрифта Symbol (исключение для дробей, сумм, квадратного корня) в Microsoft Equation 3.0 (Редактор формул в Microsoft Word) или Math Type 6. Латинские знаки в формулах и обозначениях (как в тексте, так и на рисунках) набираются курсивом. Формулы нумеруются в круглых скобках. Нумеровать следует только те формулы и уравнения, на которые есть ссылка в последующем изложении.

3) Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

4) Рисунки могут быть представлены в растровом или векторном формате с разрешением не ниже 300 dpi. Они должны допускать редактирование текста и возможность изменения размеров. Все графические данные помещаются в текст статьи, а также высылаются дополнительно в виде отдельных файлов. Разнохарактерные иллюстрации необходимо приводить к единому стилю графического исполнения, соблюдая единообразие их оформления. Графики, схемы и диаграммы необходимо оформлять в Microsoft Excel.

При подаче статьи в редакцию автор соглашается с положениями прилагаемого лицензионного договора.

Важным этапом в процессе отбора статьи является рецензирование. В журнале «Инженерные технологии и системы» принято «двойное слепое» (рецензент и автор не знают имен друг друга) рецензирование статей. Рецензент на основании анализа статьи принимает решение о рекомендации ее к публикации или о ее отклонении. В случае несогласия автора статьи с замечаниями рецензента его мотивированное заявление рассматривается редакционной коллегией.

Политика редакционной коллегии журнала базируется на современных юридических требованиях в отношении клеветы, авторского права, законности и плагиата, поддерживает Кодекс этики научных публикаций, сформулированный Комитетом по этике научных публикаций, и строится с учетом этических норм работы редакторов и издателей, закрепленных в Кодексе поведения и руководящих принципах наилучшей практики для редактора журнала и Кодексе поведения для издателя журнала, разработанных Комитетом по публикации этической 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. Подписной индекс в каталоге агентства «Роспечать» – 70539.

Вдовин Сергей Михайлович – главный редактор. Тел.: +7 (8342) 24-48-88.

Сенин Петр Васильевич – заместитель главного редактора. Тел.: +7 (8342) 23-32-60.

Гордина Светлана Викторовна – ответственный секретарь. Тел.: +7 (8342) 48-14-24.

Information for authors and readers of the journal

“Engineering Technologies and Systems” Journal accepts unpublished earlier original research results promoting the development of science in the field of engineering system and technologies.

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Technologies and Means of Agricultural Mechanization

Electrotechnologies and Electrical Equipment in Agriculture

Technologies and Means of Maintenance in Agriculture

It is not allowed to submit papers that have already been published or sent for publication to other journals. **In case of multiple submission of a manuscript, the published article will be retracted.** Monitoring of unauthorized citation is implemented by means of AntiPlagiat and CrossCheck systems.

The Journal gives preference to the articles with potentially high impact factor and/or containing materials about significant achievements in the specified areas of science. Special attention should be paid to the quality of the translation. Preferably it should be made by a native English speaker.

To submit an article in the journal Engineering Technologies and Systems you should know:

1. It is necessary to indicate the **Universal Decimal Classification (UDC)** code.

2. **The title of the article** should accurately reflect the content of the article, the subject matter and the results of the research conducted.

The title should be written in Russian and English.

3. **The abstract** (200–250 words) serves as an enhanced title of the article and briefly presents its content. The abstract consists of the following components:

1) Introduction;

2) Materials and Methods;

3) Results;

4) Discussion and Conclusion.

The abstract should be written in Russian and English.

4. Keywords (5–10) make the search profile of the scientific article. In this regard, they should reflect the main provisions, achievements, results and terminology of the scientific research.

Keywords should be written in Russian and English.

5. **Acknowledgements.** In this section the author may mention the people who helped them to prepare the article or the organizations that provided financial support. It is considered good style to express gratitude to anonymous reviewers.

Acknowledgements should be written in Russian and English.

6. **The main body** of the article should be written in Russian or in English.

1) Introduction. It contains formulation of the scientific problem, its relevance, connection with the most important tasks to be solved, the importance for the development of a particular area of science or practical activities.

2) Literature Review. It is necessary to describe the main (recent) pieces of research and publications relied upon by the author, modern views on the problem, difficulties in solving the problem as well as to highlight the unresolved issues within the general problem of the article.

3) Materials and Methods. This section describes the process of designing the experiment, the methods and equipment used; it gives detailed information about the subject and sequence of the research, justifies the choice of the methods used (observation, survey, testing, experiment, etc.).

4) Results. This is the main section, the purpose of which is to prove the working hypothesis (hypotheses) by analyzing, generalizing and explaining the data. The results should be brief, but they should provide sufficient information to evaluate the conclusions drawn. It should also be justified why the particular data were chosen for the analysis.

5) Discussion and Conclusion. In conclusion, the results of understanding the topic should be summarized; conclusions, generalizations and recommendations arising from the work should be made, their practical significance should be emphasized and the main directions for further research in the studied area should be determined.

7. **References** should be given in accordance with the requirements of the *GOST R 7.0.5–2008* standard. The original sources from scientific journals included in the global citation indices should be cited first of all. It is desirable to refer to 30–40 sources. Of these, at least 20 sources should be those published over the past 3 years and at least 15 foreign ones. DOI or the URL of the source should be indicated.

References should be written in Russian and English.

8. Information **about author(s)** includes: the author's first name and last name, the name of the institution and its address (it is required to specify all the institutions where the author works and where the research was conducted (permanent place of work, the place where the project was done, etc.). The author's position and academic title, ORCID, ResearcherID, Scopus ID, e-mail, phone number, postal address for sending a personal copy of the Journal issue.

Information about the authors should be written in Russian and English.

9. **Contribution of the authors.** At the end of the manuscript, the authors should include notes that explain the actual contribution of each co-author to the work performed.

Contribution of the authors should be written in Russian and English.

10. **Manuscript Format Guidelines.**

1) The manuscript should be typed in the Microsoft Word text processing program for Windows (.doc, .docx, .rtf); sheet size – A4, Times New Roman font, font size – 14, line spacing – 1.5. Manual hyphenation is not allowed. It is forbidden to use double spaces in the text, as well as to indent (red line) using spaces.

2) Formulas are typed by combining the main font and the Symbol font (exception for fractions, sums, square root) in Microsoft Equation 3.0 (Formula Editor in Microsoft Word) or Math Type 6. Latin symbols in formulas and notation (both in the text and in the figures) typed in italics. Formulas are numbered in parentheses. Only those formulas and equations referenced in the following presentation should be numbered.

3) All titles, signatures and structural elements of graphs, tables, charts, etc., are to be provided in Russian and English.

4) Figures can be presented in raster or vector format with a resolution of at least 300 dpi. They should allow text editing and resizability. All graphic data are placed in the text of the article, as well as sent additionally as separate files. Diverse illustrations should be brought to a single style of graphic performance, while respecting the uniformity of their design. Graphs, charts and diagrams must be drawn up in Microsoft Excel.

When submitting an article to the Journal, the author agrees with the provisions of the attached license agreement.

As part of the submission, the journal will peer review your article before deciding whether to publish it. *Engineering Technologies and Systems* journal uses double-blind review, which means that both the reviewer and author identities are concealed from the reviewers, and vice versa. On the basis of the analysis of the article, the reviewer makes a decision whether to recommend the article for publication or reject it. If the author disagrees with the reviewer's comments, their reasoned statement shall be considered by the Editorial Board.

Editorial staff's policy is based on modern legal requirements concerning libel, copyright, legitimacy, plagiarism, ethical principles, kept in community of leading scientific issues publishers. Journal's editorial policy is based upon traditional ethical principles of Russian academic periodicals; it supports Academic Periodicals Ethical Codex, stated by Committee on Publication Ethics (Russia, Moscow) and it is formed in account of standards of ethics of editors' and publishers' work confirmed by Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors and Code of Conduct for Journal Publishers, developed by Committee on Publication Ethics (COPE).

Free reproduction of the Journal's materials for personal purposes and free use for information, scientific, educational and cultural purposes is allowed in accordance with articles 1273 and 1274 of Chapter 70, part 4 of the Civil Code of the Russian Federation. Other types of use are possible only after the conclusion of relevant written agreements with the right holder.

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 on the basis of a subscription, requests of higher education institutions, educational institutions and individuals. The subscription index in the catalogue of the agency of Rospechat is 70539.

Sergey M. Vdovin – Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 244888.

Petr V. Senin – Deputy Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 233260.

Svetlana V. Gordina – Executive Editor. Tel.: +7 (8342) 481424.

Редактор – *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 05.03.2019 г. Дата выхода в свет 29.03.2019 г.

Формат $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 11,70.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 250 экз. Заказ № 523. 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»)



Editor *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 05.03.2019. Date of publishing 29.03.2019.

Sheet size $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Conventional printed sheets 11,70.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 250 copies. Order no. 523. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia
(Publishing House of National Research Mordovia State University)

