

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202003 ISSN 2658-4123 (Print), 2658-6525 (Online)

Том 30, № 3. 2020

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

16+



Vol. 30, no. 3. 2020

SCIENTIFIC JOURNAL
Founded in January 1990
Issued quarterly

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

DOI: 10.15507/2658-4123

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

Предыдущее название (до 2019 года):
Вестник Мордовского университета

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

The previous name until beginning of 2019:
Mordovia University Bulletin

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

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

Является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ),
Open Access Scholarly Publishers Association (OASPA),

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», 2020

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 науки и высшего образования Российской Федерации при поступлении соответствующего запроса.

Журнал индексируется и архивируется в базах данных:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

EBSCO

Журнал является членом Open Access Scholarly Publishers Association (OASPA),

Directory of Open Access Journals (DOAJ), Комитета по этике научных публикаций, Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), CrossRef и международного сообщества рецензентов Publons

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



“Engineering Technologies and Systems” Journal

accepts unpublished earlier original research results promoting the development of science in the field of engineering systems and technologies.

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Technologies and Means of Agricultural Mechanization

Electrotechnologies and Electrical Equipment in Agriculture

Technologies and Maintenance Means in Agriculture

In order to permit complex expert evaluation, all manuscripts undergo double-blind peer review. All reviewers are acknowledged experts on the subject of peer-reviewed materials. The reviews are stored at the Journal's editorial office for a period of five years. Reviews (or a substantiated rejection) are forwarded by the Editorial Board to the author(s) of the submitted article. Reviews are also forwarded on request to the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

The journal is indexed and archived by databases:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Index of Scientific Citations

EBSCO

The journal is a member of Open Access Scholarly Publishers Association (OASPA),
Directory of Open Access Journals (DOAJ), Committee on Publication Ethics,
Association of Scientific Editors and Publishers (ASEP), CrossRef
and the international community of reviewers Publons

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



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Сенин Пётр Васильевич – *заместитель главного редактора*, проректор по научной работе ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-3400-7780, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru (Саранск, 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 Бартынского государственного университета, профессор кафедры экологии и природопользования ФГБОУ ВО «Московский педагогический государственный университет», доктор биологических наук, профессор (Бартын, Турция)

Булгаков Алексей Григорьевич – профессор Института строительного дела Дрезденского технического университета, доктор технических наук, профессор (Дрезден, Германия)

Димитров Валерий Петрович – заведующий кафедрой управления качеством ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-1439-1674 (Ростов-на-Дону, 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)

Истомина Наталья Леонидовна – начальник отдела физических наук Российской академии наук, заместитель академика-секретаря по научно-организационной работе ОФН РАН, профессор кафедры управления инновациями ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», главный редактор научно-технического журнала «Фотоника», доктор физико-математических наук (Москва, 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 механики 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 Университета Лафборо, кандидат физико-математических наук (Лафборо, Великобритания)

Кухарев Олег Николаевич – ректор ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-3519-4066 (Пенза, Россия)

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

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

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

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

Салем Абдель-Бадех Мохамед – руководитель Исследовательских лабораторий в области искусственного интеллекта и знаний, профессор факультета компьютерных и информационных наук университета «Ain Shams», доктор наук в области компьютерных технологий, заслуженный профессор (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, Scopus ID: 6507978465 (Иркутск, Россия)

Ямашкин Анатолий Александрович – заведующий кафедрой землеустройства и ландшафтного планирования ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор географических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-9995-8371 (Саранск, 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)
- Valeriy P. Dimitrov** – Head of the Chair of Quality Management, Don State Technical University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-1439-1674 (Rostov-on-Don, Russia)
- 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)
- Natalia L. Istomina** – Head of Physical Sciences Department, Russian Academy of Sciences, Deputy of Academic Secretary for Scientific and Organizational Work, Professor of Innovation Management Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), Editor-in-Chief, Photonics Russia, D.Sc. (Phys.-Math.) (Moscow, Russia)
- Vladimir N. Kechemaykin** – Director of Ruzaevka Institute of Mechanical Engineering, National Research Mordovia State University, Ph.D. (Economics) (Saransk, Russia)
- Aleksandr V. Kotin** – Head of Chair of Mechanization of Agricultural Production Processing, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-0078-1866 (Saransk, Russia)
- Fedor V. Kusmartsev** – Dean of Institute of Physics, Loughborough University, Ph.D. (Phys.-Math.) (Loughborough, Great Britain)
- Oleg N. Kukharev** – Rector of Penza State Agrarian University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0002-3519-4066 (Penza, 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** – Principal Researcher of Laboratory of Optical Spectroscopy of Laser Materials, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Phys.-Math.), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-8503-8486 (Saransk, 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, ORCID: 0000-0001-9995-8371 (Saransk, Russia)
- Vladimir T. Yerofeev** – Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Dean of Architectural and Civil Engineering Faculty, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Engineering), Professor (Saransk, 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

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Суханова М. В., Суханов А. В., Войнаш С. А. Интеллектуальная система управления динамическими процессами смешивания в машинах для обработки семян с высокоэластичными рабочими органами.....	340
Саитов В. Е., Фарафонов В. Г., Саитов А. В. Теоретическое обоснование высоты расположения выхода загрузочного бункера в машине выделения вредных примесей мокрым способом.....	355
Алдошин Н. В., Мосяков М. А. Результаты камеральных работ уборки белого люпина очесывающей жаткой с гребенками для крупносемянных культур.....	377
Бышов Н. В., Успенский И. А., Юхин И. А., Чаткин М. Н., Лимаренко Н. В. Концептуальная модель энергетической эффективности получения экологически безопасного утилизационного свиного бесподстилочного навоза.....	394
Савин В. Ю. Определение угла трения между колосом пшеницы и очесывающей гребенкой.....	413

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Чумаков П. В., Мартынов А. В., Коломейченко А. В., Хасан И. Х., Коломейченко А. С. Оценка технического состояния круглых шестеренных гидронасосов навесных гидросистем тракторов.....	426
Величко С. А., Мартынова Е. Г., Иванов В. И. Оценка предельного состояния тестоделительных машин вакуумно-поршневого типа по критерию расхода масла.....	448

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Чугунов М. В., Полунина И. Н., Пьянзин А. М. Проектирование электромобиля-трайка на базе параметрических CAD/CAE-моделей.....	464
Стребков Д. С., Шогенов Ю. Х., Бобовников Н. Ю. Повышение эффективности солнечных электростанций.....	480
Харманда Г., Антибас И. Р., Дьяченко А. Г. Оптимизация топологии на основе надежности с использованием двух альтернативных подходов оптимального фактора безопасности: применение к мостовым конструкциям.....	498
Информация для авторов и читателей (на рус. яз.).....	512
Информация для авторов и читателей (на англ. яз.).....	514

CONTENTS

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

Sukhanova M. V., Sukhanov A. V., Voinash S. A. Intelligent Control Systems for Dynamic Mixing Processes in Seed Processing Machines with Highly Elastic Working Bodies.....	340
Saitov V. E., Farafonov V. G., Saitov A. V. Theoretical Underpinnings of the Parameters of Device for Cleaning Grain from Ergot Sclerotia.....	355
Aldoshin N. V., Mosyakov M. A. The Results of the Laboratory Studies of Harvesting the White Lupine by a Stripper Header with Fingers for Large Seed Crops.....	377
Byshov N. V., Uspenskiy I. A., Yukhin I. A., Chatkin M. N., Limarenko N. V. Conceptual Model of Energy Efficiency for Environmentally Safe Utilization of Liquid Pig Manure.....	394
Savin V. Yu. Determination of the Friction Angle between the Wheat Ear and Stripper Fingers.....	413

TECHNOLOGIES AND MAINTENANCE MEANS IN AGRICULTURE

Chumakov P. V., Martynov A. V., Kolomeychenko A. V., Hasan I. H., Kolomeychenko A. S. Evaluation of Technical Condition of Round Gear Hydraulic Pumps of Tractor Mounted Hydraulic Systems.....	426
Velichko S. A., Martynova E. G., Ivanov V. I. The Assessment of the Limit State of the Vacuum Piston Type Dough Divider by Oil Consumption.....	448

MECHANICAL ENGINEERING

Chugunov M. V., Polunina I. N., Pjanzin A. M. E-Tricycle Vehicle Design Based on Parametric CAD/CAE Models.....	464
Strebkov D. S., Shogenov Yu. Kh., Bobovnikov N. Yu. Improving the Efficiency of Solar Power Plants.....	480
Kharmanda G., Antypas I. R., Dyachenko A. G. Reliability-Based Topology Optimization Using Two Alternative Inverse Optimum Safety Factor Approaches: Application to Bridge Structures.....	498
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in Russian)</i>	512
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in English)</i>	514

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

УДК 631.3.02:631.5

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202003.340-354



Интеллектуальная система управления динамическими процессами смешивания в машинах для обработки семян с высокоэластичными рабочими органами

М. В. Суханова^{1*}, А. В. Суханов^{2,3}, С. А. Войнаш⁴

¹Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ
ВО «Донской государственный аграрный университет»
(г. Зерноград, Россия)

²Ростовский филиал АО «Научно-исследовательский
и проектно-конструкторский институт информатизации,
автоматизации и связи на железнодорожном транспорте»
(г. Ростов-на-Дону, Россия)

³ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет
путей сообщения» (г. Ростов-на-Дону, Россия)

⁴ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный
университет» (г. Новосибирск, Россия)

*m_suhanova@list.ru

Введение. Разработка интеллектуальных систем управления с помощью различных производственных и технологических процессов является актуальной проблемой. Обработка семян перед посевом – важный сельскохозяйственный процесс, без которого невозможно получение запланированного урожая высокого качества.

Материалы и методы. Для создания интеллектуальной системы управления процессами смешивания в машинах для обработки семян перед посевом технологический процесс предпосевной обработки следует рассматривать как многоуровневую биотехническую систему. В процессе предпосевной обработки семян между объектами биотехнической системы существует взаимосвязь, которую можно представить в виде блок-схемы. Многоуровневая биотехническая система рассматривается как киберфизическая система – совокупность естественных и искусственных объектов, представляющих единое целое, способное к самосохранению и развитию.

Результаты исследования. Компонентами интеллектуальной системы управления динамическими процессами смешивания будут: рабочая память, множество нечетких правил, описывающих выполнение операций перемешивания, и стратегия выбора правил в зависимости от состояния системы. При построении интеллектуаль-

© Суханова М. В., Суханов А. В., Войнаш С. А., 2020



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

ной системы управления процессами смешивания реализуется стратегия с возвращениями. Стратегия управления динамической системой смешивания реализуется по прямому выводу.

Обсуждение и заключение. Интеллектуальная система управления биотехнической системой позволит контролировать процесс смешивания в режиме реального времени, корректировать кинематические параметры смесителя и своевременно предупреждать о вероятности повреждения высокоэластичного рабочего органа. Искусственная интеллектуальная система управления является цифровым двойником естественного интеллекта специалиста, призванным упростить взаимодействие типа «человек – машина». Предварительные экспертные оценки и лабораторные испытания показали, что использование интеллектуальной системы управления процессами обработки семян перед посевом позволит улучшить качество принимаемых решений, уменьшить время управления процессом смешивания более чем в 2 раза по сравнению с существующими методами управления, на 50 % снизить физическую нагрузку на оператора и до 20 % увеличить производительность процесса смешивания.

Ключевые слова: интеллектуальные системы управления, смешивание, предпосевная обработка семян, биотехническая система, высокоэластичные рабочие органы, динамический процесс

Финансирование: Исследование проведено при поддержке грантов ФГБУ «Российский фонд фундаментальных исследований» № 19-01-00250, № 20-07-00100.

Для цитирования: Суханова, М. В. Интеллектуальная система управления динамическими процессами смешивания в машинах для обработки семян с высокоэластичными рабочими органами / М. В. Суханова, А. В. Суханов, С. А. Войнаш. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202003.340-354 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 3. – С. 340–354.

Intelligent Control Systems for Dynamic Mixing Processes in Seed Processing Machines with Highly Elastic Working Bodies

M. V. Sukhanova^{a*}, A. V. Sukhanov^{b,c}, S. A. Voinash^d

^a*Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University (Zernograd, Russia)*

^b*Rostov-on-Don Branch of Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication in Railway Transport (Rostov-on-Don, Russia)*

^c*Rostov-on-Don State Transport University (Rostov-on-Don, Russia)*

^d*Novosibirsk State Agrarian University (Novosibirsk, Russia)*

**m_sukhanova@list.ru*

Introduction. The development of intelligent control systems by means of various production and technological processes is an urgent problem. Pre-sowing seed treatment is an important agricultural process, without which it is impossible to get a planned harvest of high quality.

Materials and Methods. To create an intelligent system for control of seed mixing processes in seed processing machines before sowing, the technological process of pre-sowing treatment should be considered as a multi-level biotechnical system. There is a relationship between the objects of the biotechnological system in the process of pre-sowing seed treatment that can be represented in the form of a block diagram. A multi-level biotechnological system is considered as a cyber-physical system – a combination of various natural and artificial objects which is a single whole capable of self-preservation and development.

Results. The components of an intelligent system for controlling dynamic mixing processes will be working memory, many fuzzy rules describing the execution of mixing operations, and a strategy for selecting rules depending on the state of the system. In developing the intelligent mixing process control system, a return strategy is implemented. The strategy of dynamic mixing system control is implemented by a direct conclusion.

Discussion and Conclusion. The intelligent biotechnology control system will allow controlling the mixing process in real-time, correcting the kinematic parameters of the mixer and warning timely about the probability of damage for the elastic working element. Preliminary expert assessments and laboratory tests have shown that the use of an intelligent control system for seed treatment processes before sowing will improve the quality of the decisions made, reduce the control time of the mixing process by more than two times compared to existing control methods, reduce the physical load on the operator by 50% and increase the productivity of the mixing process by up to 20%.

Keywords: intelligent control systems, mixing, pre-sowing seed treatment, biotechnological system, highly elastic working elements, dynamic process

Funding: The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, the research projects No. 19-01-00250 and No. 20-07-00100.

For citation: Sukhanova M.V., Sukhanov A.V., Voinash S.A. Intelligent Control Systems for Dynamic Mixing Processes in Seed Processing Machines with Highly Elastic Working Bodies. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(3):340-354. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.340-354>

Введение

Разработка интеллектуальных систем управления с помощью различных производственных и технологических процессов является весьма актуальной проблемой. Обработка семян перед посевом – важный сельскохозяйственный технологический процесс, без которого невозможно обойтись при подготовке семян к посеву для получения запланированного урожая высокого качества. Основной вид обработки семян перед посевом – химическая обработка (протравливание).

Используемые системы управления технологическими процессами в сельском хозяйстве не обладают способностью мгновенно реагировать на неопределенности, которые воздействуют на систему «человек – технологическая машина». Создание адаптированной системы управления динамическими процессами в сельскохозяйственных машинах приводит к излишнему усложнению алгоритмов и их реализации. В области знаний, посвященных интеллектуальным системам управления, имеется фундаментальная теоретическая база, основанная на исследованиях зару-

бежных и российских ученых: Л. Заде, Е. Мамдани, Д. А. Поспелова, В. М. Лохина, Д. М. Ерёмкина, В. Н. Вагина, С. М. Ковалева, В. М. Лохина, Г. С. Осипова, И. М. Макарова, Р. Г. Фараджева и многих других. Применяя современные технологии и методы обработки знаний, необходимо использовать преимущества интеллектуальных систем управления динамическими процессами. Основными преимуществами интеллектуальных систем управления являются относительная простота построения и возможность реализации программного продукта при обработке ограниченного количества информации и знаний в применяемой сфере. Классическая теория управления не может адекватно и быстро реагировать на неопределенности, возникающие в процессе эксплуатации современной сельскохозяйственной техники. В работе рассматривается возможность создания интеллектуальной киберфизической системы управления на исполнительном уровне функционирования биотехнической системы в качестве интеллектуального привода рабочих органов и интеллектуальной

системы управления работоспособностью высокоэластичного рабочего органа машины для смешивания и обработки семян перед посевом. Цель создания такой системы – контролировать процесс смешивания в режиме реального времени, корректировать кинематические параметры рабочих органов привода смесителя и своевременно предупреждать о вероятности повреждения высокоэластичного рабочего органа.

Интеллектуальная система управления динамическими процессами смешивания должна отвечать следующим требованиям:

- способность автоматически реагировать на изменения параметров системы, в том числе и аномальные;
- гибкость и адаптируемость к изменениям режимов работы и кинематических параметров машины;
- способность прогнозировать оптимальный режим смешивания при изменении внешних воздействий;
- способность к самообучению на основе анализа происходящих событий и результатов работы киберфизической системы;
- удобный интерфейс, обеспечивающий бесперебойное взаимодействие программных средств и оператора.

Обзор литературы

Основные принципы создания интеллектуальных систем управления были разработаны около полувека назад [1]. Математическим моделированием динамических процессов зани-

мались зарубежные ученые Л. Заде, У. Эшби, Дж. Аридис, Д. Йонг, Е. Динг, Я. Кёхлер [2–4]. Разработкой и внедрением технологий искусственного интеллекта в сельскохозяйственное производство занимались российские ученые А. В. Акимов, А. Н. Важенин, А. А. Гришин, Л. П. Кормановский, Ю. Ф. Лачуга, Н. М. Морозов, Е. А. Скворцов, П. А. Суровцев, Е. А. Тяпугин, В. К. Углин, Р. Р. Хисамов, Ю. А. Цой, С. В. Шаныгин, Е. И. Юревич и другие.

Дж. Аридис (США) предложил принцип Increasing Precision with Decreasing Intelligence (IPDI), заключающийся в объединении цели и задачи управления в виде сложного динамического объекта, зависящего от требуемой степени интеллектуализации [5]. Г. С. Осипов продолжил исследования интеллектуальных систем управления сложными динамическими объектами¹ [6; 7].

Основные принципы ситуационного управления изложены в фундаментальной работе Д. А. Поспелова². Разработкой принципов ситуационного управления применительно к агроинженерному направлению развития науки на конкретных примерах создания интеллектуальных систем управления занимались Б. А. Арютов, А. Н. Важенин, Б. И. Горбунов, В. М. Лохин, И. М. Макаров³ [8–10].

В качестве базового принципа построения систем автоматического управления динамическими процесса-

¹ Best Agricultural Drones 2020 – Reviews and Specs [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dronethusiast.com/agricultural-drones/> (дата обращения: 24.07.2020).

² **Поспелов Д. А.** Логико-лингвистические модели в системах управления. М.: Энергоиздат, 1981. 232 с.

³ Интеллектуальные системы автоматического управления / под ред. И. М. Макарова, В. М. Лохина. М.: Физматлит, 2001. 506 с.; Уровни прогнозируемых параметров зонального использования техники в весенний период / А. Н. Важенин [и др.] // Совершенствование методов организации использования машинно-тракторного парка: Сб. науч. тр. Горький: ГСХИ, 1985. С. 16–31; **Важенин А. Н., Арютов Б. А.** Статистическая оценка надежности машинно-тракторных агрегатов // Совершенствование методов организации и использования машинно-тракторного парка: Сб. науч. тр. Н. Новгород: НСХИ, 1992. С. 19–29; **Важенин А. Н., Арютов Б. А.** Модель роста растения в основе проектирования производственных процессов растениеводства // Совершенствование ситуационного использования сельскохозяйственной техники: Сб. науч. тр. Н. Новгород: НГСХА, 1998. С. 7–13.

ми У. Р. Эшби предложил принцип необходимости разнообразия⁴. Базовым принципом проектирования систем автоматического управления динамическими объектами является разработанный В. В. Солодовниковым принцип минимальной сложности. Этот принцип гласит: «Чем выше точность разработки управления динамическими объектами, тем может быть ниже уровень интеллектуальности, и, наоборот, с повышением требуемого уровня интеллектуальности понижаются требования к точности управления» [6]. В. В. Васильевым и С. С. Валеевым разработана теория создания интеллектуальных систем управления сложными техническими объектами⁵ [11; 12]. На примере газотурбинного двигателя учеными рассмотрена возможность обеспечения достижения цели управления с помощью принципа минимальной сложности, а также адаптация характеристик системы при перемене обстановки управления на основе самообучения и самоорганизации интеллектуальной системы управления [11].

Новые разрабатываемые сельскохозяйственные машины и орудия, являющиеся сложными динамическими объектами, нуждаются в автоматизации системы управления для обеспечения безопасности и бесперебойности работы и снижения нагрузки на оператора [13–15].

Материалы и методы

Наиболее развитыми технологиями искусственного интеллекта в сельском хозяйстве в настоящее время являются:

нечеткая логика, экспертные системы, нейронные сети, ассоциативная память [16; 17]. Основная отличительная черта интеллектуальной системы управления динамическими процессами заключается в том, что входные воздействия на систему имеют слабоформализованную природу «при случайном характере внешних воздействий на систему» [17].

При создании интеллектуальной системы управления динамическими процессами смешивания в машинах для обработки семян с высокоэластичными рабочими органами необходимо руководствоваться основными базовыми принципами ситуационного управления, обоснованного использования наиболее развитых технологий искусственного интеллекта, соблюдения соответствия степени интеллектуализации фактора неопределенности. Эти принципы влияют на киберфизическую систему управления процессами смешивания в машинах для предпосевной обработки семян.

Несмотря на несомненные положительные качества, устройство с высокоэластичными рабочими органами имеет свои специфические особенности эксплуатации⁶ [15; 18; 19]. Прочность эластомера ниже прочности стали. Именно благодаря меньшей прочности высокоэластичный материал не создает угрозы разрушения для частиц сыпучего тела. Но при этом ресурс материала рабочего органа не должен быть меньше срока его эксплуатации. Обработка семян – сезонный процесс, в течение которого все механизмы и машины, участ-

⁴ Best Agricultural Drones 2020...

⁵ **Васильев В. И., Шаймарданов Ф. А.** Синтез многосвязных автоматических систем методом порядкового отображения. М.: Наука, 1983. 126 с.; **Валеев С. С.** Алгоритмический метод решения полной проблемы собственных значений для однородной вектор-функции // Теория и проектирование систем автоматического управления и их элементов: Межвуз. научн. сб. Уфа: УАИ, 1989. С. 70–72.

⁶ **Суханова М. В., Бондарев А. В., Войнаш С. А.** Преимущества использования устройств с высокоэластичными рабочими органами в сельскохозяйственных машинах и механизмах // Перспективы внедрения инновационных технологий в АПК: сборник статей II Российской (Национальной) научно-практической конференции (20 декабря 2019 г.). Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2019. С. 86–88.

вующие в технологическом процессе предпосевной обработки, должны находиться в работоспособном состоянии. Поэтому необходимо создать интеллектуальную систему предупреждения появления аномального события (повреждения материала рабочего органа).

Результаты исследования

Рассмотрим, как можно использовать существующие подходы к решению задач интеллектуального управления динамическими системами при разработке интеллектуальной системы управления динамическими процессами смешивания в машинах для обработки семян с высокоэластичными рабочими органами.

В Комплексной программе развития биотехнологий в России на период до 2020 г. отмечается, что с помощью биотехнологии созданы новые средства защиты растений, не уступающие по воздействию на вредных насекомых и болезни химикатам, но безопасные для человека и окружающей среды⁷. В последние десятилетия тенденция на биологизацию земледелия наблюдается во всех странах мира с развитым сельскохозяйственным производством.

Использование биопрепаратов для защиты растений от вредителей и болезней при предпосевной обработке должно основываться на новых более эффективных технологиях и специализированной технике. Предварительные исследования показывают, что использование металлических шнеков и других недеформируемых рабочих органов в машинах для предпосевной обработки приводит к разрушению и травмированию семян, а применяемые кинематические режимы работы машин негативно воздействуют на живые бактерии, грибы и вирусы, составляющие основу биопрепаратов [20; 21]. Ранее нами была предложена и обоснована научная

гипотеза о том, что высокоэластичные рабочие органы не повреждают семена и не оказывают вредного воздействия на живые микроорганизмы, входящие в биопрепараты [19].

Технологический процесс предпосевной обработки семян можно представить в виде многоуровневой биотехнической системы. В состав этой системы входят биологическая система, представленная семенным материалом и обслуживающим персоналом, и техническая система, представленная машиной для обработки семян перед посевом с высокоэластичными рабочими органами.

В процессе предпосевной обработки семян между объектами биотехнической системы существует взаимосвязь, которую можно представить в виде блок-схемы (рис. 1).

Процесс обработки семян перед посевом осуществляется с помощью технической системы, алгоритм работы которой зависит от векторов входных воздействий: X_n – воздействия со стороны препарата; X_c – воздействия со стороны семян; $X_{упр}$ – управляющие воздействия оператора.

Воздействия со стороны препарата включают:

$$X_n = \{x_{n1}; x_{n2}; x_{n3}; \dots; x_{nm}\},$$

где x_{n1} – вид препарата; x_{n2} – объемная или весовая подача; x_{n3} – прилипаемость и другие воздействия.

Входные воздействия в техническую систему от обрабатываемого семенного материала включают:

$$X_c = \{x_{c1}; x_{c2}; x_{c3}; x_{c4}; x_{c5}; \dots; x_{cn}\},$$

где x_{c1} – обрабатываемая культура; x_{c2} – физико-механические характеристики материала; x_{c3} – степень засоренности;

⁷ Комплексная программа развития биотехнологий в Российской Федерации на период до 2020 года (утв. Правительством РФ от 24 апреля 2012 г. № 1853п-П8) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70068244> (дата обращения: 24.07.2020).

x_{c4} – влажность семян; x_{c5} – способы взаимодействия семян и защитно-стимулирующих компонентов (химических и биологических) и другие свойства.

Оператор, управляющий технологическим процессом, оказывает влияние на техническую систему, изменяя кинематические и технологические воздействия, которые можно рассматривать как входные:

$$X_{упр} = \{x_{упр1}; x_{упр2}; x_{упр3}; \dots; x_{упрn}\},$$

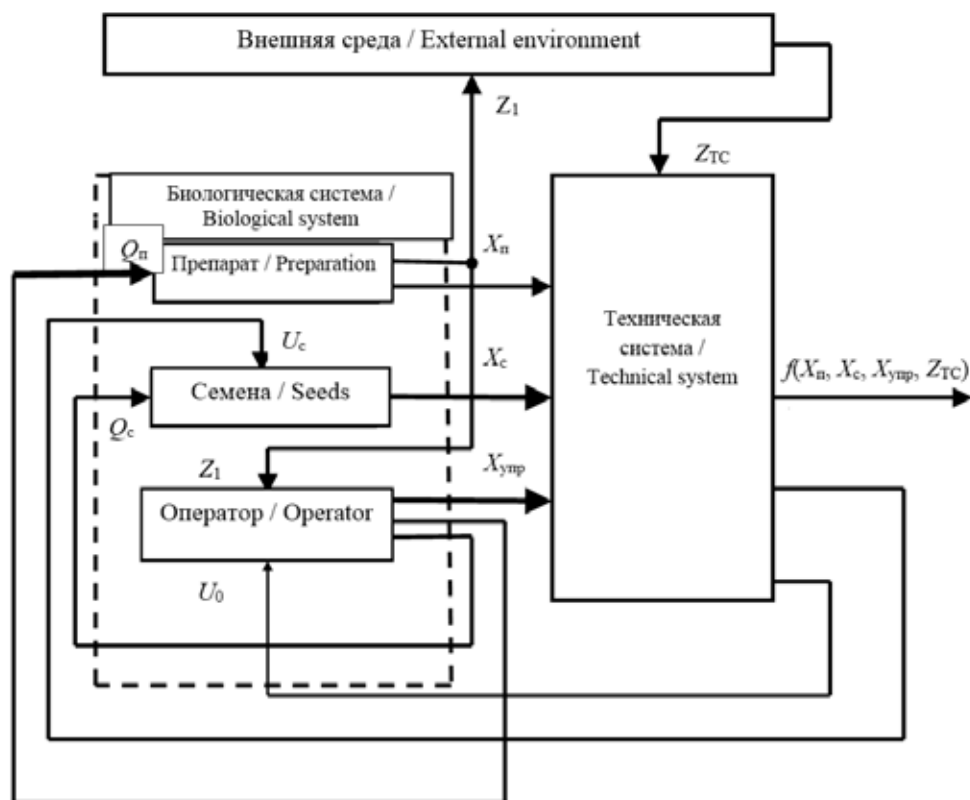
где $x_{упр1}$ – управляющие воздействия подачей препарата; $x_{упр2}$ – управляющие воздействия подачей семян; $x_{упр3}$ – управляющие воздействия на кинематические параметры рабочих

органов технической системы; $x_{упр4}$ – управляющие воздействия на технологические параметры технической системы и др.

Кроме входных техническая система (ТС) подвержена влиянию внешних воздействий $Z_{ТС}$, имеющих в основном случайный характер. Эти воздействия можно представить в виде вектора:

$$Z_{ТС} = \{z_{ТС1}; z_{ТС2}; z_{ТС3}; \dots; z_{ТСn}\},$$

где $z_{ТС1}$ – воздействия, вызванные непостоянством кинематических параметров; $z_{ТС2}$ – воздействия, вызванные нарушением технологических характеристик; $z_{ТС3}$ – воздействия, вызванные колебаниями ТС, и др.



Р и с. 1. Биотехническая система протравливания семян

F i g. 1. Biotechnical seed treatment system

В процессе протравливания семян ТС оказывает влияние на биологическую систему. Эти воздействия могут быть представлены в виде векторов U_c – воздействия технической системы на семена и U_o – воздействия технической системы на оператора.

Выходная функция технической системы $f(X_n, X_c, X_{\text{упр}}, Z_{\text{ТС}})$ в зависимости от используемых параметров и целей процесса может характеризовать: равномерность покрытия семян обрабатываемым препаратом; степень повреждения семян в процессе обработки; накопленную семенами в процессе обработки потенциальную энергию. Кроме указанных выходных характеристик могут быть приняты и другие показатели, вызванные требованиями потребителя.

Биологическая система включает обрабатываемый материал (семена) и оператора, осуществляющего функции управления и контроля.

Оператор осуществляет управляющие воздействия на препарат Q_n и на обрабатываемый материал (семена) Q_c .

Управляющие воздействия оператора на препарат Q_n включают: выбор типа препарата; дозирование препарата; контроль и управление процессом обработки семян препаратом.

В свою очередь препарат оказывает внешние воздействия Z_1 на оператора и окружающую среду:

$$Z_1 = \{z_{1,1}; z_{1,2}; z_{1,3}; \dots; z_{1,n}\},$$

где $z_{1,1}$ – воздействие препарата.

Управляющие воздействия оператора на обрабатываемый материал (семена) Q_c включают: выбор обрабатываемой культуры; выбор сорта семян; установление подачи семян; регулировку подачи препарата-протравителя (биопрепарата); контроль и управление процессом обработки семян препаратом.

В настоящее время использование искусственного интеллекта стало весь-

ма актуальным направлением развития технических систем сельскохозяйственного производства. Интеллектуальная система управления процессами смешивания позволит автоматически отследить и скорректировать технологический процесс обработки семян перед посевом в режиме реального времени благодаря способности к обучению и саморегулированию, что значительно облегчит работу оператора и обеспечит безопасность работы при выполнении технологических операций. Основной целью внедряемых интеллектуальных систем является получение искусственных устройств-посредников между технологической машиной и оператором с целенаправленным поведением и разумными вычислениями, схожими с мышлением.

Компонентами интеллектуальной системы управления динамическими процессами смешивания будут: рабочая память M , множество нечетких правил R , описывающих выполнение операций перемешивания, и стратегия выбора правил в зависимости от состояния системы S . Таким образом, интеллектуальная система I представлена в виде тройки:

$$I = \langle M, R, S \rangle.$$

Пример правила:

ЕСЛИ x однородное И y одинаково,
И $z > 0,03$ мм, ТО u хорошо,

где x_1 – степень окрашивания семян; x_2 – распределение смеси по объему камеры; x_3 – содержание капель воды в рабочей поверхности камеры; y – качество приготовленной смеси.

Для правила представляем интерпретацию в виде множества конкретных значений предметной области:

$$\forall P(x, y, \dots, z) \in C \cup A \cup D,$$

$$\exists R(P) \subseteq M^n,$$

где $R(P)$ – интерпретирующее отображение; M – множество конкретных значений предметной области.

Интерпретатор предназначен для организации процесса вывода заключения путем исполнения стратегии управления. Интерпретация действий интеллектуальной динамической системы может быть представлена последовательностью выполнения следующих операций (рис. 1):

1. Выбирается правило (однородное состояние смеси при минимальном времени смешивания).

2. Проверяется выполнимость правила в текущем состоянии рабочей памяти.

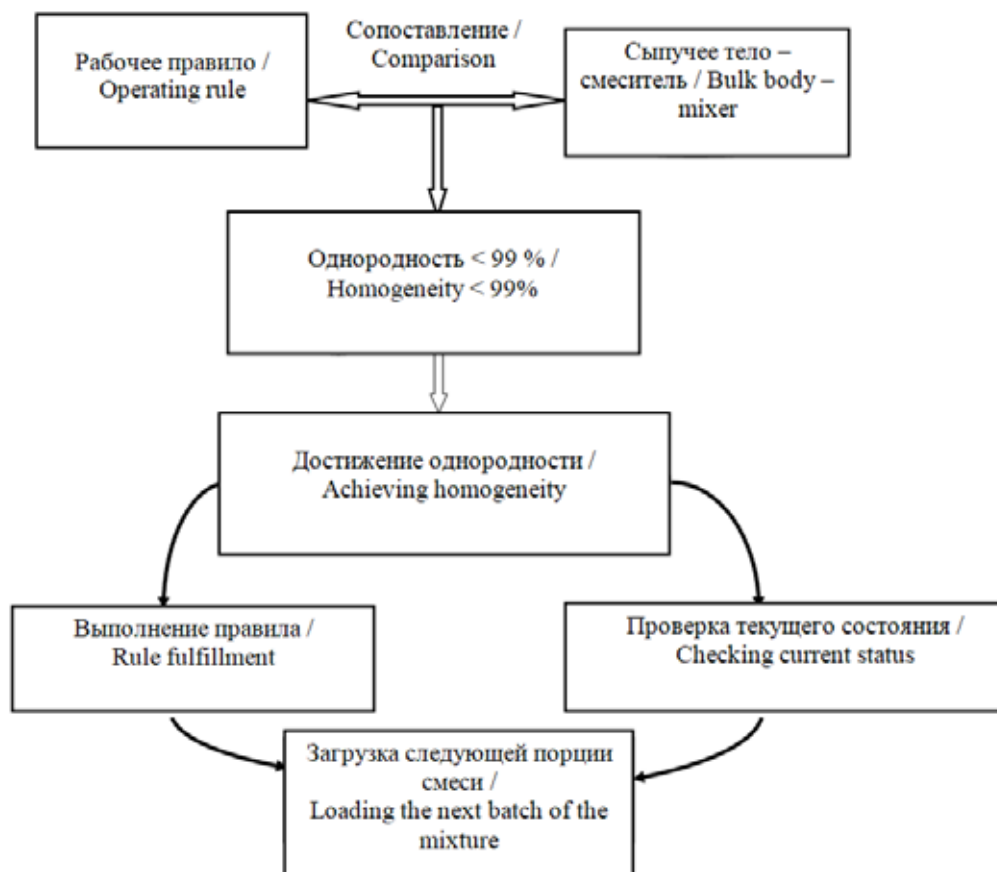
3. Если условие правила выполнено, правило помещается в конфликтное множество.

4. Если множество применимых правил исчерпано, выбирается какое-либо правило из конфликтного множества и применяется.

5. Переход к шагу 1.

Критерием остановки алгоритма является достижение однородного состояния.

При построении интеллектуальной системы управления процессами смешивания реализуется стратегия с возвращениями (рис. 2). Разрабатывая стратегию с возвращениями, принима-



Р и с. 2. Стратегия интеллектуальной системы управления динамическими процессами смешивания в машинах для обработки семян с высокоэластичными рабочими органами

F i g. 2. Strategy of the intelligent control system for dynamic mixing processes in seed processing machines with highly flexible working elements

ем в качестве способа выбора правил из конфликтного множества меру близости целевого и полученного состояний.

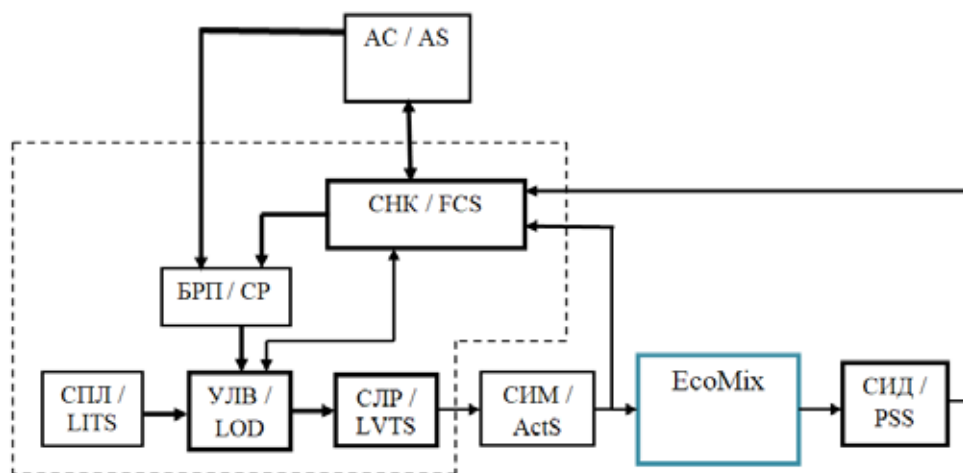
Кроме выполнения операций управления процессом смешивания машины для обработки семян с высокоэластичными рабочими органами должны регулярно подвергаться диагностике работоспособного безотказного состояния рабочей поверхности смесительной камеры. На рисунке 3 представлена общая структура системы управления работоспособностью высокоэластичной смесительной камеры.

Блок нечеткого управления включает в себя систему нечеткого контроля (ЧНК), выполняющую управление базой рабочих правил (БРП). БРП устанавливает и контролирует взаимосвязь между системой перевода входных воз-

действий в лингвистические переменные (СПЛ) и системой перевода лингвистических переменных в регулирующие воздействия (СЛР) посредством устройства логического вывода (УЛВ). СЛР осуществляет контроль и управление системой исполнительных механизмов (СИМ) смесителя для предпосевной обработки семян (ЕсоМіх). Для регистрации входных сигналов (деформация рабочей емкости, состояние смеси) используется система исполнительных датчиков (СИД), закрепляемых внутри смесительной камеры машины для обработки семян.

Обсуждение и заключение

Для предупреждения вероятности наступления повреждения высокоэластичного материала рабочей емкости можно преобразовать реальный про-



Р и с. 3. Нечеткая система управления работоспособностью высокоэластичной смесительной камеры EcoMix: AC – адаптационная система; ЧНК – система нечеткого контроля; БРП – база рабочих правил; УЛВ – устройство логического вывода; СПЛ – система перевода входных воздействий в лингвистические переменные; СЛР – система перевода лингвистических переменных в регулирующие воздействия; СИМ – система исполнительных механизмов; СИД – система датчиков контролируемых параметров

F i g. 3. Fuzzy performance control system for the high elastic mixing chamber EcoMix:

AS – adaptive system; FCS – fuzzy control system; CP – code of practice;

LOD – logic output device; LITS – linguistic input translation system;

LVTS – language variable translation system; ActS – actuation system; PSS – parameter sensor system

цесс в марковский с помощью нечеткой адаптивной системы, используя методологию обнаружения аномалий, основанную на анализе динамики развития вероятностных значений аномалий, разработанную С. М. Ковалевым [22]. Для решения проблемы выявления и предупреждения нештатных ситуаций, которые могут стать причиной возникновения необратимых процессов, разработана «методология упреждения нештатных ситуаций на основе детектирования паттернов – предвестников аномалий», рассмотренная в другой работе [23]. Приведенная методология в своей основе содержит стохастическую марковскую доходную модель, в которую внедряют правила, содержащие темпоральные нечеткие отношения. Это приводит к росту эффективности представления реальных процессов и к возможности использования экспертных знаний. Гибридный метод обучения можно использовать в качестве теоретической базы систем управления динамическими процессами смешивания в машинах для обработки семян и упреждения повреждения эластичных рабочих органов. Создание интеллектуальной системы управления биотехнической системой позволит контроли-

ровать процесс смешивания в режиме реального времени, корректировать кинематические параметры смесителя и своевременно предупреждать о вероятности повреждения высокоэластичного рабочего органа. Искусственная интеллектуальная система управления будет являться цифровым двойником естественного интеллекта специалиста и позволит упростить взаимодействие типа «человек – сельскохозяйственная машина». Цифровой двойник должен стать виртуальной копией контролируемого технологического процесса и оптимизировать ход процесса смешивания и обработки семян перед посевом на этапе планирования, спрогнозировать ошибки, связанные с человеческим фактором, а также выявить и упредить отказы технических средств. По предварительным экспертным оценкам и лабораторным испытаниям, использование интеллектуальной системы позволяет улучшить качество принимаемых решений, уменьшить время управления процессом смешивания более чем в 2 раза по сравнению с существующими методами управления, на 50 % снизить физическую нагрузку на оператора и до 20 % увеличить производительность процесса смешивания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Copeland, J.** Artificial Intelligence: A Philosophical Introduction / J. Copeland. – Hoboken : Wiley-Blackwell, 1993. – 328 p. – ISBN 978-0631183853. – URL: <https://philpapers.org/rec/COPAIA-4> (дата обращения: 24.07.2020).
2. **Yang, X.** Tracking Illicit Drug Dealing and Abuse on Instagram Using Multimodal Analysis / X. Yang, J. Luo. – DOI 10.1145/3011871 // ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology. – 2017. – No. 58. – 15 p. – URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3011871> (дата обращения: 24.07.2020).
3. **Mayer-Schönberger, V.** Big Data: A Revolution That Will Transform How We Live, Work, and Think / V. Mayer-Schönberger, K. Cukier. – Eamon Dolan/Mariner Books, 2014. – 272 p. – ISBN-10: 0544227751
4. **Koehler, J.** Planning from Second Principles / J. Koehler. – DOI 10.1016/0004-3702(95)00113-1 // Artificial Intelligence. – 1996. – Vol. 87, Issue 1-2. – Pp 145–186. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0004370295001131?via%3Dihub> (дата обращения: 24.07.2020).
5. **Saridis, G. N.** Hierarchically Intelligent Machines / G. N. Saridis. – Singapore : World Scientific Pub., 2001. – 126 p.



6. **Aldewereld, H.** Social Coordination Frameworks for Social Technical Systems / H. Aldewereld, O. Boissier, V. Dignum [et al.]. – DOI 10.1007/978-3-319-33570-4. – New York : Springer, 2016. – 276 p. – ISBN 978-3-319-33568-1. – URL: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-319-33570-4> (дата обращения: 24.07.2020).

7. **Osipov, G.** Limit Behaviour of Dynamic Rule-Based Systems / G. Osipov // Information Theories & Applications. – 2008. – Vol. 15. – Pp. 115–119. – URL: <http://sci-gems.math.bas.bg:8080/jspui/bitstream/10525/54/1/ijita15-2-p03.pdf> (дата обращения: 24.07.2020).

8. **Федоренко, В. Ф.** Цифровизация сельского хозяйства / В. Ф. Федоренко // Техника и оборудование для села. – 2018. – № 6. – С. 2–9.

9. **Kovalev, S.** Adaptive Approach for Anomaly Detection in Temporal Data Based on Immune Double-plasticity Principle / S. Kovalev, A. Sukhanov, M. Sukhanova [et al.] // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Vol. 679. – Pp. 234–243.

10. **Козубенко, И. С.** Точное земледелие и Интернет вещей / И. С. Козубенко // Техника и оборудование для села. – 2017. – № 11. – С. 46–48.

11. **Васильев, В. И.** Синтез многосвязной адаптивной системы управления ГТД на основе нейронных сетей / В. И. Васильев, С. С. Валеев, А. А. Шилоносов // Авиакосмическое приборостроение. – 2003. – № 7. – С. 36–41. – URL: <http://avia.tgizd.ru/ru/arhiv/5749> (дата обращения: 24.07.2020).

12. **Васильев, В. И.** Оценка сложности нейросетевых моделей на основе энтропийного подхода / В. И. Васильев, С. С. Валеев // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2004. – № 9. – С. 10–16. – URL: <http://neurocomp.ru/2004/09/01/ocenka-slozhnosti-nejrosetevykh-modelej-na-osnove-entropijnogo-podkhoda/> (дата обращения: 24.07.2020).

13. **Патент № 2484612 Российская Федерация, МПК А01 В 59/04.** Пахотный агрегат : № 2012106494/13 : заявл. 22.02.2012 : опубл. 20.06.2013 / Войнаш С. А., Войнаш А. С., Жарикова Т. А. ; заявитель и патентообладатель Войнаш С. А., Войнаш А. С., Жарикова Т. А.

14. **Пашенко, В. Ф.** Влияние локального рыхления почвы на урожайность сои / В. Ф. Пашенко, Ю. Н. Сыромятников, Н. С. Храмов [и др.]. – DOI 10.31992/0321-4443-2019-5-79-86 // Тракторы и сельхозмашины. – 2019. – № 5. – С. 79–86. – URL: https://mospolytech.ru/storage/files/doi/file_7fc8ef54a8154c28341bf9a47443a5ce_1574616717.pdf (дата обращения: 24.07.2020).

15. **Патент № 2618106 Российская Федерация, МПК А01 С1/00(2006.01).** Способ предпосевной обработки семян и устройство для его осуществления : № 2016101318 : заявл. 19.01.2016 : опубл. 02.05.2017 / Суханова М. В., Суханов А. В., Малиновский С. В. ; патентообладатель Суханова М. В. – 15 с. – URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2618106C1_20170502.pdf (дата обращения: 24.07.2020).

16. **Скворцов, Е. А.** Применение технологий искусственного интеллекта в сельском хозяйстве / Е. А. Скворцов, В. И. Набоков, К. В. Некрасов [и др.]. – DOI 10.32417/article_5d908ed78f7fc7.89378141 // Аграрный вестник Урала. – 2019. – Вып. 187, № 8. – С. 91–98. – URL: <https://usau.editorum.ru/en/nauka/article/30755/view> (дата обращения: 24.07.2020).

17. **Лохин, В. М.** Интеллектуальные системы управления – перспективная платформа для создания техники нового поколения / В. М. Лохин, М. П. Романов // Вестник МГТУ МИРЭА. – 2014. – Вып. 1 (2). – 24 с. – URL: https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/3ed/01-lohin_romanov.pdf (дата обращения: 24.07.2020).

18. **Суханова, М. В.** Актуальность использования интеллектуальных систем управления динамическими процессами смешивания компонентов сыпучего тела в устройствах для предпосевной обработки семян / М. В. Суханова, В. П. Мирошникова, А. В. Суханов // Вестник аграрной науки Дона. – 2019. – Т. 1, № 45. – С. 45–54. – URL: <https://clck.ru/PshM8> (дата обращения: 24.07.2020).

19. **Суханова, М. В.** Смеситель-инкрустатор Ecomix – устройство импульсного воздействия, исключающее травмирование семян при предпосевной обработке / М. В. Суханова, В. П. Забродин, А. В. Суханов // Научная жизнь. – 2018. – № 6. – С. 38–42.

20. **Забродин, В. П.** Исследование ударного воздействия механического устройства на семена озимой пшеницы / В. П. Забродин, А. Ф. Бутенко, М. В. Суханова [и др.]. – DOI 10.22314/2073-7599-

2018-12-2-14-18 // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2018. – Т. 12, № 2. – С. 14–18. – URL: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/234> (дата обращения: 24.07.2020).

21. **Sukhanova, M. V.** Damage to Seeds by the Working Bodies of Continuous Machines / M. V. Sukhanova // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development. – 2019. – Vol. 8, № 5. – URL: <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100814505&tip=sid> (дата обращения: 24.07.2020).

22. **Ковалев, С. М.** Методы многошагового предсказания аномалий в темпоральных данных / С. М. Ковалев // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2013. – Вып. 7 (144). – С. 85–91. – URL: <https://clck.ru/PSicz> (дата обращения: 24.07.2020).

23. **Ковалев, С. М.** Гибридный метод обучения стохастических моделей упреждения аномалий на основе нечетких продукций / С. М. Ковалев, А. Н. Гуда, А. В. Суханов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2015. – № 3 (59). – С. 40–47. – URL: http://vestnik.rgups.ru/wp-content/uploads/2015/10/2015_3_vestnik_rgups_a.pdf (дата обращения: 24.07.2020).

Поступила 08.12.2019; принята к публикации 10.02.2020; опубликована онлайн 30.09.2020

Об авторах:

Суханова Майя Викторовна, доцент кафедры технической механики и физики Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет» (347740, Россия, г. Зерноград, ул. Ленина, д. 21), кандидат технических наук, Researcher ID: P-3013-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2747-3863>, m_suhanova@list.ru

Суханов Андрей Валерьевич, старший научный сотрудник Ростовского филиала АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (344038, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Ленина, д. 44/13), доцент кафедры вычислительной техники и автоматизированных систем управления ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» (344038, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2), кандидат технических наук, Researcher ID: Y-4776-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6161-4709>, Scopus ID: 57052339600, sukharudze@gmail.com

Войнаш Сергей Александрович, инженер научно-исследовательской части ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет» (630039, Россия, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, д. 160), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>, sergey_voi@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

М. В. Суханова – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, подготовка начального варианта текста и формулирование выводов; А. В. Суханов – выполнение критического анализа исследований; С. А. Войнаш – литературный и патентный анализ.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Copeland J. Artificial Intelligence: A Philosophical Introduction. Hoboken: Wiley-Blackwell; 1993. 328 p. Available at: <https://philpapers.org/rec/COPAIA-4> (accessed 24.07.2020). (In Eng.)
2. Yang X., Luo J. Tracking Illicit Drug Dealing and Abuse on Instagram using Multimodal Analysis. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*. 2017; 58.15 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1145/3011871>
3. Mayer-Schönberger V., Cukier K. Big Data: A Revolution That Will Transform How We Live, Work, and Think. Eamon Dolan/Mariner Books; 2014. 272 p. (In Eng.)



4. Koehler J. Planning from Second Principles. *Artificial Intelligence*. 1996; 87(1-2):145-186. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(95\)00113-1](https://doi.org/10.1016/0004-3702(95)00113-1)
5. Saridis G.N. Hierarchically Intelligent Machines. Singapore: World Scientific Pub.; 2001. 126 p. (In Eng.)
6. Aldewereld H., Boissier O., Dignum V., et al. Social Coordination Frameworks for Social Technical Systems. New York: Springer; 2016. 276 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-33570-4>
7. Osipov G. Limit Behaviour of Dynamic Rule-Based Systems. *Information Theories & Applications*. 2008; 15:115-119. Available at: <http://sci-gems.math.bas.bg:8080/jspui/bitstream/10525/54/1/ijita15-2-p03.pdf> (accessed 24.07.2020). (In Eng.)
8. Fedorenko V.F. Digitalization of Agriculture. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2018; (6):2-9. (In Russ.)
9. Kovalev S., Sukhanov A., Sukhanova M., et al. Adaptive Approach for Anomaly Detection in Temporal Data Based on Immune Double-Plasticity Principle. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018; 679:234-243. (In Eng.)
10. Kozubenko I.S. Precision Farming and Internet of Things. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2017; (11):46-48. (In Russ.)
11. Vasilev V.I., Valeev S.S., Shilonosov A.A. Design of Multivariable Adaptive Control System of Gas-Turbine Engine on the Base of Neural Networks. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* = Aerospace Instrument-Making. 2003; (7):36-41. Available at: <http://avia.tgizd.ru/ru/arhiv/5749> (accessed 24.07.2020). (In Russ.)
12. Vasilev V.I., Valeev S.S. Evaluation of the Complexity of Neural Network Models Based on the Entropy Approach. *Neyrokompyutery: razrabotka, primeneniye* = Neurocomputers. 2004; (9):10-16. Available at: <http://neurocomp.ru/2004/09/01/ocenka-slozhnosti-nejrosetevyx-modelej-na-osnove-entropijnogo-podxoda/> (accessed 24.07.2020). (In Russ.)
13. Plowing Unit: Patent 2484612 Russian Federation. No. 2012106494/13; appl. 22.02.2012; publ. 20.06.2013. (In Russ.)
14. Pashchenko V.F., Syromyatnikov Yu.N., Hramov N.S., et al. The Influence of Local Loosening of the Soil on Soybean Productivity. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2019; (5):79-86. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2019-5-79-86>
15. Method for Pre-Sowing Treatment of Seeds and Device for Its Implementation: Patent 2618106 Russian Federation. No. 2016101318; appl. 19.01.2016; publ. 02.05.2017. Bulletin No. 13. 15 p. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU2618106C1_20170502.pdf (accessed 24.07.2020). (In Russ.)
16. Skvorcov E.A., Nabokov V.I., Nekrasov K.V., et al. Application of Technologies of Artificial Intelligence in Agriculture. *Agrarnyy Vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals. 2019; 187(8):91-98. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.32417/article_5d908ed78f7fc7.89378141
17. Lokhin V.M., Romanov M.P. Intelligent Control Systems – the Perspective Platform for Creation of New Generation of Technical Objects. *Vestnik MGTU MIREA* = Bulletin of Moscow Technological University (MIREA). 2014; 1. 24 p. Available at: https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/3ed/01-lohin_romanov.pdf (accessed 24.07.2020). (In Russ.)
18. Sukhanova M.V., Miroshnikova V.P., Sukhanov A.V. The Relevance of the Use of Intelligent Control Systems for the Dynamic Mixing of Loose Body Components in Seedbed Preparation Devices. *Vestnik agrarnoy nauki Dona* = Don Agrarian Science Bulletin. 2019; 1:45-54. Available at: <https://clck.ru/PshM8> (accessed 24.07.2020). (In Russ.)
19. Sukhanova M.V., Zabrodin V.P., Sukhanov A.V. Mixer-Incrustator “Ecomix” – Pulse Exposure Device, Excluding Grain Damage during Pre-Sowing Treatment. *Nauchnaya zhizn* = Scientific Life. 2018; (6):38-42. (In Russ.)
20. Zabrodin V.P., Butenko A.F., Sukhanova M.V., et al. Research of Impact by Mechanical Device on Winter Wheat Seeds. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2018; 12(2):14-18. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-2-14-18>

21. Sukhanova M.V. Damage to Seeds by the Working Bodies of Continuous Machines. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. 2019; 8(5). Available at: <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100814505&tip=sid> (accessed 24.07.2020). (In Eng.)

22. Kovalev S.M. The Method of Multistep Prediction of Anomalies in Temporal Data. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* = SFU News. Engineering Sciences. 2013; 7:85-91. Available at: <https://clck.ru/Psicz> (accessed 24.07.2020). (In Russ.)

23. Kovalev S.M., Guda A.N., Sukhanov A.V. Hybrid Educational Method of Stochastic Modules of Anomaly Prediction on the Base of Fuzzy Productions. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* = Rostov State University of Railway Transport Bulletin. 2015; (3):40-47. Available at: http://vestnik.rgups.ru/wp-content/uploads/2015/10/2015_3_vestnik_rgups_a.pdf (accessed 24.07.2020). (In Russ.)

Received 08.12.2019; revised 10.02.2020; published online 30.09.2020

About the authors:

Maya V. Sukhanova, Associate Professor of Chair of Technical Mechanics and Physics, Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University (21 Lenin St., Zernograd 347740, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: P-3013-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2747-3863>, m_suhanova@list.ru

Andrey V. Sukhanov, Senior Researcher of Rostov-on-Don Branch of Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication in Railway Transport (44/13 Lenin St., Rostov-on-Don 344038, Russia), Associate Professor of Chair of Computer Science and Automated Control Systems, Rostov-on-Don State Transport University (2 Ploshchad Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya, Rostov-on-Don 344038, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: Y-4776-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6161-4709>, Scopus ID: 57052339600, sukharudze@gmail.com

Sergey A. Voinash, Researcher of Engineering Department, Novosibirsk State Agrarian University (160 Dobrolyubov St., Novosibirsk 630039, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>, sergey_voi@mail.ru

Contribution of the authors:

M. V. Sukhanova – scientific guidance, formulation of the basic concept of the study, preparation of the initial text and conclusions; A. V. Sukhanov – critical review of the research; S. A. Voinash – literary and patent analysis.

All authors have read and approved the final manuscript.



Теоретическое обоснование высоты расположения выхода загрузочного бункера в машине выделения вредных примесей мокрым способом

В. Е. Саитов^{1,2*}, В. Г. Фарафонов², А. В. Саитов²

¹ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (г. Киров, Россия)

²ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (г. Киров, Россия)

*vicsait-valita@e-kirov.ru

Введение. Комбайновый зерновой материал содержит кроме полновесного зерна сорные примеси, в том числе вредные, к которым относятся ядовитые склероции спорыньи. Существующие зерноочистительные машины не обеспечивают в ходе одного технологического процесса полное выделение ядовитых склероций спорыньи из-за схожести физических свойств. Полное выделение спорыньи из зерна за один технологический процесс возможно по плотности применением водных растворов неорганических солей. Поэтому актуальным вопросом является разработка машины выделения вредных примесей мокрым способом.

Материал и методы. Рассматривается падение отдельных зерен ржи, пшеницы, ячменя и овса, имеющих форму, близкую к эллипсоиду, из выходного отверстия загрузочного бункера в жидкость плотностью 1,0; 1,05; 1,10 и 1,15 · 10³ кг/м³. Теоретические исследования выполнены при плотности зерен (1,2...1,5) · 10³ кг/м³, длине (5,0...10,0) · 10⁻³ м, ширине (1,4...3,6) · 10⁻³ м и толщине (1,2...3,5) · 10⁻³ м методами математического моделирования с применением законов механики и гидродинамики.

Результаты исследования. Для разработки машины выделения вредных примесей мокрым способом проведена оценка высоты расположения выходного отверстия загрузочного бункера относительно поверхности водного раствора соли. Получены формулы для определения минимальной высоты, необходимой для преодоления эллипсоидальной зерновкой силы Архимеда, сил поверхностного натяжения и гидродинамического сопротивления жидкости с учетом закона сохранения энергии.

Обсуждение и заключение. Установлено, что минимальная высота расположения выходного отверстия загрузочного бункера относительно поверхности жидкости зависит от ориентации зерновок в момент вхождения в нее, их линейных размеров и плотности, а также плотности водного раствора соли. Высота расположения выходного отверстия загрузочного бункера, необходимая для гарантированного преодоления поверхностного натяжения жидкости всеми зерновками, составляет 57,1 · 10⁻³ м.

Ключевые слова: зерновой материал, спорынья, зерноочистительная машина, сила гидродинамического сопротивления, сила Архимеда, поверхностное натяжение, эллипсоидальная зерновка

Для цитирования: Саитов, В. Е. Теоретическое обоснование высоты расположения выхода загрузочного бункера в машине выделения вредных примесей мокрым способом / В. Е. Саитов, В. Г. Фарафонов, А. В. Саитов. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202003.355-376 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 3. – С. 355–376.



Theoretical Underpinnings of the Parameters of Device for Cleaning Grain from Ergot Sclerotia

V. E. Saitov^{a,b*}, V. G. Farafonov^b, A. V. Saitov^b

^a*Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (Kirov, Russia)*

^b*Vyatka State Agricultural Academy (Kirov, Russia)*

**vicsait-valita@e-kirov.ru*

Introduction. The grain collected by a combine contains not only full-weight grain, but also weeds, including harmful ones, which include toxic *ergot sclerotia*. Existing grain cleaning machines cannot provide complete separation of toxic *ergot sclerotia* during a single technological process, because of the similarity of physical properties. A complete separation of ergot from grain in one technological process is possible by density using aqueous solutions of inorganic salts. Therefore, an urgent issue is the development of a machine for separating harmful impurities in a wet way.

Materials and Methods. We consider the fall of grains of rye, wheat, barley and oats, which have a shape close to ellipsoidal, from the outlet of the loading hopper into a liquid with a density of 1.0; 1.05; 1.10 and $1.15 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. Theoretical explorations were undertaken for grain density $(1.2...1.5) \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, a length $(5.0...10.0) \cdot 10^{-3} \text{ m}$, a width $(1.4...3.6) \cdot 10^{-3} \text{ m}$ and thickness $(1.2...3.5) \cdot 10^{-3} \text{ m}$ by mathematical modeling methods using the laws of mechanics and hydrodynamics.

Results. For the development of a machine for a wet separation of harmful impurities, the height of the location of the outlet of the loading hopper relative to the surface of an aqueous salt solution was estimated. The formulas are obtained for determining the minimum height required to overcome the Archimedean ellipsoid grain force, surface tension forces and fluid hydrodynamic resistance, taking into account the law of conservation of energy.

Discussion and Conclusion. It was found that the minimum height of the loading hopper outlet location relative to the liquid surface depends on the orientation of the grains at the moment of entering it, their linear dimensions and density, as well as the density of an aqueous salt solution. The height of the outlet of the loading hopper, necessary for guaranteed overcoming of the surface tension of the liquid by all grains, is $57.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Keywords: grain material, ergot, grain cleaning machine, hydrodynamic drag force, Archimedes force, surface tension, ellipsoidal grain

For citation: Saitov V.E., Farafonov V.G., Saitov A.V. Theoretical Underpinnings of the Parameters of Device for Cleaning Grain from Ergot Sclerotia. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(3):355-376. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.355-376>

Введение

Люди с древних времен для питания использовали продукты, приготовленные из зерна. С появлением механизации и увеличением производительности труда, повышением урожайности зерновых культур за счет применения органических и минеральных удобрений

излишки зерна, в особенности фуражное зерно, стали применять для приготовления различных кормов для сельскохозяйственных животных¹.

Современная технология производства зерна предусматривает применение энергоресурсосберегающих сельскохозяйственных машин. Для уборки зерно-

¹ Конишев Н. Л. Разработка и совершенствование технологических линий и технических средств послеуборочной обработки зерна и семян трав. Киров: ФГБНУ «ФАНЦ Северо-Востока», 2018. 348 с.; Энергия ржи для здоровья человека / В. А. Сысуев [и др.]. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2010. 103 с.

вых культур в настоящее время сельскохозяйственные предприятия применяют отечественные и зарубежные зерноуборочные комбайны, механизмы очистки которых не обеспечивают полное удаление различных примесей из обмолачиваемой хлебной массы [1; 2].

Комбайновый зерновой материал, поступающий на пункты послеуборочной обработки, содержит кроме полновесного зерна различные сорные примеси, в том числе вредные (семена вязеля, горчака, мышатника, плевела, куколя), а также ядовитые склеротии (рожки) спорыньи² [3; 4].

Посевы хлебных злаковых культур (рожь, пшеница овес, ячмень) и кормовых злаковых трав (пырей, костер, райграс, овсяница, тимopheевка) часто поражаются спорами спорыньи. При поражении колосьев данных злаковых культур вместо зерен образуются склеротии продолговатой формы, а в зерновой массе они присутствуют в виде продолговатых рожков черно-фиоле-

тового цвета, в ряде случаев из-за мутаций подстраиваются под цвет зерна (рис. 1) [5; 6].

В решении Комиссии Таможенного союза ЕврАзЭС отмечается, что в хлебном зерне ржи и пшеницы содержание склеротий спорыньи не должно превышать 0,05 %, а в хлебном зерне ячменя и овса – 0,1 %. В кормовом зерне ржи, пшеницы, ячменя и овса предельное содержание склеротий спорыньи не должно превышать 0,1 %³.

Зерно сельскохозяйственных культур для посева должно быть очищено от всех примесей и доведено до сортовых и посевных требований. Присутствие склеротий спорыньи в оригинальных семенах не допускается. Содержание склеротий спорыньи в элитных семенах не должно превышать 0,03 %⁴.

Выполнение таких жестких требований к продовольственному, кормовому и семенному зерну связано с тем, что склеротии спорыньи являются чрезмерно ядовитыми. Употребление



Р и с. 1. Общий вид озимой ржи, зараженной спорыньей: а) колос озимой ржи со склеротием спорыньи пурпурной; б) зерно озимой ржи со склеротиями спорыньи

F i g. 1. General view of winter rye infected with ergot: а) spike of winter rye with ergot purple sclerotia; б) winter rye grain with ergot sclerotia

² Сантов В. Е. Инновации в послеуборочной обработке зернового материала: монография. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 152 с.

³ Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 015/2011 «О безопасности зерна». Утв. решением Таможенного союза 09.12.2011 г. № 874. 38 с.

⁴ ГОСТ Р 52325-2005. Семена сельскохозяйственных растений. Сортовые и посевные качества. Общие технические условия.

зараженных ядовитыми склероциями спорыньи продуктов питания людьми и кормов животными влечет отравление организма и может в зависимости от тяжести приводить к смертельному исходу. Поэтому продукты из зерен хлебных злаковых культур со склероциями спорыньи нельзя использовать для выпечки хлебобулочных изделий и приготовления комбикормов [7; 8].

Таким образом, выделение ядовитых склероций спорыньи из зернового материала является первоочередной необходимостью получения качественных семян для посева, а также пригодного продовольственного и фуражного зерна для питания людей и животных.

Отделение примесей из бункерной зерновой массы осуществляется сложными по конструкции, трудоемкими в технологических регулировках и обслуживании зерноочистительными машинами предварительной, первичной и вторичной очистки, а также специальными машинами (например, пневмосортировальными столами, фотосепараторами, магнитными сепараторами), требующими высококвалифицированного обслуживания. В этих машинах используются в основном различия зерна и примесей по линейным размерам (длина, ширина, толщина и форма), скорости витания (аэродинамические свойства), состоянию поверхности и плотности, сыпучести, электропроводности и цвету [9]. Данные машины не обеспечивают в ходе одного технологического процесса полное выделение ядовитых склероций спорыньи от зерна из-за близости их свойств по линейным размерам, скорости витания, а также по цвету из-за мутаций и подстраивания

склероций спорыньи к цвету зерна основной культуры⁵ [10–14].

Одним из свойств, по значениям которого ядовитые склероции спорыньи отличаются от семян основных зерновых культур (рожь, пшеница, овес и ячмень), является плотность. Это позволяет использовать водные растворы неорганических солей, плотность которых можно сделать промежуточной между плотностью склероций спорыньи и зерна в качестве их разделителя⁶.

Соответственно, для очистки зерна от ядовитых склероций спорыньи по плотности в водных растворах солей актуальным вопросом является разработка несложной по конструкции машины очистки зернового материала, которая должна иметь малую энергоемкость технологического процесса в сравнении с существующими зерно- и семяочистительными машинами. При разработке такого устройства и выполнении им процесса выделения ядовитых склероций спорыньи из зерна с надлежащей эффективностью требуются исследования по обоснованию высоты расположения выходного отверстия загрузочного бункера с зерновым материалом h относительно поверхности водного раствора соли в ванне данного устройства [15; 16].

Обзор литературы

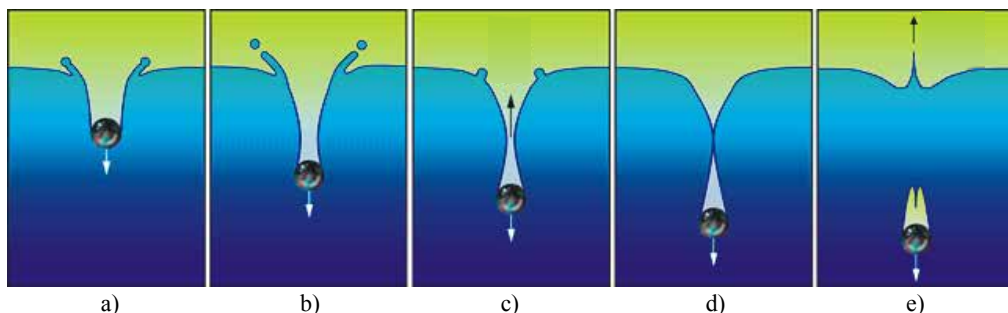
Процесс погружения в воду стального шарика, покрытого тонким слоем пластилина, диаметром $10,0 \cdot 10^{-3}$ м при падении на ее поверхность с высоты 0,2 м приведен в работе В. В. Майера (рис. 2)⁷.

При падении шарика на поверхность воды образуется каверна – воздушное углубление. По мере углу-

⁵ Сантов А. В. Особенности функционирования фотосепараторов для очистки зерна и семян от примесей // Методы и технологии в селекции растений и растениеводстве: монография / Под общ. ред. В. А. Сысуева, Г. А. Баталовой, Е. М. Лисицына. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2016. С. 352–355.

⁶ Павловский Г. Т., Птицын С. Д. Очистка, сушка и активное вентилирование зерна. 2-е изд., исправ. и доп. М.: Высшая школа, 1972. 256 с.

⁷ Майер В. В. Кумулятивный эффект в простых опытах. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 192 с.



Р и с. 2. Падение в воду не смачиваемого ею стального шарика и стадии образования кумулятивной струи: а) соударение шарика с поверхностью воды с образованием каверны; б) начало погружения шарика в воду с увеличением каверны; в) погружение шарика в воду с последующей перетяжкой каверны; д) дальнейшее погружение шарика в воду и начало схлопывания каверны; е) погружение шарика в воду с воздушным пузырем и образование кумулятивной струи

F i g. 2. Falling into water of a steel ball not wetted by it and the stage of formation of a cumulative jet: а) collision of the ball with the surface of the water to form a cavity; б) beginning of immersion of the ball in water with an increase in the cavity; в) immersion of the ball in water with the subsequent hauling of the cavity; д) further immersion of the ball in water and the beginning of collapse of the cavern; е) immersion of the ball in water with an air bubble and formation of a cumulative jet

бления шарика в воду каверна растет, а затем на ней появляется перетяжка, которая разделяет каверну на воздушный пузырь, примыкающий к шарик, и коническое углубление на поверхности воды. Далее коническое углубление схлопывается и появляется кумулятивная струя, а воздушный пузырь вместе с шариком погружается либо отрывается от него и всплывает на поверхность воды.

В статье В. А. Архипова и В. Ф. Трофимова представлены результаты экспериментального исследования по ударному взаимодействию падающей с высоты 0,45...1,73 м сферической капли воды диаметром $(0,04...0,05) \cdot 10^{-3}$ м на поверхность жидкости⁸. В результате удара капли о поверхность жидкости образуется сферическая каверна и корона, стремящаяся образовать купол над каверной. Дальнейшее развитие

процесса приводит к разрушению каверны с короной и образованию столбика воды.

Падение тела диаметром 1,68 м с высоты 0,3 м в резервуар с жидкостью рассмотрено А. А. Комаровым и В. В. Казенновым [17]. При поступлении тела в жидкость в ней образуется каверна, затем происходит погружение тела в жидкость с захватом пузыря воздуха. В дальнейшем по мере погружения каверна размывается и сносится.

Проблеме падения тела в жидкость посвящены работы Ю. Сколана и А. Коробкина, Т. Шиб, А. Ито и Е. Накаяма, Э. И. Григолюка и А. Г. Горшкова, в которых отмечаются процессы образования каверны, захвата пузырька воздуха телом, появления кумулятивного эффекта в результате схлопывания каверны, отрыва пузырька воздуха от тела и всплытия на поверхность жидкости⁹ [18; 19].

⁸ Архипов В. А., Трофимов В. Ф. Образование вторичных капель при ударном взаимодействии капли с поверхностью жидкости // Прикладная механика и техническая физика. 2005. Т. 46, № 1. С. 55–62.

⁹ Григолюк Э. И., Горшков А. Г. Взаимодействие упругих конструкций с жидкостью (удар и погружение). Л.: Судостроение, 1978. 200 с.; Shibue T., Ito A., Nakayama E. Structural Response Analysis of Cylinders under Water Impact // Hydroelasticity in Marine Technology. 1994. Pp. 221–228.

Из перечисленного следует, что захват пузырька воздуха телом и появление кумулятивной струи зависит от высоты его падения в жидкость h . Образование кумулятивной струи не будет происходить при падении зерновки на поверхность воды либо водного раствора соли с минимальной высоты h , обеспечивающей гарантированное преодоление ею поверхностного натяжения жидкости. При этом качественное выполнение технологического процесса очистки зерна от вредных примесей данным устройством будет выполняться.

В научных работах ряда ученых теоретически рассматривается расположение по высоте h выходного отверстия загрузочного бункера относительно уровня водного раствора соли плотностью $\rho_{zh} = 1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ для цилиндрической и сфероидальной зерновок плотностью $\rho_z = (1,2 \dots 1,5) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, длиной $l_z = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, шириной и толщиной $r_z = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{10}$ [20].

Однако зерновка основных культур (ржи, пшеницы, ячменя и овса) характеризуется длиной l_z , шириной b и толщиной δ . Вследствие этого геометрическая форма зерновки более соответствует эллипсоиду, чем цилиндрической и сфероидальной зерновке. Поэтому в данной работе будет рассмотрено падение эллипсоидальной зерновки из выходного отверстия загрузочного бункера и погружение ее в жидкость. В научных публикациях данный подход по исследованию погружения эллипсоидальных зерновок в жидкость различной плотности ρ_{zh} не рассматривался.

Материалы и методы

Рассматривается падение отдельных зерен хлебных злаковых культур (пшеницы, овса, ржи и ячменя), имеющих плотность $\rho_z = (1,2 \dots 1,5) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, длину $l_z = (5,0 \dots 10,0) \cdot 10^{-3} \text{ м}$, ширину $b = (1,4 \dots 3,6) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и толщину $\delta = (1,2 \dots 3,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$, из выходного отверстия загрузочного бункера в воду (H_2O) плотностью $\rho_{zh} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и в водный раствор соли хлористого натрия (NaCl) плотностью $\rho_{zh} = 1,05; 1,10$ и $1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, коэффициенты σ поверхностного натяжения которых при нормальных условиях ($t = 20^\circ \text{C}$) составляют $0,0723, 0,0765, 0,0791$ и $0,0816 \text{ Н/м}$ соответственно¹¹.

По геометрической форме зерновки основных хлебных злаковых культур (пшеницы, овса, ржи и ячменя) схожи между собой и имеют вытянутую округлую форму (рис. 3). У зерна данных культур с одной стороны проходит бороздка, которая заходит вглубь него. На остром конце зерна с выпуклой его стороны расположен зародыш, а противоположный конец зерна тупой, покрытый волосками.

Зерно пшеницы и ржи покрыто семенными и плодовыми оболочками, а потому они относятся к голозерным культурам. Зерновка пшеницы по форме имеет более округлую форму, чем зерновка ржи, которая отличается сжатой с боков продолговатой формой (рис. 3а и 3б).

Плоды ячменя и овса относятся к пленчатым культурам, так как зерновки покрыты чешуями или пленками. По внешнему виду зерновки ячменя и овса похожи на зерновки пшеницы и ржи,

¹⁰ Саитов В. Е., Фарафонов В. Г., Саитов А. В. Оценка высоты расположения выхода бункера с питателем относительно уровня раствора соли в ванне машины для очистки зернового материала по удельному весу // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. Мосоловские чтения: материалы Международ. науч.-практ. конф. Йошкар-Ола: ФГБОУ ВО «Мар. гос. ун-т», 2016. Вып. XVIII. С. 241–244.

¹¹ Павловский Г. Т., Птицын С. Д. Очистка, сушка и активное вентилирование зерна; ГОСТ 8.428-81 (СТ СЭВ 630-84). Аэрометры. Значения коэффициентов поверхностного натяжения жидкостей; Саитов В. Е. Инновации в послеуборочной обработке...



Р и с. 3. Общий вид зерновок основных зерновых культур: а) зерновки пшеницы; б) зерновки ржи; в) зерновки ячменя; г) зерновки овса

F i g. 3. General view of the grains of the main crops: а) wheat grains; б) rye grains; в) barley grains; г) oats grains

но имеют более заостренные верхние и нижние концы (рис. 3с и 3д).

По внешнему виду, геометрической форме и линейным размерам зерновки основных культур (рожь, пшеница, ячмень и овес) наиболее соответствуют эллипсоиду, который имеет малую $2c_z = \delta$, среднюю $2b_z = b$ и большую $2a_z = l_z$ оси. Тогда в качестве теоретической модели зерновки, падающей из выходного отверстия загрузочного бункера на поверхность воды (H_2O) или водного раствора соли ($NaCl$), принята форма эллипсоида. В соответствии с этим введено научное понятие «эллипсоидальная зерновка».

При падении зерновки из выходного отверстия загрузочного бункера на поверхность воды (H_2O) или водного раствора соли ($NaCl$) исключается сила R сопротивления воздуха из-за малого ее значения по сравнению с силой тяжести $m_z g$ зерновки. Для преодоления

силы поверхностного натяжения жидкости зерновкой минимальная высота расположения выходного отверстия загрузочного бункера h , с которой она должна падать, находится при учете закона сохранения энергии.

Теоретические исследования выполнены методами математического моделирования с применением законов механики и гидродинамики. Обработка полученных данных проведена на персональном компьютере Samsung NP-R540H с применением разработанной программы «Вычисление минимальной высоты падения зерновок для преодоления поверхностного натяжения жидкости» на языке программирования Python в среде разработки Visual Studio 2019¹².

Для визуализации полученных данных использована специальная программа SigmaPlot 11.0. Полученные зависимости представлены в виде по-

¹² Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019666718. Вычисление минимальной высоты падения зерновок для преодоления поверхностного натяжения жидкости / Саитов В. Е., Фарафонов В. Г., Фарафонов А. Е. [и др.]; заявитель и правообладатель ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого». № 2019663539; заявл. 29.10.2019; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13.12.2019.

верхностей при помощи редактора векторной графики CorelDRAW 12¹³.

Результаты исследования

Зерна хлебных злаковых культур покрыты несмачиваемыми пленками, а потому большинство из них не тонет в жидкости при бросании с высоты $h = (2,0 \dots 5,0) \cdot 10^{-3}$ м. При такой высоте h запасенная потенциальная энергия зерна мала для проникновения в жидкость. Это не позволяет преодолеть силу поверхностного натяжения жидкости¹⁴.

Вид зерен, обладающих несмачиваемыми пленками и находящихся на поверхности жидкости, показан на рисунке 4.

Рассмотрим две крайние ориентации (расположения) эллипсоидальной зерновки, выходящей из отверстия загрузочного бункера, главной малой осью $2c_z = \delta$ по вертикали (плашмя) и главной большой осью $2a_z$ по вертикали. Полагаем, что зерновка движется в жидкость и сохраняет начальное расположение (ориентацию). Численные

значения результатов для промежуточных расположений эллипсоидальной зерновки будут находиться между значениями, полученными для двух крайних расположений.

Силы, действующие на эллипсоидальную зерновку при движении из выходного отверстия загрузочного бункера и проникновении в жидкость, показаны на рисунке 5.

Максимальное значение силы сопротивления воздуха при движении эллипсоидальной зерновки у поверхности жидкости R сопоставим со значением силы $m_z \vec{g}$ тяжести зерновки. Считаем нулевой начальную скорость v_0 зерновки на выходе из загрузочного бункера¹⁵:

$$R = \frac{m_z g v_z^2}{v_{vit}^2} = \frac{m_z v_z^2}{2} \cdot \frac{2g}{v_{vit}^2} = m_z g h \frac{2g}{v_{vit}^2} = \frac{2gh}{v_{vit}^2} m_z g, \quad (1)$$



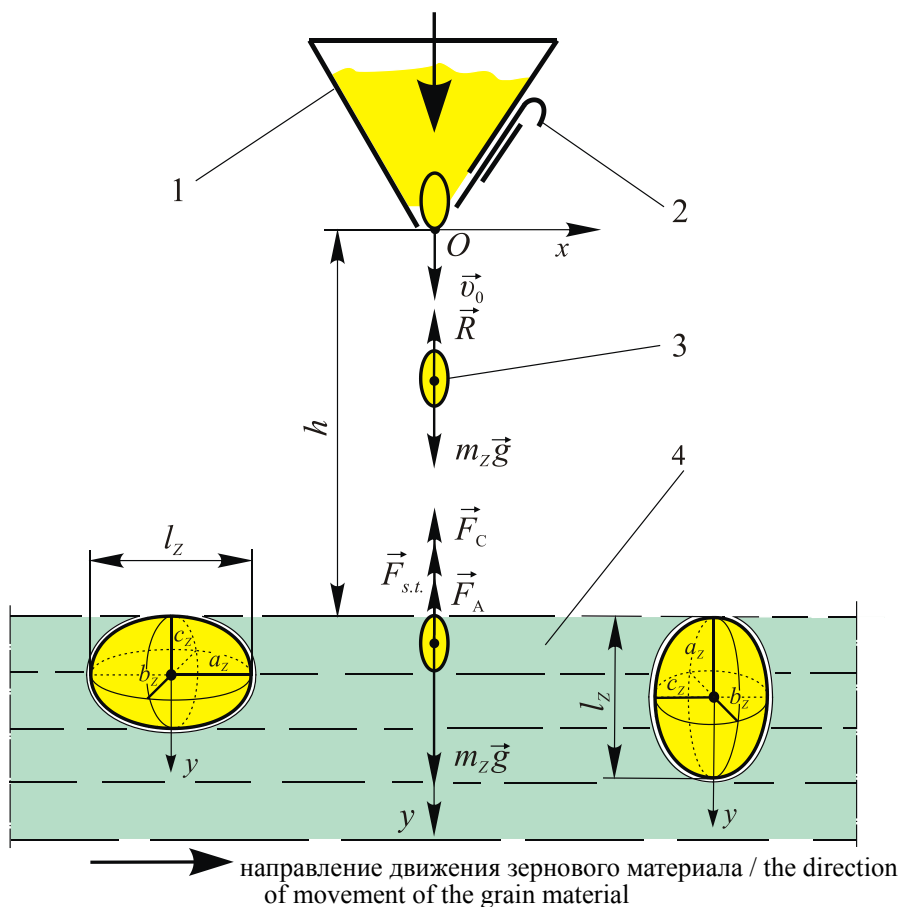
Р и с. 4. Вид зерен, обладающих несмачиваемыми пленками, находящихся на поверхности жидкости

F i g. 4. View of grains with non-wetting films located on the surface of the liquid

¹³ Леонов В. Большая энциклопедия компьютера. М.: Эксмо, 2015. 400 с.; Лебедев А. Н. Полный самоучитель Excel 2013. СПб.: Питер, 2014. 128 с.; Sigma Plot – Scientific Data Analysis and Graphing Software [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sigmaplot.co.uk/products/sigmaplot/> (дата обращения: 27.07.2020).

¹⁴ Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1973. 416 с.

¹⁵ Малис А. Я., Демидов А. Р. Машины для очистки зерна воздушным потоком. М.: Машгиз, 1962. 176 с.



Р и с. 5. Силы, действующие на эллипсоидальную зерновку при движении из выходного отверстия загрузочного бункера и проникновении в жидкость: 1 – загрузочный бункер; 2 – заслонка регулировочная; 3 – зерновка; 4 – ванна с жидкостью

Fig. 5. Forces acting on an ellipsoidal grain when moving from the outlet of the loading hopper and entering the liquid: 1 – loading hopper; 2 – an adjusting gate; 3 – grain; 4 – bath with liquid

где m_z – масса эллипсоидальной зерновки, кг; g – ускорение силы тяжести, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; v_{vit} – скорость парусности (витания) зерновки, м/с; v_z – скорость движения эллипсоидальной зерновки, м/с; h – высота расположения выходного отверстия загрузочного бункера по отношению к поверхности жидкости, м.

При расчетах полагаем значения высоты $h = (1,0 \dots 5,0) \cdot 10^{-2} \text{ м}$ и скоро-

сти витания $v_{vit} = 7,0 \dots 10,5 \text{ м/с}$ хлебных злаковых культур (рожь, пшеница, ячмень и овес)¹⁶. Тогда значения силы R на поверхности жидкости будут $(0,18 \dots 2,0) \cdot 10^{-2} m_z g$. Получили, что сила $m_z g$ тяжести эллипсоидальной зерновки (основная сила процесса) значительно больше силы сопротивления воздуха R движению данной зерновки. Вследствие этого сила сопротивления воздуха R не учитывается при определении высо-

¹⁶ Саитов В. Е. Инновации в послеуборочной обработке...

ты расположения выходного отверстия загрузочного бункера h по отношению к поверхности жидкости.

На выходе из загрузочного бункера эллипсоидальной зерновки и при движении вдоль главной большой оси $2a_z$ или вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя) ее потенциальная энергия $m_z gh$ превратится в кинетическую энергию. Данная кинетическая энергия при полном входе зерновки в жидкость и остановке полностью израсходуется на работу против силы $F_{s.t.}$ поверхностного натяжения жидкости, силы Архимеда F_A и силы гидродинамического сопротивления F_C , появляющейся при турбулентном движении из-за разности давлений впереди эллипсоидальной зерновки и за ней¹⁷.

При движении эллипсоидальной зерновки в жидкость вдоль главной большой оси $2a_z$ и вдоль главной малой оси $2c_z$ величина работы A_n против силы поверхностного натяжения $F_{s.t.}$ будет одинаковой¹⁸:

$$A_n = \sigma \cdot \Delta S, \quad (2)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м; ΔS – площадь полной поверхности эллипсоида, на которую увеличилась свободная поверхность жидкости в результате поступления в нее зерновки, м².

Площадь поверхности эллипсоида определяется выражением¹⁹:

$$\Delta S = 2\pi \left[c_z^2 + \frac{c_z^2 b_z}{\sqrt{a_z^2 - c_z^2}} F(t, k) + b_z \sqrt{a_z^2 - c_z^2} E(t, k) \right], \quad (3)$$

где $F(t, k)$ и $E(t, k)$ – эллиптические интегралы первого и второго рода; t, k – аргументы функций $F(t, k)$ и $E(t, k)$.

Эллиптический интеграл первого рода в выражении (3) равен²⁰:

$$F(t, k) = \int_0^t \frac{d\phi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \phi}}, \quad (4)$$

где ϕ – переменная интегрирования.

Эллиптический интеграл второго рода имеет вид:

$$E(t, k) = \int_0^t \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \phi} d\phi. \quad (5)$$

Аргументы функций $F(t, k)$ и $E(t, k)$ определяются по формулам:

$$t = \arcsin \frac{\sqrt{a_z^2 - c_z^2}}{a_z},$$

$$k = \frac{a_z^2 (b_z^2 - c_z^2)}{b_z^2 (a_z^2 - c_z^2)}. \quad (6)$$

В работе Е. Янке, Ф. Эмде и Ф. Леша эллиптические интегралы первого и второго рода приведены в виде таблиц, зависящих от углов ϕ и α , причем²¹

$$\sin \phi = t, \quad \sin \alpha = k. \quad (7)$$

Аргументы t, k зависят только от линейных размеров зерновок (6), что позволяет найти соответствующие параметры (ϕ, α) таблиц (7), а по ним – значения эллиптических интегралов и площади поверхности эллипсоида (3).

¹⁷ Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Гидродинамика. 5-е изд., стереот. М.: Физматлит, 2001. Т. 4. 736 с.

¹⁸ Андреев Н. Н., Ржевкин С. Н., Горелик Г. С. Курс физики. Под ред. Н. Д. Папалекси. М.: Гостехиздат, 1948. 600 с.

¹⁹ Площадь эллипсоида [Электронный ресурс]. URL: <http://geleot.ru/education/math/geometry/area/ellipsoid> (дата обращения: 27.07.2020).

²⁰ Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. Формулы, графики, таблицы. Перевод с 6-го перераб. немецкого издания / Под ред. Л. И. Седова. М.: Наука, 1964. 344 с.

²¹ Там же.

При полном погружении эллипсоидальной зерновки в водный раствор соли вдоль главной большой оси $2a_z$ центр тяжести вытесненной жидкости поднимается на высоту большой полуоси эллипсоида a_z , и эта жидкость растечется по поверхности жидкости в ванне разрабатываемого устройства. Показатель увеличения потенциальной энергии вытесненной жидкости по отношению к ее поверхности определяет значение работы против силы Архимеда F_A :

$$A_A = m_{zh} g a_z = \frac{\rho_{zh}}{\rho_z} m_z g a_z, \quad (8)$$

где m_{zh} – масса жидкости, вытесненной эллипсоидальной зерновкой, кг.

Изменение уровня жидкости в ванне при погружении в нее отдельной зерновки не учитывается, так как размеры ванны разрабатываемого устройства значительно больше линейных размеров эллипсоидальной зерновки.

При поступлении в жидкость эллипсоидальной зерновки действующая на нее сила гидродинамического сопротивления F_C находится по формуле²²:

$$F_C = cS \frac{\rho_{zh}}{2} v_z^2, \quad (9)$$

где c – коэффициент гидродинамического сопротивления жидкости при движении в ней эллипсоидальной зерновки, который определяется формой зерновки, скоростью ее движения и вязкостью жидкости; S – площадь миделевого сечения (максимальная площадь проекции эллипсоидальной зерновки на плоскость, перпендикулярную вектору скорости зерновки), m^2 .

Работа, производимая против силы гидродинамического сопротивления F_C

при движении эллипсоидальной зерновки вдоль главной большой оси $2a_z$, равна сумме двух работ. В работе, совершаемой зерновкой от момента касания поверхности жидкости до глубины большой полуоси a_z , за миделево сечение принимается переменная площадь $S(y)$ сечения эллипсоидальной зерновки на уровне поверхности жидкости.

Силы, действующие на эллипсоидальную зерновку при падении на поверхность жидкости вдоль главной большой оси $2a_z$, показаны на рисунке 6а.

Эта площадь $S(y)$ сечения эллипсоидальной зерновки равна²³:

$$S(y) = \pi b_z(y) c_z(y), \quad (10)$$

где $b_z(y)$ – переменное значение большой полуоси эллипса, находящегося в сечении эллипсоидальной зерновки поверхностью раствора соли, в который она погружается, м; $c_z(y)$ – переменное значение малой полуоси эллипса, находящегося в сечении эллипсоидальной зерновки поверхностью раствора соли, в который она погружается, м.

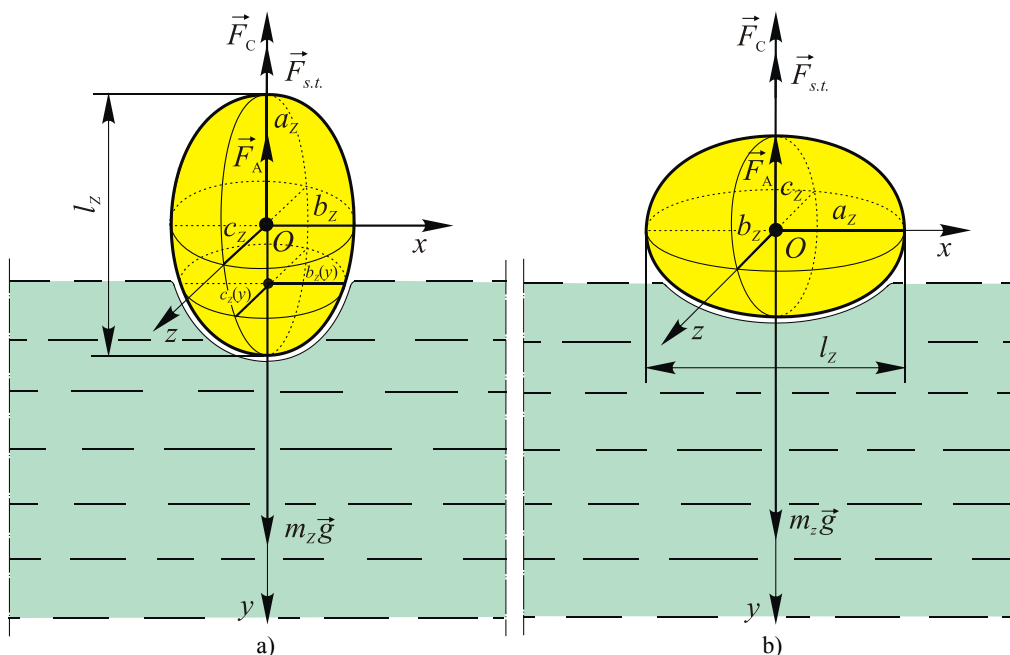
Выражения для полуосей $b_z(y)$ и $c_z(y)$ определяются с помощью двух сечений эллипсоида (рис. 6а), проходящих через главную большую ось $2a_z$ эллипсоида и по осям Ox и Oz соответственно. В этих сечениях получаем эллипсы, уравнения которых будут иметь вид:

$$\frac{y^2}{a_z^2} + \frac{x^2}{b_z^2} = 1, \quad \frac{y^2}{a_z^2} + \frac{z^2}{c_z^2} = 1. \quad (11)$$

Поверхности водного раствора соли, в который вошла эллипсоидальная зерновка, будет соответствовать ордината y . Для этого значения y определим из уравнений (11) выражения для полуосей $b_z(y) = x$ и $c_z(y) = z$:

²² Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика...; Андреев Н. Н., Ржевкин С. Н., Горелик Г. С. Курс физики.

²³ Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. М.: Наука, 1980. 976 с.



Р и с. 6. Силы, действующие на эллипсоидальную зерновку при падении на поверхность жидкости: а) при падении зерновки вдоль главной большой оси $2a_z$; б) при падении зерновки вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя)

Fig. 6. Forces acting on an ellipsoidal grain when falling on the surface of a liquid: а) when the grain falls in the direction of the main major axis $2a_z$; б) when the grain falls in the direction of the main minor axis $2c_z$ (flat)

$$b_z(y) = \frac{b_z}{a_z} \sqrt{a_z^2 - y^2},$$

$$c_z(y) = \frac{c_z}{a_z} \sqrt{a_z^2 - y^2}. \quad (12)$$

Первое слагаемое работы против силы F_C найдем в системе координат эллипсоида (рис. 6а), полагая скорость зерновки постоянной, и получим завышенную величину работы A_{1C} :

$$A_{1C} = - \int_{a_z}^0 F_C dy = c \frac{\rho_{zh}}{2} v_z^2 \int_0^{a_z} S(y) dy =$$

$$= c \frac{\pi \rho_{zh} b_z c_z}{2 a_z^2} v_z^2 \int_0^{a_z} (a_z^2 - y^2) dy =$$

$$= \frac{\pi c \rho_{zh} a_z b_z c_z v_z^2}{3} = \frac{c \rho_{zh}}{2 \rho_z} m_z gh. \quad (13)$$

При определении второго слагаемого работы площадь миделевого сечения – постоянная величина ($\pi b_z c_z$):

$$A_{2C} = F_C \cdot a_z = c S \frac{\rho_{zh}}{2} v_z^2 \cdot a_z =$$

$$= \frac{\pi c b_z c_z \rho_{zh} v_z^2 a_z}{2} = \frac{3 c \rho_{zh}}{4 \rho_z} m_z gh. \quad (14)$$

При нахождении полной работы против силы гидродинамического сопротивления F_C сумму работ A_{1C} и A_{2C} умножим на $1/2$ (завышенная величина работы):

$$A_C = \frac{1}{2} (A_{1C} + A_{2C}) =$$

$$= \frac{c \rho_{zh}}{4 \rho_z} m_z gh + \frac{3 c \rho_{zh}}{8 \rho_z} m_z gh =$$

$$= \frac{5 c \rho_{zh}}{8 \rho_z} m_z gh. \quad (15)$$

При полном погружении зерновки в водный раствор соли и остановке сила тяжести $m_z \vec{g}$, приложенная к зерновке, при погружении ее на глубину $2a_z$ вдоль главной большой оси совершит отрицательную работу A_T :

$$A_T = -2m_z g a_z. \quad (16)$$

Потенциальная энергия $m_z g h$ при падении эллипсоидальной зерновки на поверхность жидкости перейдет в кинетическую энергию. Она при полном входе в водный раствор соли и остановке зерновки будет полностью израсходована на найденные ранее работы. Это работает закон сохранения энергии. Потенциальная энергия $m_z g h$ равна сумме правых частей уравнений (2), (8), (15) и (16):

$$m_z g h = \sigma \cdot \Delta S + \frac{\rho_{zh}}{\rho_z} m_z g a_z + \frac{5c\rho_{zh}}{8\rho_z} m_z g h - 2m_z g a_z. \quad (17)$$

Преобразовав соотношение (17), получим выражение для определения минимальной высоты расположения выходного отверстия загрузочного бункера относительно поверхности водного раствора соли при поступлении в него зерновки вдоль главной большой оси $2a_z$:

$$h = \frac{8}{8\rho_z - 5c\rho_{zh}} \times \left[\frac{3\sigma \cdot \Delta S}{4\pi a_z b_z c_z g} + \rho_{zh} a_z - 2\rho_z a_z \right]. \quad (18)$$

При анализе процесса падения эллипсоидальной зерновки в водный раствор соли вдоль главной малой оси $2c_z$ (рис. 6b) нужно учесть, что работа против силы поверхностного натяжения жидкости будет такой же, как и при падении вдоль главной большой оси $2a_z$ эллипсоида (2), потому что она зависит

только от коэффициента σ поверхностного натяжения водного раствора соли и площади поверхности эллипсоида ΔS , которые для обоих направлений движения зерновки одинаковы.

При полном погружении эллипсоидальной зерновки в водный раствор соли вдоль главной малой оси $2c_z$ центр тяжести вытесненной жидкости поднимается на высоту малой полуоси эллипсоида c_z , которая растечется по поверхности жидкости в ванне разрабатываемого устройства. Величина увеличения потенциальной энергии вытесненной жидкости по отношению к ее поверхности определяет значение работы против силы Архимеда F_A :

$$A_A = m_{zh} g c_z = \frac{\rho_{zh}}{\rho_z} m_z g c_z. \quad (19)$$

При падении эллипсоидальной зерновки вдоль главной малой оси $2c_z$ работа против силы F_C гидродинамического сопротивления будет такой же, как и при падении зерновки вдоль главной большой оси $2a_z$ (15). Это объясняется математическим методом нахождения выражения для работы. При определении первой части работы находится половина объема эллипсоида $\frac{2}{3} \pi a_z b_z c_z$, а при определении второй части работы объем эллиптического цилиндра $\pi a_z b_z c_z$. Эти объемы будут одинаковыми при любом из двух направлений падения эллипсоидальной зерновки, несмотря на разные геометрические формы половин эллипсоидов и эллиптических цилиндров, соответствующих каждому из направлений падения эллипсоидальной зерновки. Математически это объясняется неизменностью выражений для объемов этих тел при взаимной замене длин (a_z на c_z) путей движения эллипсоидальной зерновки, соответствующих каждому из направлений падения.

При полном погружении зерновки в водный раствор соли и остановке сила тяжести $m_z \vec{g}$, приложенная к зерновке,

при погружении ее на глубину $2c_z$ вдоль главной малой оси совершит отрицательную работу A_T силы тяжести:

$$A_T = -2m_z g c_z. \quad (20)$$

При полном входе в водный раствор соли и остановке зерновки потенциальная энергия будет полностью израсходована на найденные ранее работы. Это работает закон сохранения энергии.

Поэтому потенциальная энергия ($m_z g h$) равна сумме правых частей уравнений (2), (15), (19) и (20):

$$m_z g h = \sigma \cdot \Delta S + \frac{\rho_{zh}}{\rho_z} m_z g c_z + \frac{5c\rho_{zh}}{8\rho_z} m_z g h - 2m_z g c_z. \quad (21)$$

После преобразования уравнения (21) получим выражение для определения минимальной высоты расположения выходного отверстия загрузочного бункера h по отношению к поверхности жидкости при проникновении в нее зерновки вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя):

$$h = \frac{8}{8\rho_z - 5c\rho_{zh}} \times \left[\frac{3\sigma \cdot \Delta S}{4\pi a_z b_z c_z g} + \rho_{zh} c_z - 2\rho_z c_z \right]. \quad (22)$$

При расчетах по формулам (18) и (22) примем величину коэффициента гидродинамического сопротивления $c = 0,9$. Это выполняется для тел с плохо обтекаемой формой²⁴.

Для зерновки, падающей в жидкость вдоль главной большой оси $2a_z$ и вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя) и преодолевающей поверхностное натяжение, проведем качественный

анализ полученных зависимостей (18) и (22) минимальной высоты h .

При увеличении плотности зерновки ρ_z , при неизменности значений остальных параметров (a_z , b_z , c_z , ρ_{zh} , c и σ) минимальная высота h уменьшается, так как в правых частях выражений (18) и (22) знаменатели коэффициентов перед квадратными скобками увеличиваются (коэффициенты уменьшаются), и уменьшаются значения квадратных скобок из-за вычитания больших величин ($2\rho_z a_z$) и ($2\rho_z c_z$). Это очевидно, потому что с увеличением плотности зерновки ρ_z увеличиваются ее масса m_z и потенциальная энергия, если высоту h оставить прежней, соответствующей меньшей плотности ρ_z . Поэтому с увеличением плотности зерновки ρ_z требуется меньшая, по сравнению с полученной для меньшей плотности зерновки ρ_z , потенциальная энергия (минимальная высота h), необходимая для преодоления зерновкой поверхностного натяжения водного раствора соли.

Такой же анализ показывает, что с увеличением плотности жидкости ρ_{zh} минимальная высота расположения выходного отверстия загрузочного бункера h относительно поверхности жидкости при движении эллипсоидальной зерновки вдоль главной большой оси $2a_z$ (18) и при движении вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя) (22) увеличивается, потому что с увеличением плотности жидкости ρ_{zh} , при неизменных значениях остальных параметров (a_z , b_z , c_z , ρ_z , c), увеличиваются сила Архимеда F_A и сила гидродинамического сопротивления F_C (9), а следовательно, и работа против этих сил (8), (15) и (19), необходимая для проникновения зерновки в водный раствор соли. Увеличивается также величина работы против силы поверхностного натяжения водного раствора соли (2), так как увеличивается соответствующий плотности жид-

²⁴ Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990. 365 с.

кости ρ_{zh} коэффициент поверхностного натяжения водного раствора соли σ . Из закона сохранения энергии нужно увеличить потенциальную энергию зерновки, а значит увеличить минимальную высоту h , необходимую для преодоления ею поверхностного натяжения водного раствора соли.

При увеличении любого из линейных размеров (a_z , b_z , c_z) эллипсоидальной зерновки и падении по любому из направлений, при неизменности значений остальных параметров (ρ_z , ρ_{zh} , c и σ), минимальная высота h уменьшается. Физически это объясняется тем, что с увеличением любого из линейных размеров (a_z , b_z , c_z) эллипсоидальной зерновки увеличивается ее объем. Следовательно, увеличивается масса зерновки m_z и ее потенциальная энергия, если высоту h оставить прежней, соответствующей меньшему значению линейного размера зерновки. Получается завышенное значение потенциальной энергии, которое нужно уменьшить, изменив минимальную высоту падения зерновки h , необходимую для преодоления поверхностного натяжения жидкости.

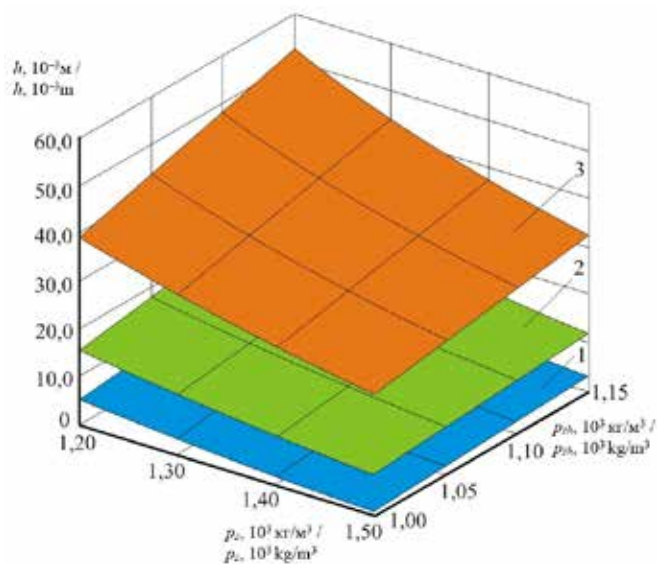
Сравним минимальные высоты h , необходимые для преодоления поверхностного натяжения жидкости при поступлении в нее эллипсоидальной зерновки вдоль главной большой оси $2a_z$ (вертикальное начальное положение) и при падении вдоль главной малой оси $2c_z$ (горизонтальное начальное положение). Для этого проведем анализ правых частей уравнений (18) и (22) при одинаковых значениях физико-механических свойств зерна и водного раствора соли. В этих условиях минимальная высота h , необходимая для преодоления поверхностного натяжения жидкости при поступлении в нее эллипсоидальной зерновки вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя), будет больше аналогичной высоты h при движении вдоль главной большой оси $2a_z$, потому что квадратные скобки в правых частях уравнений (18) и (22) при движении

эллипсоидальной зерновки вдоль главной большой оси $2a_z$ будут меньше, чем при движении вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя) ($a_z(2\rho_z - \rho_{zh}) > c_z(2\rho_z - \rho_{zh})$). Это объясняется тем, что величина потенциальной энергии эллипсоидальной зерновки, запасаемая за счет начального геометрического вертикального положения ($2m_zga_z$), больше, чем для горизонтального ($2m_zgc_z$). Поэтому при горизонтальном начальном положении эллипсоидальной зерновки потенциальная энергия m_zgh , а значит и высота h , должна быть больше, чем при вертикальном.

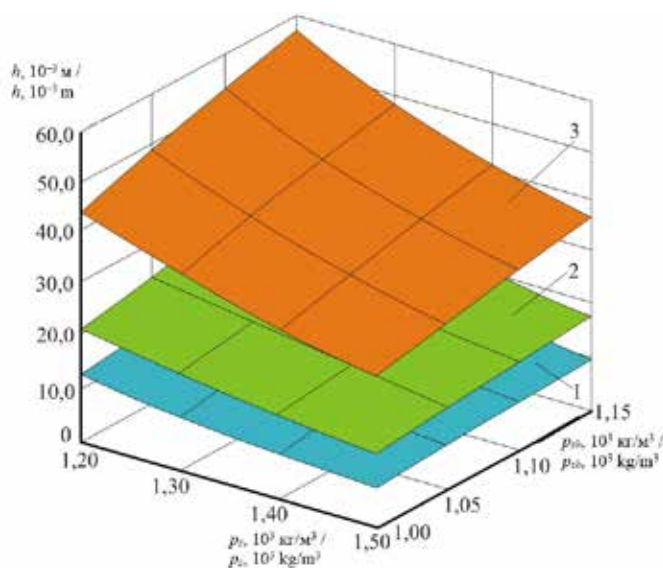
Количественный анализ (расчеты) по выражениям (18) и (22) для хлебных злаковых культур (рожь, пшеница, ячмень и овес) при учете их минимальных ($2a_{\min z}(l_{\min z}) = 5,0 \cdot 10^{-3}$ м, $2b_{\min z}(b_{\min}) = 1,4 \cdot 10^{-3}$ м, $2c_{\min z}(\delta_{\min}) = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м), средних ($2a_{cp z}(l_{cp z}) = 7,5 \cdot 10^{-3}$ м, $2b_{cp z}(b_{cp}) = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м, $2c_{cp z}(\delta_{cp}) = 2,35 \cdot 10^{-3}$ м) и максимальных ($2a_{\max z}(l_{\max z}) = 10,0 \cdot 10^{-3}$ м, $2b_{\max z}(b_{\max}) = 3,6 \cdot 10^{-3}$ м, $2c_{\max z}(\delta_{\max}) = 3,5 \cdot 10^{-3}$ м) линейных размеров представлен на рисунке 7 в виде зависимостей минимальной высоты расположения выходного отверстия загрузочного бункера h относительно поверхности жидкости от ее плотности ρ_{zh} и плотности зерновки ρ_z .

Из рисунка 7 следует, что при падении эллипсоидальной зерновки, имеющей минимальные либо максимальные или средние линейные размеры, в жидкость вдоль главной большой оси $2a_z$ либо вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя) с увеличением ее плотности ρ_z значения минимальной высоты расположения выходного отверстия загрузочного бункера h относительно поверхности жидкости уменьшаются, а с повышением плотности жидкости ρ_{zh} наоборот возрастают. Поведение поверхностей на рисунке 7 полностью соответствует результатам приведенного выше качественного анализа формул (18) и (22).

Наименьшие значения минимальной высоты расположения выходного



a)



b)

Р и с. 7. Зависимости минимальной высоты расположения выходного отверстия загрузочного бункера h относительно поверхности жидкости от ее плотности ρ_{zh} и плотности зерновки ρ_z :

а) при падении эллипсоидальной зерновки в жидкость вдоль главной большой оси $2a_z$;

б) при падении эллипсоидальной зерновки в жидкость вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя);

1 – при максимальных линейных размерах зерновки; 2 – при средних линейных размерах зерновки;

3 – при минимальных линейных размерах зерновки

Fig. 7. Dependences of the minimum height of the outlet opening h of the loading hopper relative to the surface of the liquid on its density ρ_{zh} and density of the grain ρ_z : a) when the ellipsoidal grain is dropped into the liquid in the direction of the main major axis $2a_z$; b) when the ellipsoidal grains fall into the liquid in the direction of the main minor axis $2c_z$ (flat); 1 – with the maximum linear dimensions of the seed; 2 – with average linear sizes of the kernel; 3 – with minimum linear dimensions of the seed

отверстия загрузочного бункера h , необходимые для преодоления поверхностного натяжения жидкости зерновкой, определяются при максимальном значении ее плотности $\rho_z = 1,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и погружении в воду (H_2O) плотностью $\rho_{zh} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Так, при падении зерновки в воду (H_2O) вдоль главной большой оси $2a_z$ значение высоты h для минимальных линейных размеров составляет $25,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, для средних линейных размеров – $4,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, а для максимальных линейных размеров – $0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. При падении зерновки в воду (H_2O) вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя) данные значения возрастают и для минимальных линейных размеров $h = 29,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, для средних линейных размеров $h = 13,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, а для максимальных линейных размеров $h = 7,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

При максимальном значении плотности зерновки $\rho_z = 1,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и погружении вдоль главной большой оси $2a_z$ в водный раствор хлористого натрия (NaCl) плотностью $\rho_{zh} = 1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, соответствующей максимальному значению плотности склероций спорыньи ρ_c , значение высоты h для минимальных линейных размеров составляет $32,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, средних линейных размеров – $11,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, а для максимальных линейных размеров – $2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. При падении зерновки вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя) в данную жидкость ее значения высоты h возрастают и для минимальных линейных размеров $h = 36,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, средних линейных размеров $h = 17,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, максимальных линейных размеров $h = 9,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Наибольшие значения минимальной высоты расположения выходного отверстия загрузочного бункера h для гарантированного преодоления поверхностного натяжения жидкости зерновкой определяются при минимальном значении ее плотности $\rho_z = 1,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и вхождении в водный раствор хлористого натрия (NaCl) плотностью $\rho_{zh} = 1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, совпадающей с максимальным значени-

ем плотности спорыньи ρ_c . Так, при вхождении зерновки в водный раствор хлористого натрия (NaCl) вдоль главной большой оси $2a_z$ значение высоты h для минимальных линейных размеров составляет $52,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, средних линейных размеров – $22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, а для максимальных линейных размеров – $9,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. При падении зерновки в водный раствор хлористого натрия (NaCl) вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя) данные значения возрастают и для минимальных линейных размеров $h = 57,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, средних линейных размеров $h = 28,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, максимальных линейных размеров $h = 17,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Таким образом, минимальная величина высоты нахождения выходного отверстия загрузочного бункера h при гарантированном преодолении поверхностного натяжения жидкости зерновкой при ее наименьшей плотности $\rho_z = 1,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ в зависимости от линейных размеров при вхождении в водный раствор хлористого натрия (NaCl) плотностью $\rho_{zh} = 1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, совпадающей с максимальным значением плотности спорыньи ρ_c , вдоль главной большой оси $2a_z$ варьируется в пределах $(9,8 \dots 52,8) \cdot 10^{-3} \text{ м}$, а вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя) – в пределах $(17,1 \dots 57,1) \cdot 10^{-3}$. При погружении в такой же водный раствор хлористого натрия (NaCl) зерновки, имеющей наибольшую плотность $\rho_z = 1,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ вдоль главной большой оси $2a_z$ минимальная высота h расположения загрузочного бункера варьируется в пределах $(2,8 \dots 32,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$, а при погружении вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя) – в пределах $(9,9 \dots 36,6) \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Обсуждение и заключение

Минимальная высота расположения выходного отверстия загрузочного бункера h относительно поверхности жидкости зависит от ориентации зерновок в момент вхождения в нее, их линейных размеров и плотности ρ_z , а также плотности водного раствора соли ρ_{zh} и его коэффициента поверхностного на-

тяжения σ . Минимальная величина высоты нахождения выходного отверстия загрузочного бункера h , при которой гарантированно происходит преодоление эллипсоидальной зерновкой поверхностного натяжения жидкости плотностью $\rho_{zh} = 1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, совпадающей с максимальным значением плотности спорыньи, составляет $57,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и определена для минимальных значений линейных размеров и плотности зерновок ржи. Эта высота h , рекомендованная теорией, при поточном поступлении зернового материала в машину выделения вредных примесей мокрым способом будет одной и той же для всех зерен со всевозможными линейными размерами и плотностями.

Такая величина высоты h для большинства зерновок является завышенной. Кинетическая энергия таких зерно-

вок у поверхности жидкости позволит им не только преодолеть поверхностное натяжение жидкости, но и углубиться в нее, образовав каверну с возможным захватом пузырька воздуха.

Полученные в работе результаты совместно с исследованиями, приведенными в статье В. А. Сысуева и соавторов, позволяют рассчитать место расположения устройства разрушения слипшихся в водном растворе соли зерен со склероциями спорыньи из-за поступления зернового материала потоком и отделения от зерен возможно захваченных пузырьков воздуха [21].

Представленные формулы (18) и (22) позволяют выявить области параметров конструкции машины, в которых можно поставить практические эксперименты с минимальными материальными и временными затратами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Aldoshin, N.** Harvesting *Lupinus Albus* Axial Rotary Combine Harvesters / N. Aldoshin, O. Didmanidze. – DOI 10.17221/107/2017-RAE // Research in Agricultural Engineering. – 2018. – Vol. 64, no. 4. – Pp. 209–214. – URL: https://www.agriculturejournals.cz/web/rae.htm?type=article&id=107_2017-RAE (дата обращения: 27.07.2020).
2. **Aldoshin, N.** Work Improvement of Air-And-Screen Cleaner of Combine Harvester / N. Aldoshin, O. Didmanidze, N. Lylin [et al.]. – DOI 10.22616/ERDev2019.18.N110 // Engineering for Rural Development: Proceedings of 18th International Scientific Conference. – 2019. – Vol. 18. – Pp. 100–104. – URL: <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2019/Papers/N110.pdf> (дата обращения: 27.07.2020).
3. **Ponomareva, M. L.** Increasing Spread of *Claviceps Purpurea* (Fr.) Tul. and It's Effect on the Quantity and Quality of Winter Rye / M. L. Ponomareva, S. N. Ponomarev, G. S. Mannapova [et al.] // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2016. – Vol. 7, Issue 3. – Pp. 1865–1871. – URL: [https://www.rjpbcs.com/pdf/2016_7\(3\)/\[227\].pdf](https://www.rjpbcs.com/pdf/2016_7(3)/[227].pdf) (дата обращения: 27.07.2020).
4. **Шешегова, Т. К.** Некоторые приемы и средства защиты озимой ржи от спорыньи / Т. К. Шешегова, Л. М. Щекленна // Достижения науки и техники АПК. – 2014. – № 3. – С. 47–50. – URL: <http://agroaprk.ru/28-archive/03-2014/187-2014-03-15-ru> (дата обращения: 27.07.2020).
5. **Хазиев, А. З.** Ущерб от спорыньи на озимой ржи и меры его предупреждения / А. З. Хазиев, М. Л. Пономарева // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2007. – Т. 2, № 2 (6). – С. 80–82. – URL: https://repository.kpfu.ru/?p_id=124462 (дата обращения: 27.07.2020). – Рез. англ.
6. **Щекленна, Л. М.** Влияние погодных факторов на отдельные периоды развития гриба *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul и уровень вредоносности спорыньи в Кировской области / Л. М. Щекленна. – DOI 10.30766/2072-9081.2019.20.2.134-143 // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2019. – № 20 (2). – С. 134–143. – URL: <https://www.agronauka-sv.ru/jour/article/view/315> (дата обращения: 27.07.2020). – Рез. англ.



7. **Щекленна, Л. М.** Проблема спорыньи злаков (*Claviceps purpurea* (Fr.) Tul.): история и современность (обзор) / Л. М. Щекленна, Т. К. Шешегова. – DOI 10.25750/1995-4301-2013-1-005-012 // Теоретическая и прикладная экология. – 2013. – № 1. – С. 5–12. – URL: <http://envjournal.ru/ari/v2013/v1/files/13101.pdf> (дата обращения: 27.07.2020).
8. **Шешегова, Т. К.** Зависимость вредоносности спорыньи от биометрических показателей склероциев / Т. К. Шешегова, Л. М. Щекленна // Защита и карантин растений. – 2017. – № 11. – С. 9–12.
9. **Astanakulov, K. D.** Design of a Grain Cleaning Machine for Small Farms / K. D. Astanakulov, Y. Z. Karimov, G. Fozilov // AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. – 2011. – Vol. 42, no. 4. – Pp. 37–40.
10. **Savinyh, P.** Development and Theoretical Studies of Grain Cleaning Machine for Fractional Technology of Flattening Forage Grain / P. Savinyh, Y. Sychugov, V. Kazakov [et al.]. – DOI 10.22616/ERDev2018.17.N156 // Proceedings of 17th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. – 2018. – Pp. 124–130. – URL: <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2018/Papers/N156.pdf> (дата обращения: 27.07.2020).
11. **Saitov, V. E.** Assessing the Adequacy of Mathematical Models of Light Impurity Fractionation in Sedimentary Chambers of Grain Cleaning Machines / V. E. Saitov, R. F. Kurbanov, A. N. Suvorov. – DOI 10.1016/j.proeng.2016.06.728 // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – Pp. 107–110. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816312772?via%3Dihub> (дата обращения: 27.07.2020).
12. **Gievsky, A. M.** Substantiation of Basic Scheme of Grain Cleaning Machine for Preparation of Agricultural Crops Seeds / A. M. Gievsky, V. I. Orobinsky, A. P. Tarasenko [et al.]. – DOI 10.1088/1757-899X/327/4/042035 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 327. – P. 042035. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/327/4/042035> (дата обращения: 27.07.2020).
13. **Дринча, В. М.** Применение и функциональные возможности пневмосортировальных столов / В. М. Дринча, И. Б. Борисенко // Научно-агрономический журнал. – 2008. – № 2 (83). – С. 33–36.
14. **Шафоростов, В. Д.** Качественные показатели работы фотосепаратора по фракционной технологии при разделении семян подсолнечника / В. Д. Шафоростов, И. Е. Припоров // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 1 (32) – С. 23–25. – URL: <https://research-journal.org/technical/kachestvennye-pokazateli-raboty-fotoseparatora-po-frakcionnoj-tehnologii-pri-razdelenii-semyan-podsolnechnika/> (дата обращения: 27.07.2020). – Рез. англ.
15. **Патент № 2667066 Российская Федерация, МПК В03В 5/48, В02В 1/04.** Машина для отделения спорыньи от семян ржи : № 2017115170/03 : заявл. 27.04.2017 : опубл. 18.09.2018 / Сысуев В. А. [и др.] ; заявитель ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого». – 10 с. – URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2667066C1_20180918 (дата обращения: 27.07.2020). – Рез. англ.
16. **Патент № 2689470 Российская Федерация, МПК В03В 5/48, В02В 1/04.** Машина для отделения спорыньи от семян ржи : № 2018136461/03 : заявл. 15.10.2018 : опубл. 28.05.2019 / Сaitov А. В., Гатауллин Р. Г., Сaitov В. Е. ; заявитель и патентообладатель Сaitov А. В. – URL: <https://findpatent.ru/patent/268/2689470.html> (дата обращения: 27.07.2020).
17. **Комаров, А. А.** Падение тела в резервуар с жидкостью и расчет возникающих при этом динамических нагрузок / А. А. Комаров, В. В. Казеннов. – DOI 10.22227/1997-0935.2014.5.135-143 // Вестник МГСУ. – 2014. – № 5. – С. 135–143. – URL: <http://vestnikmgsu.ru/ru/component/sjarchive/issue/article.display/2014/5/135-143> (дата обращения: 27.07.2020). – Рез. англ.
18. **Scolan, Y.** Energy Distribution from Vertical Impact of a Three-Dimensional Solid Body Onto the Flat Free Surface of an Ideal Fluid / Y. Scolan, A. Korobkin. – DOI 10.1016/S0889-9746(02)00118-4 // Journal of Fluids and Structures. – 2003. – Vol. 17, Issue 2. – Pp. 275–286. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0889974602001184?via%3Dihub> (дата обращения: 27.07.2020).
19. **Scolan, Y.** Mixed Boundary Value Problem in Potential Theory Application to the Hydrodynamic Impact (Wagner) Problem / Y. Scolan, A. Korobkin. – DOI 10.1016/j.crme.2012.09.006 // Comptes Rend-

dus Mecanique. – 2012. – Vol. 340, Issue 10. – Pp. 702–705. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631072112001556?via%3Dihub> (дата обращения: 27.07.2020).

20. Sysuev, V. A. Theoretical Background of Calculation of the Parameters of the Device for Grain Cleaning from Ergot Sclerotia / V. A. Sysuev, V. E. Saitov, V. G. Farafonov [et al.]. – DOI 10.3103/S1068367417030156 // Russian Agricultural Sciences. – 2017. – Vol. 43, Issue 3. – Pp. 273–276. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103%2FS1068367417030156> (дата обращения: 27.07.2020).

21. Сысueв, В. А. Исследование параметров движения зерна в жидкости устройства для удаления спорыньи / В. А. Сысueв, В. Е. Сaitов, В. Г. Фарафоноф [и др.]. – DOI 10.15507/2658-4123.029.201902.248-264 // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29. № 2. – С. 248–264. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/82-19-2/701-10-15507-0236-2910-029-201902-7> (дата обращения: 27.07.2020). – Рез. англ.

Поступила 02.02.2020; принята к публикации 16.04.2020; опубликована онлайн 30.09.2020

Об авторах:

Сaitов Виктор Ефимович, старший научный сотрудник лаборатории механизации полеводства ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а), профессор кафедры эксплуатации и ремонта машинно-тракторного парка ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (610017, Россия, г. Киров, Октябрьский пр-т, д. 133), доктор технических наук, Researcher ID: B-6098-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5548-8483>, vicsait-valita@e-kirov.ru

Фарафоноф Вячеслав Георгиевич, заведующий кафедрой математики и физики ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (610017, Россия, г. Киров, Октябрьский пр-т, д. 133), кандидат физико-математических наук, доцент, Researcher ID: B-7341-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5020-3648>, farwg@mail.ru

Сaitов Алексей Викторович, аспирант инженерного факультета ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (610017, Россия, г. Киров, Октябрьский пр-т, д. 133), Researcher ID: B-7315-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0266-4727>, alexseysaitov@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. Е. Сaitов – формулирование основной концепции исследования, подготовка первоначального варианта текста и формирование выводов; В. Г. Фарафоноф – проведение теоретических исследований погружения зерна в жидкость и доработка текста; А. В. Сaitов – обзор и анализ научных источников, оформление графического материала и списка использованной литературы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Aldoshin N., Didmanidze O. Harvesting Lupinus Albus Axial Rotary Combine Harvesters. *Research in Agricultural Engineering*. 2018; 64(4):209-214. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17221/107/2017-RAE>
2. Aldoshin N., Didmanidze O., Lylin N., et al. Work Improvement of Air-and-Screen Cleaner of Combine Harvester. *Engineering for Rural Development: Proceedings of 18th International Scientific Conference*. 2019: 18:100-104. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N110>
3. Ponomareva M.L., Ponomarev S.N., Mannapova G.S., et al. Increasing Spread of Claviceps Purpurea (Fr). Tul. and It's Effect on the Quantity and Quality of Winter Rye. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2016; 7(3):1865-1871. Available at: [https://www.rjpbcs.com/pdf/2016_7\(3\)/\[227\].pdf](https://www.rjpbcs.com/pdf/2016_7(3)/[227].pdf) (accessed 27.07.2020). (In Eng.)



4. Sheshegova T.K., Shchekleina L.M. Some Ways and Means of Ergot Protection of Winter Rye. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AIC. 2014; (3):47-50. Available at: <http://agroapk.ru/28-archive/03-2014/187-2014-03-15-ru> (accessed 27.07.2020). (In Russ.)
5. Khaziev A.Z., Ponomareva M.L. Damage from Ergot on Winter Rye and Measures for Preventing. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Kazan State Agrarian University Bulletin. 2007; 2(2):80-82. Available at: https://repository.kpfu.ru/?p_id=124462 (accessed 27.07.2020). (In Russ.)
6. Shchekleina L.M. Influence of Weather Factors on Separate Periods of Fungus *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul Development and Level of Ergot Harmfulness in Kirov Region. *Agrarnaya nauka Yevro-Severo-Vostoka* = Agrarian Science of Euro-North-East. 2019; (20):134-143. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.2.134-143>
7. Shchekleina L.M., Sheshegova T.K. The Problem of Ergot Grains (*Claviceps purpurea* (Fr.) Tul.): Past and Present (Review). *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* = Theoretical and Applied Ecology. 2013; (1):5-12. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2013-1-005-012>
8. Sheshegova T.K., Shchekleina L.M. The Dependence of the Harmfulness of Ergot on the Biometric Indicators of *Sclerotia*. *Zashchita i karantin rasteniy* = Plant Protection and Quarantine. 2017; (11):9-12 (In Russ.)
9. Astanakulov K.D., Karimov Y.Z., Fozilov G. Design of a Grain Cleaning Machine for Small Farms. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2011; 42(4):37–40. (In Eng.)
10. Savinyh P., Sychugov Y., Kazakov V., et al. Development and Theoretical Studies of Grain Cleaning Machine for Fractional Technology of Flattening Forage Grain. In: *Proceedings of 17th International Scientific Conference Engineering for Rural Development*. 2018. Pp. 124-130. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N156>
11. Saitov V.E., Kurbanov R.F., Suvorov A.N. Assessing the Adequacy of Mathematical Models of Light Impurity Fractionation in Sedimentary Chambers of Grain Cleaning Machines. *Procedia Engineering*. 2016; 150:107-110. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.728>
12. Gievsky A.M., Orobinsky V.I., Tarasenko A.P., et al. Substantiation of Basic Scheme of Grain Cleaning Machine for Preparation of Agricultural Crops Seeds. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 327:042035. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042035>
13. Drincha V.M., Borisenko I.B. Application and Functionality of Pneumatic Sorting Tables. *Nauchno-agronomicheskii zhurnal* = Scientific and Agronomical Journal. 2008; (2):33-36. (In Russ.)
14. Shaforostov V.D. Priporov I.E. Quality Indicators of Work of the Photoseparator on Fractional Technologies at Division of Sunflower Seed. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* = International Research Journal. 2015; (1):23-25. Available at: <https://research-journal.org/technical/kachestvennye-pokazateli-raboty-fotoseparatora-po-frakcionnoj-texnologii-pri-razdelenii-semyan-podsolnechnika/> (accessed 27.07.2020). (In Russ.)
15. Machine to Separate Ergot from Rye Seeds: Patent 2667066 Russian Federation. No. 2017115170/03; appl. 27.04.2017; publ. 18.09.2018. Bulletin No. 26. 10 p. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2667066C1_20180918 (accessed 27.07.2020). (In Russ.)
16. Machine to Separate Ergot from Rye Seeds: Patent 2689470 Russian Federation. No. 2018136461/03; appl. 15.10.2018; publ. 28.05.2019. Available at: <https://findpatent.ru/patent/268/2689470.html> (accessed 27.07.2020). (In Russ.)
17. Komarov A.A., Kazennov V.V. Body Drop into a Fluid Tank and Dynamic Loads Calculation. *Vestnik MGSU*. 2014; (5):135-143. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2014.5.135-143>
18. Scolan Y., Korobkin A. Energy Distribution from Vertical Impact of a Three-Dimensional Solid Body onto the Flat Free Surface of an Ideal Fluid. *Journal of Fluids and Structures*. 2003; 17(2):275-286. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0889-9746\(02\)00118-4](https://doi.org/10.1016/S0889-9746(02)00118-4)
19. Scolan Y., Korobkin A. Mixed Boundary Value Problem in Potential Theory Application to the Hydrodynamic Impact (Wagner) Problem. *Comptes Rendus Mecanique*. 2012; 340(10):702-705. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crme.2012.09.006>

20. Sysuev V.A., Saitov V.E., Farafonov V.G., et al. Theoretical Background of Calculation of the Parameters of the Device for Grain Cleaning from Ergot Sclerotia. *Russian Agricultural Sciences*. 2017; 43(3):273-276. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068367417030156>

21. Sysuev V.A., Saitov V.E., Farafonov V.G., et al. Investigation of Grain Movement Parameters in the Liquid of the Device for Removing Ergot. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(2):248-264. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.248-264>

Received 02.02.2020; revised 16.04.2020; published online 30.09.2020

About the authors:

Viktor E. Saitov, Senior Researcher of Laboratory for Field Agriculture, Federal Agricultural Research Center of the North-East named after N. V. Rudnitsky (166a Lenin St., Kirov 610007, Russia), Professor of Machine Park Operation and Repair Chair, Vyatka State Agricultural Academy (133 Oktyabrskiy Prospekt, Kirov 610017, Russia), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: B-6098-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5548-8483>, vicsait-valita@e-kirov.ru

Vyacheslav G. Farafonov, Head of Chair of Mathematics and Physics, Vyatka State Agricultural Academy (133 Oktyabrskiy Prospekt, Kirov 610017, Russia), Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Researcher ID: B-7341-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5020-3648>, farwg@mail.ru

Aleksey V. Saitov, Postgraduate Student of Engineering Faculty, Vyatka State Agricultural Academy (133 Oktyabrskiy Prospekt, Kirov 610017, Russia), Researcher ID: B-7315-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0266-4727>, alexseysaitov@yandex.ru

Contribution of the authors:

V. E. Saitov – formulation of the basic concept of the study, writing the draft and drawing conclusions; V. G. Farafonov – theoretical studies of grain immersion in liquid and text editing; A. V. Saitov – review and analysis of scientific sources, graphic design and list of literature.

All authors have read and approved the final manuscript.



Результаты камеральных работ уборки белого люпина очесывающей жаткой с гребенками для крупносемянных культур

Н. В. Алдошин¹, М. А. Мосяков^{2*}

¹ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (г. Москва, Россия)

²ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (г. Москва, Россия)

*maks.mosyakov@yandex.ru

Введение. Сельскохозяйственные машины и устройства, применяемые в уборке белого люпина, не обеспечивают полноту сбора семян, что приводит к нарушению агротехнических требований, предъявляемых к уборке зернобобовых культур. Необходим поиск новых технологических и технических решений, позволяющих уменьшить потери семян во время этого процесса. Наиболее перспективным вариантом решения проблемы уборки белого люпина видится применение индустриально-поточной технологии совместно с совершенствованием способа очеса растений на корню очесывающей жаткой.

Материалы и методы. В статье представлена конструкция лабораторной установки с экспериментальными рабочими органами, позволяющая моделировать процесс уборки белого люпина способом отделения семенной части растений на поле. Обоснование параметров и режимов работы очесывающей жатки с гребенками для крупносемянных культур выполнено эмпирическим методом посредством использования теории многофакторного эксперимента. Представлен алгоритм выполнения и результаты экспериментальных исследований по определению полноты сбора семян.

Результаты исследования. Приведены результаты камеральных исследований очесывающей жатки с гребенками для крупносемянных культур по определению качественных показателей полноты сбора семян белого люпина. Определено, что максимальная полнота сбора семян составляет 99,5 %.

Обсуждение и заключение. При исследовании технологического процесса уборки семян белого люпина сорта «Дега» очесывающей жаткой с гребенками для крупносемянных культур в камеральных условиях были экспериментально изучены физико-механические свойства растений, уточнены их морфологические признаки, определены режимно-технологические параметры очесывающей жатки, позволяющие обеспечить потери семян в пределах агротехнических требований (0,5 %).

Ключевые слова: белый люпин, очесывающая жатка, полнота сбора семян, качество уборки, потери

Для цитирования: Алдошин, Н. В. Результаты камеральных работ уборки белого люпина очесывающей жаткой с гребенками для крупносемянных культур / Н. В. Алдошин, М. А. Мосяков. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202003.377-393 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 3. – С. 377–393.



The Results of the Laboratory Studies of Harvesting the White Lupine by a Stripper Header with Fingers for Large Seed Crops

N. V. Aldoshin^a, M. A. Mosyakov^{b*}

^a*Russian Timiryazev State Agrarian University (Moscow, Russia)*

^b*Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russia)*

*maks.mosyakov@yandex.ru

Introduction. Agricultural machinery and devices used for harvesting white lupines do not provide a complete collection of seeds, which leads to the violation of agricultural requirements for the harvesting of leguminous crops. It is necessary to find new technological and technical solutions to reduce losses of seeds during this process. The most perspective solution to the problem of white lupine harvesting is the application of industrial flow line technology together with the improvement of the method to comb standing plants by a stripper header.

Materials and Methods. The article presents the design of a laboratory setup with experimental working bodies, which allows simulating the process of harvesting white lupines by separating the seed part of plants in the field. The empirical method based on the theory of multi-factor experiment was used to substantiate the parameters and operating modes of the stripper header with fingers for large seed crops. The algorithm and results of experimental studies to determine the completeness of seed collection are presented.

Results. The results of the laboratory studies of the stripper header with fingers for large-seeded crops to determine the qualitative indicators for the completeness of the collection of white lupine seeds are presented. It is determined that the maximum completeness of seed collection is 99.5%.

Discussion and Conclusion. In studying the technological process of harvesting white De-gas lupine seeds by a combing header with fingers for large-seeded crops under laboratory conditions, the physical and mechanical properties of plants were experimentally studied, their morphological characteristics were clarified, and the regimen-technological parameters of the harvesting header were determined to ensure seed loss within agrotechnical requirements (0.5%).

Keywords: white lupine, stripping header, completeness of seed collection, quality of harvesting, loss

For citation: Aldoshin N.V., Mosyakov M.A. The Results of the Laboratory Studies of Harvesting the White Lupine by a Stripper Header with Fingers for Large Seed Crops. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(3):377-393. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.377-393>

Введение

Современные комплексы машин, применяемые на уборке белого люпина, не в полной мере соответствуют требованиям, предъявляемым товаропроизводителями к сельскохозяйственной продукции. С целью обеспечения качественных показателей работы машинно-технологических комплексов и адаптеров для уборки сельскохозяйственных культур необходима разработка с дальнейшим внедрением передовых технологий, способов и тех-

нических решений в технологический процесс уборки сельскохозяйственных культур [1; 2].

Индустриально-поточная технология позволяет с помощью навешиваемого адаптера машинно-технологического комплекса производить сбор массы, качественный состав которой представлен не более 20 % необмолоченных семян.

Данный способ позволяет уменьшить энергоемкость проведения уборочных работ, что обусловлено сниже-

нием поступления обрабатываемого вороха на технологические модули очистки зерноуборочного комбайна, следовательно, способствует снижению времени проведения уборочных работ, амортизации машинно-технологических комплексов и приводит к снижению себестоимости товарной продукции зернобобовых культур [3–5].

Результаты аналитических и эмпирических исследований А. И. Бурьянова, М. А. Бурьянова, Э. В. Жалнина, О. В. Моисеенко, Р. А. Ростовцева, Е. И. Трубилина, П. И. Чуксина, П. А. Шабанова и других позволили выявить зависимость потерь и повреждений семян убираемых культур от параметров конструкции рабочих органов на очесывающем роторе [6; 7]. При этом эффективность работы устройства будет зависеть от типа и конструкции рабочих органов их технических характеристик.

Коллективом научно-технических и инженерных работников научно-исследовательских, проектных, образовательных учреждений, а также представителями производственных объединений, занимающихся проблемами уборки зернобобовых культур, разработаны научно-методические рекомендации, технологические принципы и технические решения повышения качества уборки с учетом биологических особенностей исследуемой сельскохозяйственной культуры [8; 9].

Целью проведения исследований является повышение полноты сбора семян белого люпина методом очеса растений на корню использованием машинно-технологического комплекса,

оснащенного теоретически обоснованным адаптером с гребенками для крупносемянных культур.

Обзор литературы

Патентный анализ конструкций существующих рабочих органов адаптеров для очеса растений на корню, применяемых в индустриально-поточной технологии производства сельскохозяйственных культур, позволяет определить ряд недостатков, которые не позволяют в полной мере обеспечить показатели качества уборки белого люпина.

Известна съёмная гребенка барабана очесывающего оборудования (патент на изобретение № 2442313), устанавливаемая на серийных очесывающих жатках фирмы ПАО «Пензмаш» (рис. 1) [10].

Рабочий орган представляет собой сегментарно расположенные пластины, профиль поперечного сечения которых представляет собой постоянство радиуса кривизны в каждой точке касательной.

Конструкция применяемых гребенок имеет недостаток, заключающийся в расположении ребер жесткости, которые непосредственно взаимодействуют с растением и тем самым травмируют семенной материал. В процессе работы стебли растений заклинивает между зубьями рабочих органов, что приводит к извлечению культурного растения из почвы без сохранения систем жизнеобеспечения в плодородном слое.

На очесывающих жатках ЖО-7 «ОЗОН» устанавливаются рабочие органы (рис 2), патент на изобретение № 2646054 [11].

Конструкция продольной плоскости



Р и с. 1. Рабочий орган очесывающей жатки «ОЗОН»
F i g. 1. Working body of the OZON stripping header



Р и с. 2. Рабочий орган – съемная гребенка очесывающего оборудования
F i g. 2. The working body is removable stripping fingers

профиля зуба гребенки представляет собой сужающуюся от вершины к середине зуба по его длине прорезь, продолжающуюся каналом, выполненным по тангенциальному закону.

Недостатком рассмотренной конструкции гребенки является прорезь, выполненная по тангенциальному закону. Из-за сложного движения стебля очесываемого растения по прорези происходит срез стручка у основания о кромки. Так в молотильно-сепарирующее устройство (МСУ) комбайна поступает масса, которую необходимо обмолачивать.

Известна очесывающая гребенка, устанавливаемая на серийной модели жатки Shelbourne Reynolds Engineering (рис. 3), у которой между рабочими поверхностями очесывающих элементов образованы технологические эллипсовидные отверстия, что способствует свободному протаскиванию очесываемого продукта и его стебля [12].

В представленной конструкции рабочего органа имеется серьезный

недостаток, обусловленный конструктивными параметрами эллипсовидных отверстий, превышающих минимальный диаметр поперечного сечения семенной коробки культурного растения, следовательно, данное обстоятельство не позволяет обеспечить сцепление семенной коробки с рабочим органом, что приводит к повышенным потерям товарной продукции. Кроме того, выделение семенного материала в данном случае обуславливается динамическим воздействием рабочего органа на него, что приводит к травмированию и повреждениям семян.

Гребенки, применяемые на серийных очесывающих устройствах «Сибирь» (рис. 4), защищены патентом № 2439871 [13]. Технологический параметр между смежными рабочими элементами, на кромке которых выполнены углубления, позволяющие увеличить площадь контакта семенного материала, имеет увеличенный размер, что определяет повышенные потери семян в виде неполного очеса убираемой культуры в результате распределения



Р и с. 3. Рабочий орган очесывающего устройства Shelbourne Reynolds Engineering
F i g. 3. The working body of the Shelbourne Reynolds Engineering stripping device



Р и с. 4. Рабочий орган очесывающей жатки «Сибирь»

F i g. 4. The working body of the Siberia stripper header

стеблей и остатков семенной коробки культурного растения между рабочими элементами.

Очесывающая жатка «Славянка» содержит рабочие органы (рис. 5), выполняющие дополнительную функциональную потребность машинно-технологического комплекса при уборке полеглих хлебов, например подъем стеблестоя при выполнении очеса растений.

Конструкция очесывающих гребенок имеет недостаток: ребра жесткости находятся на рабочей поверхности зуба и при непосредственном взаимодействии с растением происходит травмирование и дробление семенного материала, кроме того, при продолжительной работе будет возникать забивание межзубового пространства стеблевой массой, тем самым увеличивая потери семян.

Проведенный анализ конструкций рабочих органов очесывающих устройств в России позволяет сделать вывод о том, что гребенки различных производителей жаток, выпускаемых серийно, не способны обеспечить полноту сбора семян белого люпина.

Материалы и методы

Исследования проводились в соответствии с методиками ГОСТа 20915-2011 и ГОСТа 28301-2015¹.

На базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» разработана и запатентована гребенка для крупносемянных культур, изображенная на рисунке 6 [15].

Параметры конструкции рабочего органа теоретически были определены: наклон зубьев гребенки относительно горизонтальной поверхности



Р и с. 5. Рабочий орган очесывающего устройства «Славянка»

F i g. 5. The working body of the Slavyanka stripper header

¹ ГОСТ 20915-2011. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний; ГОСТ 28301-2015. Комбайны зерноуборочные. Методы испытаний.



Р и с. 6. Гребенка для крупносемянных культур:
1 – изогнутая пластина; 2 – рабочая поверхность; 3 – зуб

F i g. 6. Fingers for large seed crops: 1 – curved plate; 2 – working surface; 3 – finger

$\eta = 24^\circ$, длина зуба $l_3 = 0,072$ м, ширина зуба $b_3 = 0,021$ м и межзубовое расстояние $0,032$ м.

Для определения качественных показателей полноты сбора семян белого люпина очесывающей жаткой с гребенками для крупносемянных культур разработан лабораторный стенд, натурное изображение которого отражено на рисунке 7, а основные технические параметры представлены в таблице 1 [16; 17].

При проведении камеральных работ обрабатываемый материал 11 устанавливался в фиксаторе стеблестоя 10, закрепленном на подающем конвейере 7.

Движение конвейера 7 осуществлялось при помощи мотор-редуктора. Поступательная скорость движения транспортера 7 изменялась посредством варьирования частоты колебаний постоянного тока использованием преобразователя частоты 9, позволяющего изменять частоту вращения ведущего

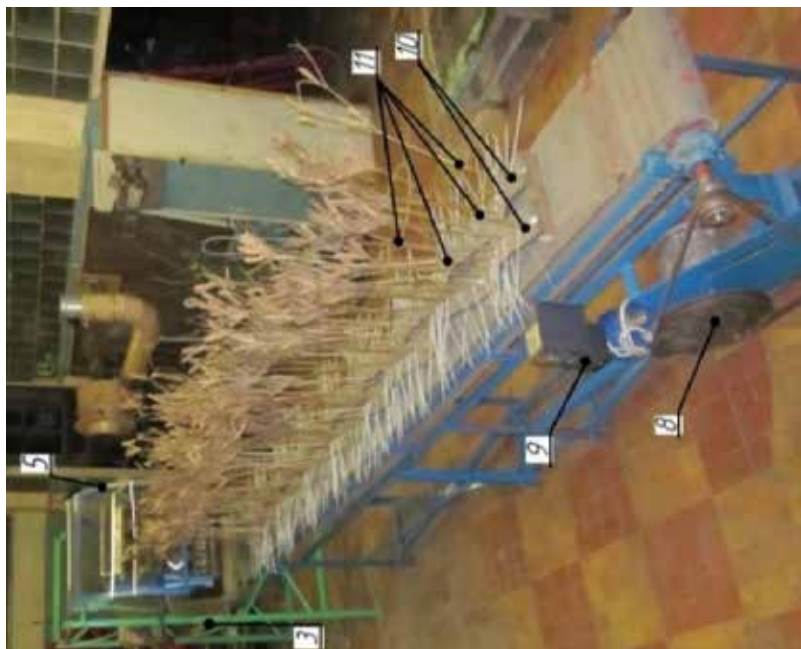
Т а б л и ц а 1

Table 1

Технические параметры лабораторной установки

Technical parameters of the laboratory installation

Внешний радиус очесывающего ротора R , м / External radius of the stripping rotor R , m	0,37
Количество рядов гребенок z , шт / Number of the rows of the fingers z , pc	8
Регулирование угла установки рабочих органов ε , град / Regulation of the angle of installation of the working devices ε , gon	0...180
Частота вращения очесывающего ротора n , об/мин / The frequency of rotation of the stripping rotor n , r/min	0...590
Регулировка высоты очесывающего ротора H_p , м / Height adjustment of stripping rotor H_p , m	0,8...1,8
Регулировка установки угла обтекателя $\alpha_{об}$, град / Adjusting the setting of the angle of the fairing $\alpha_{об}$, gon	0...45
Длина транспортера-питателя («бегущее поле») L_T , м / Conveyor-feeder length ("running field") L_T , m	4,0
Скорость поступательного движения «бегущего поля» V_T , м/с / The speed of the forward movement of the "running field" V_T , m/s	0...2,5
Количество рядов очесываемых растений, шт / Number of rows of stripped plants, pc	2
Регулировка высоты «бегущего поля», м / Height adjustment of "running field", m	0...0,1



Р и с. 7. Общий вид лабораторной установки для определения качественных показателей полноты сбора семян белого люпина очесывающим адаптером с гребенками для крупносемянных культур: 1 – адаптер очесывающий; 2 – привод очесывающий; 3 – блок управления адаптером; 4 – ротор; 5 – кожух; 6 – рабочие органы; 7 – конвейер; 8 – привод конвейера; 9 – блок управления конвейером; 10 – фиксатор стеблей; 11 – стеблестой; 12 – емкость для сбора семян



Fig. 7. General view of the laboratory setup for determining the quality indicators of the completeness of the collection of white lupine seeds with a combing adapter with combs for large seed crops: 1 – combing adapter; 2 – adapter drive; 3 – adapter control unit; 4 – rotor; 5 – a case; 6 – working bodies; 7 – conveyor; 8 – conveyor drive; 9 – conveyor control unit; 10 – stem clamp; 11 – stem; 12 – capacity for collecting seeds

вала транспортера 7, что обеспечивает изменение скорости движения конвейера 7 от минимального значения (0 м/с) до предельно допустимого (2,5 м/с) с шагом варьирования 0,25 м/с. Приборная база, используемая при камеральных исследованиях, представлена в таблице 2.

Перемещение обрабатываемого материала 11 к очесывающему адаптеру 1, представляющему собой ротор 4 с установленными рабочими элементами 6, осуществляется на ленте конвейера 7 [15].

Причем для исследования угла входа очесывающих элементов 6 в стеблестой угол наклона последних варьируется перемещением относительно оси вращения ротора 4.

Для выполнения технологического процесса камеральных исследований в качестве источника энергии использовали трехфазную сеть переменного электрического тока.

Силовая установка привода включает в себя электродвигатель и преобразователь частотный 3, позволяющий изменять частоту вращения вала электродвигателя в интервале от 0 до 500 мин⁻¹, контроль исследуемого параметра электродвигателя осуществлялся лазерным частотомером Speed.

При создании воздушного потока, обусловленного вращением ротора 4, фиксировался факт витания семян, для этого использовался прибор Testo 410-1.

При перемещении транспортера 7 с закрепленным обрабатываемым материалом 11 к адаптеру 1 происходит его взаимодействие с кожухом 5 очесывающего ротора 4, что способствует перемещению в направлении, противоположном движению конвейера 7, и повышению взаимодействия очесывающих элементов 6, окружное вертикальное перемещение которых влево направо на оси ротора 4 обеспечивает захват стеблестоя и направление его в технологический зазор, образованный рабочими поверхностями смежных очесывающих элементов 6.

В дальнейшем семена, поступившие в емкость для сбора семян 12, извлекались из нее, а на электронных весах определялась их масса.

Потери семян белого люпина определяли, используя формулу:

$$\sum q = \frac{U_{\phi}}{U_6} \cdot 100, \quad (1)$$

где U_6 – биологическая урожайность, ц/га; U_{ϕ} – фактическая урожайность (емкость для сбора семян), ц/га.

При определении качественных показателей работы лабораторной установки вычислялась полнота сбора семян (2):

$$q_{\text{ж}} = \frac{q}{U_6} \cdot 100 - \sum q_e, \quad (2)$$

Таблица 2

Table 2

Приборы, используемые при проведении лабораторных исследований

Instruments used for laboratory studies

Определяемый показатель / Indicator	Наименование приборов / Name of devices	Допускаемая погрешность измерения / Permissible measurement error
Скорость воздушного потока / Air speed	Анемометр с крыльчаткой Testo 410-1 / Impeller Anemometer Testo 410-1	±0,2 м/с
Продолжительность опыта / Experience duration	Секундомер ГОСТ 5072-79 / Stopwatch GOST 5072-79	±0,2 с
Частота вращения очесывающего ротора / Stripping rotor speed	Тахометр цифровой бесконтактный Speed / Digital non-contact tachometer Speed	±0,02 %

где q – потери семян и бобов в рамке, г; U_6 – биологическая урожайность, ц/га; $\sum q_e$ – естественные суммарные потери, %. Микроповреждения семян после взаимодействия с рабочими органами определялись по общеизвестной методике.

Перед проведением камеральных работ в 2015–2017 гг. были изучены морфологические признаки растений белого люпина в ООО «Экспериментальное хозяйство по селекции и семеноводству белого люпина» (Тамбовская обл.) при влажности растений 25 %, влажности семян 20 %.

Результаты исследования

Значимость исследуемого фактора, влияющего на полноту сбора семян белого люпина, определялась проведением серии отсеивающих экспериментов по определению конструктивно-технологических параметров и режимов работы устройства, обеспечивающих высокие качественные показатели работы.

Последующие исследования проводились в соответствии с планом эксперимента:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3.$$

Исследуемые факторы и интервалы их варьирования размещались по горизонтали, показатели качества работы были нанесены по вертикальной оси диаграммы отсеивающего эксперимента.

Наибольшее влияние каждого фактора определялось выделением наиболее значимых точек на диаграмме рассеивания, что позволило определить режимные и технологические параметры очесывающего устройства: x_1 – отношение окружной скорости ротора адаптера к поступательной скорости конвейера; x_2 – расстояние от рабочего органа адаптера в нижнем положении до поверхности конвейера, м; x_3 – рас-

стояние от нижней точки кожуха в месте контакта с растением до поверхности конвейера, м (табл. 3).

Результаты проведенных поисковых исследований отражают перспективность дальнейших исследований по повышению качества полноты сбора семян белого люпина.

После обработки данных многофакторного эксперимента на персональном компьютере с программным пакетом Statistica были получены значения функций отклика (полнота сбора семян) при варьировании факторов и получена адекватная математическая модель (4) зависимости потерь убираемой культуры за адаптером от определенных ранее факторов $K = f(\lambda, h_{ж}, h_0)$ в закодированном виде:

$$Y = 0,566 + 0,012x_1 + 0,025x_2 + 0,037x_3 - 0,108x_1^2 - 0,083x_2^2 - 0,058x_3^2 - 0,025x_1x_2 - 0,001x_1x_3 + 0,075x_2x_3. \quad (4)$$

Для получения действительного значения выбранного критерия оптимизации, характеризующего качество полноты сбора семян, выполним подстановку значений исследуемых факторов при своевременном их варьировании в указанном интервале значений: $x_1, x_2, x_3 = 0$.

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = 0 : Y = 0,566 + 0,025x_2 + 0,037x_3 - 0,083x_2^2 - 0,058x_3^2 + 0,075x_2x_3, \\ x_2 = 0 : Y = 0,566 + 0,012x_1 + 0,037x_3 - 0,108x_1^2 - 0,058x_3^2 - 0,001x_1x_3, \\ x_3 = 0 : Y = 0,566 + 0,012x_1 + 0,025x_2 - 0,108x_1^2 - 0,083x_2^2 - 0,025x_1x_2. \end{array} \right. \quad (5)$$

Т а б л и ц а 3

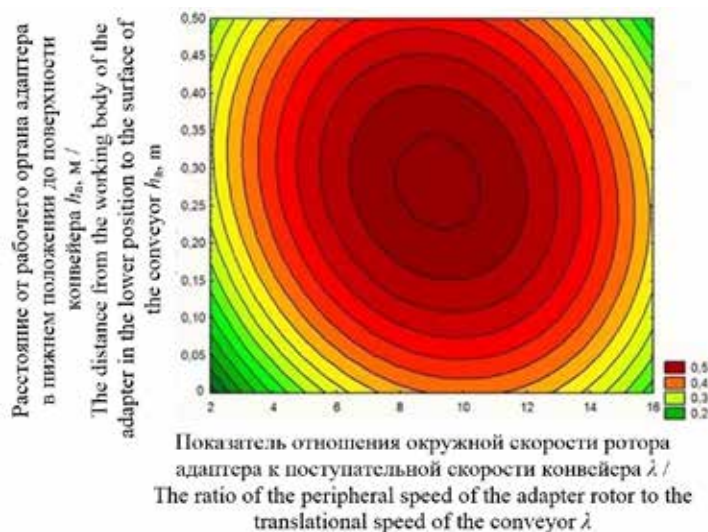
Table 3

Матрица плана и уровня варьирования факторов
Plan matrix and level of variation of factors

Обозначение / Designation	Факторы / Factors		
	Показатель отношения окружной скорости ротора адаптера к поступательной скорости конвейера λ / The ratio of the peripheral speed of the adapter rotor to the translational speed of the conveyor λ	Расстояние от рабочего органа адаптера в нижнем положении до поверхности конвейера h_a , м / The distance from the working body of the adapter in the lower position to the surface of the conveyor h_a , m	Расстояние от нижней точки кожуха в месте контакта с растением до поверхности конвейера h_0 , м / The distance from the lower point of the casing at the place of contact with the plant to the surface of the conveyor h_0 , m
	x_1	x_2	x_3
1	14	0,50	0,65
2	5	0,10	0,65
3	14	0,10	0,65
4	5	0,50	0,65
5	14	0,30	0,80
6	5	0,30	0,50
7	14	0,30	0,50
8	5	0,30	0,80
9	9	0,50	0,80
10	9	0,10	0,50
11	9	0,50	0,50
12	9	0,10	0,80
13	9	0,30	0,65
14	9	0,30	0,65
15	9	0,30	0,65

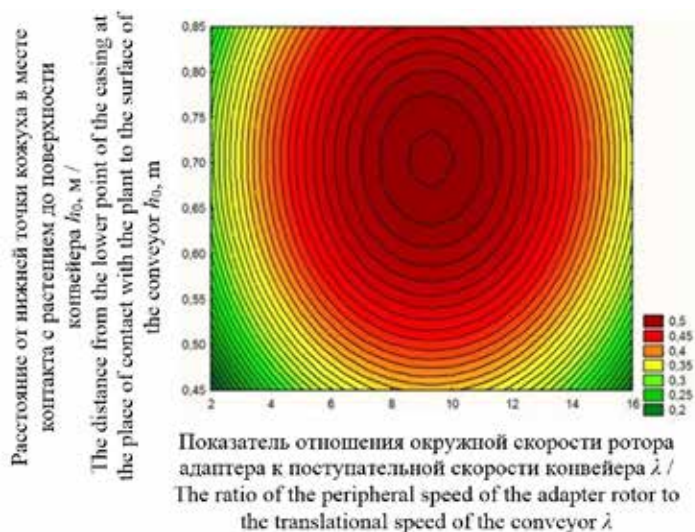
Решение системы дифференциальных уравнений (5) позволило определить оптимальное сочетание исследуемых параметров очесывающего устройства (табл. 4). На ос-

новании проведенных вычислений построены графические зависимости (рис. 8–10) влияния исследуемых параметров на выбранный критерий оптимизации.



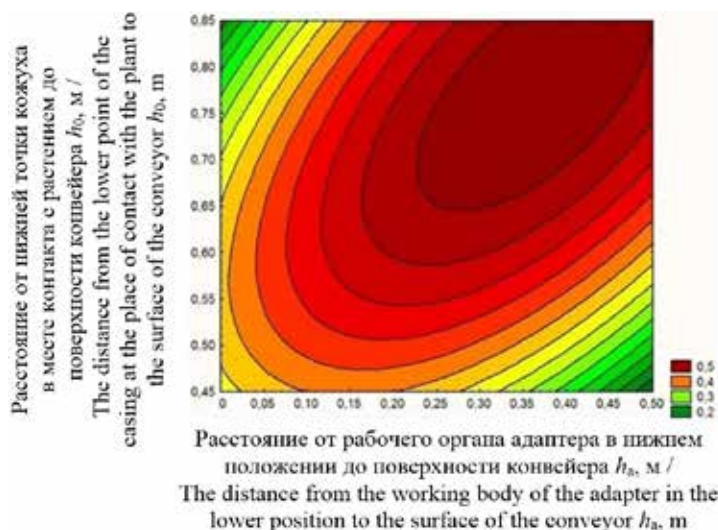
Р и с. 8. Двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость полноты сбора семян белого люпина от отношения окружной скорости ротора адаптера к поступательной скорости конвейера λ и расстояния от рабочего органа адаптера в нижнем положении до поверхности конвейера h_0 , м

F i g. 8. Two-dimensional cross-section of the response surface characterizing the dependence of the completeness of the collection of white lupine seeds on the ratio of the peripheral speed of the adapter rotor to the translational speed of the conveyor λ and the distance from the working body of the adapter in the lower position to the surface of the conveyor h_0 , m



Р и с. 9. Двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость полноты сбора семян белого люпина от отношения окружной скорости ротора адаптера к поступательной скорости конвейера λ и расстояния от нижней точки кожуха в месте контакта с растением до поверхности конвейера h_0 , м

F i g. 9. Two-dimensional cross-section of the response surface, characterizing the dependence of the completeness of collection of white lupine seeds on the ratio of the peripheral speed of the adapter rotor to the translational speed of the conveyor λ and the distance from the lower point of the casing at the point of contact with the plant to the conveyor surface h_0 , m



Р и с. 10. Двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость полноты сбора семян белого люпина от расстояния от рабочего органа адаптера в нижнем положении до поверхности конвейера h_a , м, и расстояния от нижней точки кожуха в месте контакта с растением до поверхности конвейера h_0 , м

F i g. 10. Two-dimensional cross-section of the response surface characterizing the dependence of the completeness of the collection of white lupine seeds on the distance from the working body of the adapter in the lower position to the conveyor surface h_a , m, and the distance from the lower point of the casing at the point of contact with the plant to the conveyor surface h_0 , m

Т а б л и ц а 4

T a b l e 4

Координаты центра поверхности отклика
Center coordinates of the response surface

Координаты исследуемых факторов / The coordinates of the studied factors		Критерий оптимизации двумерных сечений / Optimization criterion for two-dimensional sections
Закодированный вид / Encoded view	Раскодированный вид / Decoded view	
$x_2 = 0,414$	$h_{ж} = 0,282$ м	$Y_s = 0,582$
$x_3 = 0,582$	$h_0 = 0,721$ м	
$x_1 = 0,054$	$\lambda = 8,429$ м	$Y_s = 0,572$
$x_3 = 0,336$	$0 = 0,705$ м	
$x_1 = 0,038$	$\lambda = 9,324$ м	$Y_s = 0,568$
$x_2 = 0,151$	$h_{ж} = 0,327$ м	

Уравнение (5) с учетом значимости коэффициентов можно представить в следующем виде:

$$Y = 2,777 + 0,192 \cdot \lambda - 2,308 \cdot h_{ж} - 9,173 \cdot h_0 - 0,007 \cdot \lambda^2 + 3,333 \cdot h_{ж}^2 + 7,037 \cdot h_0^2 + 0,025 \cdot \lambda \cdot h_{ж} - 0,066 \cdot \lambda \cdot h_0 + 0,833 \cdot h_{ж} \cdot h_0. \quad (6)$$

Коэффициент корреляции результатов камеральных работ с результатами полевых испытаний составляет 0,95 (табл. 5).

Результаты исследований и конструкторская документация на рабочие органы были переданы на завод ПАО «Пензмаш», производственное объединение «Энергоспецтехника»

Процессы и машины агроинженерных систем

Интервалы варьирования факторов при лабораторных исследованиях и полевых испытаниях

Factor variation intervals in laboratory studies and field trials

Показатель / Indicator	Теоретическое значение / Theoretical value	Экспериментальное значение / Experimental value	Принятое значение / Accepted value
Показатель отношения окружной скорости ротора адаптера к поступательной скорости конвейера λ / The ratio of the peripheral speed of the adapter rotor to the translational speed of the conveyor λ	8...10	4...14	8...10
Расстояние от рабочего органа адаптера в нижнем положении до поверхности конвейера h_{a2} , м / The distance from the working body of the adapter in the lower position to the surface of the conveyor h_{a2} , m	0,25...0,33	0,1...0,5	0,28...0,33
Расстояние от нижней точки кожуха в месте контакта с растением до поверхности конвейера h_0 , м / The distance from the lower point of the casing at the place of contact with the plant to the surface of the conveyor h_0 , m	0,70...0,75	0,5...0,8	0,70...0,75

и в хозяйства «ООО Красная Горка», ООО «ЭХССБЛ», что подтверждено актами внедрения.

Обсуждение и заключение

Уточнены морфологические признаки растений белого люпина сорта «Дега»: высота отобранных образцов 760,0...1050,0 мм, диаметр стеблестоя 5,50...10,50 мм, масса навески тысячи семян 350,0...410,0 г; параметры семян из выборки: длина 8,3...12,0 мм, ширина семян 7,2...11,1 мм, толщина семян 3,2...5,7 мм; параметры бобов из выборки: длина 63,0...77,3 мм, ширина бобов 9,4...14,2 мм, толщина бобов 6,6...9,8 мм; количество растений на м² 110...152 шт.

Экспериментально исследованы физико-механические свойства: предел прочности стеблестоя 0,87...1,15 кг/мм², среднее значение коэффициента трения

семян, стеблей о рабочие органы 0,44 и 0,36. Прочность при динамических нагрузках бобов со стеблем изменяется в пределах 3...25 Н. Скорость витания семян отобранных образцов влажностью 20,6 % составила 13,8 м/с.

Камеральные работы по уборке белого люпина очесывающей жаткой с гребенками для крупносемянных культур позволяют сделать выводы о том, что максимальная полнота сбора семян составляет 99,5 % при отношении окружной скорости ротора адаптера к поступательной скорости конвейера $\lambda = 8...10$; расстояние от рабочего органа адаптера в нижнем положении до поверхности конвейера $h_{ж} = 0,28...0,33$ м и расстояние от нижней точки кожуха в месте контакта с растением до поверхности конвейера $h_0 = 0,70...0,75$ м.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Zhao, Z.** Grain Separation Loss Monitoring System in Combine Harvester / Z. Zhao, Y. Li, J. Chen [et al.] – DOI 10.1016/j.compag.2011.01.016 // Computers and Electronics in Agriculture. – 2011. – Vol. 76, Issue 2. – Pp. 183–184. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169911000354?via%3Dihub> (дата обращения: 30.07.2020).
2. **Chegini, G.** Experimental Comparison of Combine Performance with Two Harvesting Methods: Stripper Header and Conventional Header / G. Chegini, S. V. Mirnezami // Agricultural Engineering International: GIGR E-journal. – 2016. – Vol. 18, Issue 1. – Pp. 192–200. – URL: https://www.researchgate.net/publication/305374833_Experimental_comparison_of_combine_performance_with_two_harvesting_methods_Stripper_header_and_conventional_header (дата обращения: 30.07.2020).
3. **Straksas, A.** Development of a Stripper-Header for Grain Harvesting / A. Straksas // Agronomy Research. – 2006. – Vol. 4, Issue 1. – Pp. 79–89. – URL: <http://agronomy.emu.ee/vol041/p4108.pdf> (дата обращения: 30.07.2020).
4. **Adisa, A. F.** Determination of Optimum Operational Conditions of a Grain Stripper Header for Rice Harvesting in Nigeria / A. F. Adisa, V. I. O. Ndirika, Y. D. Yiljep [et al.] // International Journal of Engineering and Technology. – 2012. – Vol. 2, Issue 7. – Pp. 1290–1300. – URL: <https://unaab.edu.ng/determination-of-optimum-operational-conditions-of-a-grain-stripper-for-rice-harvesting-in-nigeria/> (дата обращения: 30.07.2020).
5. **Галкин, А. В.** Исследование качественных характеристик льноволокна в зависимости от конструкции очесывающего аппарата / А. В. Галкин, Д. Г. Фадеев, И. В. Ушаповский. – DOI 10.15507/0236-2910.028.201803.389-399 // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 3. – С. 389–399. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/62-18-3/429-10-15507-0236-2910-028-201803-8> (дата обращения: 30.07.2020). – Рез. англ.
6. **Aldoshin, N.** Harvesting of Leguminous Crops by the Method of Stripping / N. Aldoshin, N. Lylin, M. Mosyakov // Far Eastern Agrarian Bulletin. – 2017. – Vol. 1. – Pp. 67–73.
7. **Алдошин, Н. В.** Совершенствование конструкции очесывающих устройств для уборки зернобобовых культур / Н. В. Алдошин, М. А. Мосяков. – DOI 10.26897/1728-7936-2018-2-23-27 // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2018. – № 2 (84). – С. 23–27. – URL: <http://elbib.timacad.ru/dl/full/vmgau-04-2018-02.pdf/view> (дата обращения: 30.07.2020). – Рез. англ.
8. **Yuan, J.** Development of a Cereal Stripping Harvester / J. Yuan, Y. Lan // Agricultural Engineering International: the CIGR E-journal. – 2007. – Vol. 9. – 12 p. – URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.504.7187&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения: 30.07.2020).
9. **Ince, A.** Comparing of Different Harvesting Systems in Wheat Harvesting / A. Ince, S. M. Say, O. Kara [et al.] // Tarim Makinalari Bilimi Dergisi (Journal of Agricultural Machinery Science). – 2011. – Vol. 7, Issue 1. – Pp. 89–93. – URL: http://dergipark.org.tr/en/pub/tarmak/issue/11539/137456#article_cite (дата обращения: 30.07.2020).
10. **Патент № 2442313 Российская Федерация, МПК A01D 41/08 (2006.01).** Съёмная гребенка барабана очесывающего оборудования : № 2009149613/13 : заявл. 30.12.2009 : опубл. 10.07.2011 / Бурьянов М. А., Колесников Г. Е., Пахомов В. И. [и др.] ; патентообладатель Государственное научное учреждение «Северо-Кавказский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства» Российской академии сельскохозяйственных наук (ГНУ СКНИИ-МЭСХ Россельхозакадемии). – 7 с. : ил. – URL: <http://www.freepatent.ru/images/patents/16/2442313/patent-2442313.pdf> (дата обращения: 30.07.2020).
11. **Патент № 2646054 Российская Федерация, МПК A 01D 41/08 (2006.01).** Съёмная гребенка очесывающего оборудования : № 2017111437 : заявл. 04.04.2017 ; опубл. 01.03.2018 / Кухарев О. Н., Семов И. Н., Федин М. А. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет». – URL: <https://pgau.ru/nauka/patenty/patenty-na-izobretenie> (дата обращения: 30.07.2020).



12. **Patent No. 5519989 USA, A01D 45/00.** Crop Stripping Apparatus : No. 446547 : appl. 19.05.1995 : publ. 28.05.1996 / Shelbourne K. H., McCredie P. J. – 6 p. – URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/39/f6/28/326a2cc1e30753/US5519989.pdf> (дата обращения: 30.07.2020).

13. **Milyutkin, V. A.** Developing Universal Hardware for Harvesting Crops / V. A. Milyutkin, I. V. Borodulin, Z. P. Antonova // Eastern European Scientific Journal. – 2014. – № 3 (52). – С. 259–267. – URL: <http://journale.auris-verlag.de/index.php/EESJ/article/view/159> (дата обращения: 30.07.2020).

14. **Патент № 2439871 Российская Федерация, МПК A01D 41/08 (2006.01) A01D 45/00(2006.01).** Гребенка очесывающего устройства : № 2010129501/13 : заявл. 15.07.2010 : опубл. 20.01.2012 / Колинко В. П., Озонов Г. Р., Сабашкин В. А. ; заявитель ОАО «САД». – URL: https://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2439871&TypeFile=html (дата обращения: 30.07.2020).

15. **Патент № 172995 Российская Федерация, МПК A01D 41/08(2006.01).** Очесывающее устройство для крупносемянных культур : № 2017116419 : заявл. 11.05.2017 : опубл. 03.08.2017 / Алдошин Н. В., Золотов А. А., Лылин Н. А. [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО «РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева». – URL: https://patents.s3.yandex.net/RU172995U1_20170803.pdf (дата обращения: 30.07.2020).

16. **Masebu, H. P.** Design, Fabrication and Operation of a Static Laboratory Grain Stripping Rig for the Study of Stripping of Sorghum Panicles by Various Stripping Tools / H. P. Masebu, D. R. White, L. Chico-Santamarta // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 2, Issue 12. – Pp. 7613–7619. – URL: http://www.ijirset.com/upload/2013/december/64_DESIGN.pdf (дата обращения: 30.07.2020).

17. **Goli, A.** The Study of the Effect of the Rotational Speed and the Horizontal Distance Fingertips to Nose on the Head Losses of Wheat Stripping / A. Goli, A. Khojamli, J. Khazaei [et al.] // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – 2017. – Vol. 6, Issue 5. – Pp. 1–11. – URL: <http://www.ijirset.com/open-access/the-study-of-the-effect-of-the-rotational-speed-and-the-horizontal-distance-fingertips-to-nose-on-the-head-losses-of-wheat-strippi-.pdf> (дата обращения: 30.07.2020).

18. **Алдошин, Н. В.** Результаты лабораторно-полевых исследований очеса белого люпина / Н. В. Алдошин, М. А. Мосяков // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2018. – № 3 (85). – С. 25–30. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-laboratorno-polevyh-issledovaniy-ochesa-belogo-lyupina> (дата обращения: 30.07.2020). – Рез. англ.

Поступила 11.11.2019; принята к публикации 20.01.2020; опубликована онлайн 30.09.2020

Об авторах:

Алдошин Николай Васильевич, заведующий кафедрой сельскохозяйственных машин ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: F-7131-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>, sxm.msau@yandex.ru

Мосяков Максим Александрович, старший научный сотрудник лаборатории машинных технологий возделывания и уборки овощных культур в открытом грунте ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), Researcher ID: A-8482-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5151-7312>, maks.mosyakov@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

Н. В. Алдошин – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, подготовка начального варианта текста и формирование выводов; М. А. Мосяков – проведение критического анализа экспериментальных исследований, литературный и патентный анализ, редактирование текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Zhao Z., Li Y., Chen J., et al. Grain Separation Loss Monitoring System in Combine Harvester. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2011; 76(2):183-184. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.016>
2. Chegini G., Mirnezami S.V. Experimental Comparison of Combine Performance with Two Harvesting Methods: Stripper Header and Conventional Header. *Agricultural Engineering International: GIGR E-journal*. 2016; 18(1):192-200. Available at: https://www.researchgate.net/publication/305374833_Experimental_comparison_of_combine_performance_with_two_harvesting_methods_Stripper_header_and_conventional_header (accessed 30.07.2020). (In Eng.)
3. Straksas A. Development of a Stripper-Header for Grain Harvesting. *Agronomy Research*. 2006; 4(1):79-89. Available at: <http://agronomy.emu.ee/vol041/p4108.pdf> (accessed 30.07.2020). (In Eng.)
4. Adisa A.F., Ndirika V.I.O., Yiljep Y.D., et al. Determination of Optimum Operational Conditions of a Grain Stripper Header for Rice Harvesting in Nigeria. *International Journal of Engineering and Technology*. 2012; 2(7):1290-1300. Available at: <https://unaab.edu.ng/determination-of-optimum-operational-conditions-of-a-grain-stripper-for-rice-harvesting-in-nigeria/> (accessed 30.07.2020). (In Eng.)
5. Galkin A.V., Fadeev D.G., Uschapovsky I.V. Studying Quality Characteristics of Flax Fiber Depending on Deseeding Device Design. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):389-399. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.389-399>
6. Aldoshin N., Lylin N., Mosyakov M. Harvesting of Leguminous Crops by the Method of Stripping. *Far Eastern Agrarian Bulletin*. 2017; 1:67-73. (In Eng.)
7. Aldoshin N.V., Mosyakov M.A. Design Improvement of a Stripping Device for Harvesting Leguminous Crops. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina"* = Bulletin of the Goryachkin Moscow State Agroengineering University. 2018; (2):23-27. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-23-27>
8. Yuan J., Lan Y. Development of a Cereal Stripping Harvester. *Agricultural Engineering International: the CIGR E-journal*. 2007; 9.12 p. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.504.7187&rep=rep1&type=pdf> (accessed 30.07.2020). (In Eng.)
9. Ince A., Say S.M., Kara O., et al. Comparing of Different Harvesting Systems in Wheat Harvesting. *Tarim Makinalari Bilimi Dergisi (Journal of Agricultural Machinery Science)*. 2011; 7(1):89-93. Available at: http://dergipark.org.tr/en/pub/tarmak/issue/11539/137456#article_cite (accessed 30.07.2020). (In Eng.)
10. Removable Fingers of Stripping Cylinder: Patent 2442313 Russian Federation. No. 2009149613/13; appl. 30.12.2009; publ. 10.07.2011. Bulletin No. 5. 7 p. Available at: <http://www.freepatent.ru/images/patents/16/2442313/patent-2442313.pdf> (accessed 30.07.2020). (In Russ.)
11. Removable Fingers of the Stripping Equipment: Patent 2646054 Russian Federation. No. 2017111437; appl.04.04.2017; publ. 01.03.2018. Available at: <https://pgau.ru/nauka/patenty/patenty-na-izobretenie> (дата обращения: 30.07.2020). (In Russ.)
12. Crop Stripping Apparatus: Patent 5519989 USA. No. 446547; appl. 19.05.1995; publ. 28.05.1996. 6 p. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/39/f6/28/326a2cc1e30753/US5519989.pdf> (accessed 30.07.2020). (In Eng.)
13. Milyutkin V.A., Borodulin I.V., Antonova Z.P. Developing Universal Hardware for Harvesting Crops. *Eastern European Scientific Journal*. 2014; (3):259-267. Available at: <http://journale.auris-verlag.de/index.php/EESJ/article/view/159> (accessed 30.07.2020). (In Eng.)
14. Comb of Stripping Device: Patent 2439871 Russian Federation. No. 2010129501/13; appl. 15.07.2010; publ. 20.01.2012. Bulletin No. 2. Available at: https://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2439871&TypeFile=html (accessed 30.07.2020). (In Russ.)
15. Stripping Device for Large Seed Crops: Patent 172995 Russian Federation. No. 2017116419; appl. 11.05.2017; publ. 03.08.2017. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU172995U1_20170803.pdf (accessed 30.07.2020). (In Russ.)



16. Masebu H.P., White D.R., Chico-Santamarta L. Design, Fabrication and Operation of a Static Laboratory Grain Stripping Rig for the Study of Stripping of Sorghum Panicles by Various Stripping Tools. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2013; 2(12):7613-7619. Available at: http://www.ijirset.com/upload/2013/december/64_DESIGN.pdf (accessed 30.07.2020). (In Eng.)
17. Goli A., Khojamli A., Khazaei J., et al. The Study of the Effect of the Rotational Speed and the Horizontal Distance Fingertips to Nose on the Head Losses of Wheat Stripping. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2017; 6(5):1-11. Available at: <http://www.rioi.com/open-access/the-study-of-the-effect-of-the-rotational-speed-and-the-horizontal-distance-fingertips-to-nose-on-the-head-losses-of-wheat-strippi-.pdf> (accessed 30.07.2020). (In Eng.)
18. Aldoshin N.V., Mosyakov M.A. Results of Laboratory-Field Research of White Lupine Stripping. *Vestnik Federalnogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina"* = Bulletin of the Goryachkin Moscow State Agroengineering University. 2018; (3):25-30. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-laboratorno-polevyh-issledovaniy-ochesa-belogo-lyupina> (accessed 30.07.2020). (In Russ.)

Received 11.11.2019; revised 20.01.2020; published online 30.09.2020

About the authors:

Nikolay V. Aldoshin, Head of Agriculture Machinery Chair, Russian Timiryazev State Agrarian University (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: F-7131-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>, cxm.msau@yandex.ru

Maxim A. Mosyakov, Senior Researcher of the Laboratory of Machine Technology for Cultivation and Harvesting of Vegetable Crops in the Open Field, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Researcher ID: A-8482-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5151-7312>, maks.mosyakov@yandex.ru

Contribution of the authors:

N. V. Aldoshin – scientific guidance, formulation of the basic concept of the study, preparation of the initial version of the text and drawing conclusions; M. A. Mosyakov – conducting critical analysis of experimental research, literary and patent analysis, text editing.

All authors have read and approved the final manuscript.



Концептуальная модель энергетической эффективности получения экологически безопасного утилизационного свиного бесподстильного навоза

Н. В. Бышов¹, И. А. Успенский^{1*}, И. А. Юхин¹,
М. Н. Чаткин², Н. В. Лимаренко³

¹ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева» (г. Рязань, Россия)

²ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)

³ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Россия)

*ivan.uspenskiy@yandex.ru

Введение. Рост производственных мощностей животноводческих предприятий приводит к увеличению экологической нагрузки на био- и агроценозы, создаваемой потенциальными энергоносителями, одним из которых является свиной бесподстильный навоз. Параметрами, характеризующими энергетическую ценность, являются: общее содержание азота и его различных форм $3...8 \text{ кг/м}^3$, оксида фосфора $3...6 \text{ кг/м}^3$, оксида калия $2...4 \text{ кг/м}^3$ (химическое потребление кислорода к массе органического вещества – 1,2, биохимическое – 0,42). Параллельно с этим экологическую нагрузку составляют группы кишечных палочек, стафилококков, энтерококков, аэробных спорообразующих микроорганизмов, различных форм яиц, цист простейших и ооцист эймерий. Кроме этого, физико-реологические свойства бесподстильного навоза могут оказывать существенное влияние на энергетическую эффективность и направление дальнейшей его утилизации. Наиболее рациональным вариантом его утилизации с агрохимической точки зрения является фракционное использование в виде органического удобрения, что возможно только при условии санитарно-эпидемиологической безопасности, обеспечение которой является энергоёмким процессом, зависящим от различных факторов. Целью настоящего исследования является разработка концептуальной модели энергетической эффективности операционных воздействий при получении экологически безопасного утилизационного цикла свиного бесподстильного навоза.

Материалы и методы. Объектом исследования являются операционные воздействия при получении экологически безопасного утилизационного цикла свиного бесподстильного навоза; предметом – функция максимизации энергетической эффективности данного объекта в условиях санитарно-эпидемиологических и агрохимических ограничений. Проведен анализ факторов и их категоризация в зависимости от типа функционального воздействия. Использован инструментарий теории потенциальной эффективности, применение которой подразумевает формализацию цели, в данном случае – повышение энергетической эффективности за счет многопараметрического целеполагания, обеспечивающего требуемый условиями результат. **Результаты исследования.** Разработана концептуальная модель операционных воздействий при получении экологически безопасного утилизационного свиного бесподстильного навоза, определяющая составляющие удельных энергозатрат, факто-

© Бышов Н. В., Успенский И. А., Юхин И. А., Чаткин М. Н., Лимаренко Н. В., 2020



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

ры, влияющие на них, и предъявляемые к ним ограничения. Модель представляет собой исходные данные для проведения факторного анализа и получения статистических моделей.

Обсуждение и заключение. Практическая значимость работы обусловлена выявлением и категоризацией факторов в зависимости от типа функционального воздействия на операции подготовительного цикла свиного бесподстильного навоза перед его утилизацией. Благодаря этому можно получить исходные данные для формирования частных методик исследования и создания статистических моделей.

Ключевые слова: утилизационный цикл, экологическая безопасность, свиной бесподстильный навоз, подготовка навоза к внесению, энергетическая эффективность, фракционное разделение, обеззараживание жидкой фракции, обезвреживание твердой фракции

Для цитирования: Бышов, Н. В. Концептуальная модель энергетической эффективности получения экологически безопасного утилизационного свиного бесподстильного навоза / Н. В. Бышов, И. А. Успенский, И. А. Юхин [и др.]. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202003.394-412 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 3. – С. 394–412.

Conceptual Model of Energy Efficiency for Environmentally Safe Utilization of Liquid Pig Manure

N. V. Byshov^a, I. A. Uspenskiy^{a*}, I. A. Yukhin^a,
M. N. Chatkin^b, N. V. Limarenko^c

^aRyazan State Agrotechnological University
Named after P. A. Kostychev (Ryazan, Russia)

^bNational Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

^cDon State Technical University (Rostov-on-don, Russia)

*ivan.uspenskiy@yandex.ru

Introduction. The growth of production capacity of livestock enterprises results in increased environmental pressures on bio- and agrocenoses, created by potential energy carriers, one of which is liquid pig manure. Representative parameters, which characterize the energy value, are the total content of nitrogen and its various forms $N_2 = 3...8 \text{ kg/m}^3$; phosphorus oxide $P_2O_5 = 3...6 \text{ kg/m}^3$; potassium oxide $K_2O = 2...4 \text{ kg/m}^3$; chemical oxygen consumption to the mass of organic matter 1.2, biochemical 0.42. In parallel, the groups of *Escherichia coli*, staphylococci, enterococci, aerobic spore-forming microorganisms, various forms of eggs, protozoan cysts and *Eimeria* oocysts are also the environmental burden. In addition, the physical and rheological properties of liquid manure can have a significant impact on energy efficiency and the way of its further utilization. In terms of agricultural chemistry, the most rational option for its utilization is fractional use in the form of organic fertilizer that is possible only under the conditions of sanitary and epidemiological safety, which is an energy-intensive process depending on various factors. The purpose of this study is to develop a conceptual model of the energy efficiency of operational impacts in obtaining an environmentally safe cycle of utilizing liquid pig manure.

Materials and Methods. The object of the study is the operational impacts in obtaining an environmentally safe cycle of utilizing liquid pig manure; the subject is the function of maximizing the energy efficiency of this object under the conditions of sanitary-epidemiological and agrochemical restrictions. There is conducted the analysis of factors and their categorization depending on the type of functional impact.

Results. A conceptual model of operational impacts in producing environmentally safe liquid pig manure has been developed, which determines the components of specific energy consumption, the factors affecting them, and the restrictions imposed on them. This model is the source data for the factor analysis and statistical models.

Discussion and Conclusion. The practical significance of the work is the identification and categorization of factors depending on the type of functional impact on the operations of the preparatory cycle of ecologically safe utilization of pig manure that can provide initial data for developing specific research methods and statistical models.

Keywords: utilization cycle, environmental safety, liquid pig manure, preparation of manure for application, energy efficiency, fractional separation, disinfection of the liquid fraction, dehydration of the solid fraction

For citation: Byshov N.V., Uspenskiy I.A., Yukhin I.A., et al. Conceptual Model of Energy Efficiency for Environmentally Safe Utilization of Liquid Pig Manure. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(3):394-412. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.394-412>

Введение

Согласно Доктрине продовольственной безопасности удельный объем мясомолочной продукции отечественного производства должен составлять не менее 90 %, зерна – не менее 95 %¹. Одной из отраслей, позволяющих внести существенный вклад в реализацию поставленной задачи, является животноводство, в частности свиноводство. Рост производственных мощностей, необходимый для решения поставленной задачи, требует определения оптимальных параметров операционно-технологических воздействий на всех этапах производственного процесса, при этом необходимы минимальные энергетические затраты и максимальный санитарно-эпидемиологический эффект. Установлено, что существенной составляющей индустриального свиноводства, соответствующей обозначенным критериям, является бесподстилочное содержание [1–3].

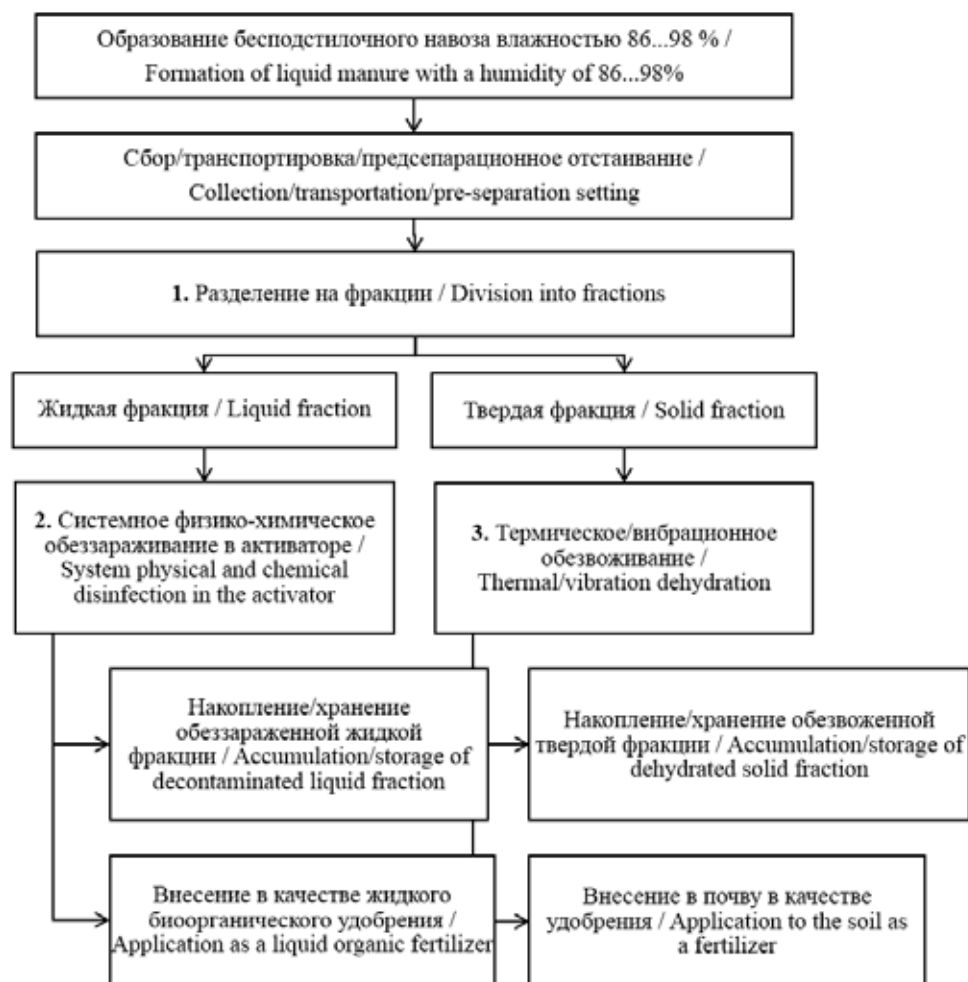
Отходы свиноводства (бесподстилочный навоз) с агрохимической точки зрения являются мощным энергоносителем (общее содержание азота $N_{\text{общ}} = 4...8 \text{ кг/м}^3$; содержание аммиачного аммонийного органического азота $NH_4 = 3...6 \text{ кг/м}^3$; содержание фосфорного ангидрида (оксида фосфора)

$P_2O_5 = 3...6 \text{ кг/м}^3$; содержание оксида калия $K_2O = 2...4 \text{ кг/м}^3$; химическое потребление кислорода (ХПК) к массе органического вещества (ОВ) – 1,2; биохимическое потребление кислорода (БПК) к массе – 0,42, эффективное использование которого затруднено необходимостью обеспечения его безопасности в санитарно-эпидемиологическом плане (свежий навоз соответствует 3 классу опасности, а перепревший – 4) [4; 5]. Соответственно, совершенствование утилизационного цикла свиного бесподстилочного навоза как эффективного агрохимического энергоносителя при минимизации энергетических затрат и соблюдении нормативных санитарно-эпидемиологических требований при обеспечении экологической безопасности для био- и агроценозов является актуальной задачей.

На основании анализа информационных источников на рисунке 1 представлена блок-схема экологически безопасного утилизационного цикла свиного бесподстилочного навоза, на повышение энергетической эффективности операционных воздействий которого и направлено данное исследование [1; 5; 6].

Проанализировав блок-схему на рисунке 1, все операции технологического цикла можно разделить на основ-

¹ Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации: Указ Президента РФ от 21 января 2020 г. № 20 [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/73438425/> (дата обращения: 03.08.2020).



Р и с. 1. Блок-схема энергетически эффективной, экологически безопасной технологии утилизации свиного бесподстильного навоза

Fig. 1. Block diagram of energy-efficient and environmentally safe technology for utilization of liquid pig manure

ные и вспомогательные. К основным отнесем операционные воздействия, направленные на преобразование санитарно-эпидемиологических, экологических и энергетических свойств утилизируемого материала: разделение бесподстильного навоза на фракции 1, системное физико-химическое обеззараживание жидкой фракции в активаторе 2, термическое или вибрационное обезвоживание твердой фракции 3. К вспомогательным – операции, обес-

печивающие технологические взаимодействия между основными блоками: транспортировка, накопление, отстаивание, хранение [7; 8]. Очевидно, что с энергетической точки зрения операционные воздействия, отнесенные к основным, будут являться наиболее энергоемкими [9; 10].

Как показал анализ информационных источников, применение системных методов решения проблемы повышения энергетической эффектив-

ности и экологизации утилизационного цикла свиного бесподстильного навоза представлено недостаточно полно, что связано с отсутствием систематизации факторов, способных оказывать влияние на энергетические, санитарно-эпидемиологические и экологические составляющие, что делает затруднительным построение концептуальной модели рассматриваемого объекта [11; 12].

Целью настоящего исследования является разработка концептуальной модели энергетической эффективности операционных воздействий при получении экологически безопасного утилизационного цикла свиного бесподстильного навоза.

Обзор литературы

Использованию теории потенциальной эффективности как инструмента систематизации факторов, оказывающих влияние на состояние объектов и качество их функционирования, посвящено достаточное количество работ [10; 13–15]. Использование общего инструментария теории потенциальной эффективности в области оценки эксплуатационных свойств технических средств представлено в другой работе [16].

В работе А. Ю. Брюханова и коллег представлено применение инструментария теории потенциальной эффективности для формирования обобщенного критерия в виде эколого-энергетического показателя, характеризующего рациональность применения технических средств при выборе утилизационного цикла куриного помета [8]. Данная работа является развитием исследования, посвященного определению критериев энергоэкологической эффективности потенциальных энергоносителей путем применения системного анализа и интеллектуальных алгоритмов управления отходами агропромышленного комплекса (АПК) как многоуровневой группой, состоящей из энергетических, биологических и технологических аспектов [9]. Исследование вносит су-

щественный вклад в формирование концептуальных моделей энергетической эффективности утилизационных циклов отходов. В работе А. А. Ковалева с помощью инструментария теории потенциальной эффективности, а именно функций соответствия, предложены закономерности, определяющие результативность функционирования технических средств обработки органических отходов [10]. В исследованиях ряда ученых представлены частные методики, демонстрирующие целесообразность использования теории потенциальной эффективности как инструмента минимизации энергетических затрат в зависимости от прилагаемых условий, в области сушки барды пищевых производств – применения жидкой фракции бесподстильного навоза под яровую пшеницу, очистки воскового сырья в воде при механическом перемешивании и т. д. [11; 13; 17]. Соответственно, можно сделать вывод об унифицированности данного инструмента. Также установлено, что сочетание использования инструментария теории потенциальной эффективности при создании концептуальных моделей операционных воздействий технических средств является перспективным систематизирующим инструментом, применимым во многих областях науки и техники [7; 11; 15; 16].

Поскольку выбор технического средства и его конструктивно-технологических параметров во многом определяет энергетическую эффективность и экологичность утилизационного цикла, стоит рассмотреть принцип действия технических средств, реализующих основные операционные воздействия утилизационного цикла свиного бесподстильного навоза (рис. 1).

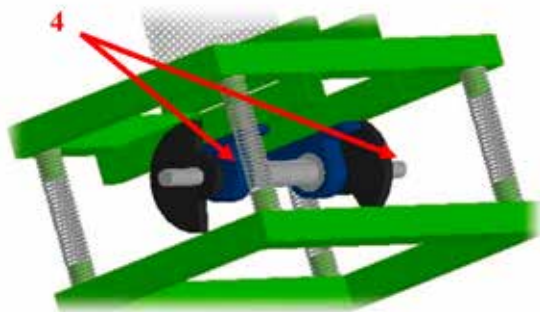
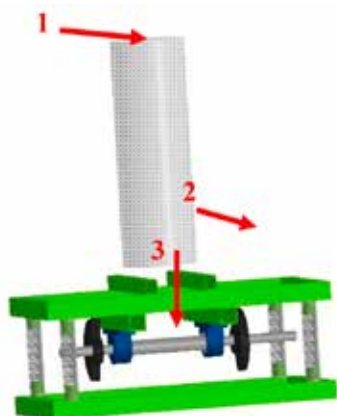
Энергетические затраты утилизационного цикла свиного бесподстильного навоза в биоорганическое удобрение во многом зависят от эффективности его фракционного разделения [13; 17; 18]. Несмотря на традиционный подход,

подразумевающий использование термических воздействий, перспективным решением данной задачи является применение вибрационных воздействий (рис. 2). Реализовать их можно следующим образом: бесподстилочный навоз загружается в рабочую камеру, смонтированную на упруго-диссипативных колебательных элементах, представляющих собой инерционный вибратор с циклической частотой колебаний 15...50 Гц и амплитудой 0,5...9 мм. В процессе вибрационного воздействия бесподстилочный навоз непрерывно подвергается знакопеременным ускорениям, что интенсифицирует два вида движений: возвратно-поступательное и вращательно-циркуляционное движение. От стенок рабочей камеры вибрация передается прилегающей к ней обрабатываемой среде на протяжении всего ее фазово-дисперсного портрета. Под действием комплекса механических сил (центробежной, центро-стремительной, силы давления потока, силы тяжести в сочетании с приложенным виброинерционным воздействием) реализуется процесс сепарации бесподстилочного навоза на твердую

(влажность $\leq 85\%$) и жидкую фракции (влажность $> 92\%$).

Отличительной возможностью данного технического средства является возможность его использования в режиме виброобезвоживателя твердой фракции свиного бесподстилочного навоза, полученной в результате разделения утилизируемого энергоносителя путем изменения массы дисбалансов, что в значительной мере повышает степень унификации вибрационного сепаратора/обезвоживателя [19; 20].

На основании серии исследований установлено, что перспективным техническим средством реализации операционного воздействия по дополнительному обеззараживанию жидкой фракции бесподстилочного навоза является использование электромагнитного активатора (рис. 3) [10; 21; 22]. Принцип действия заключается в системном воздействии на жидкую фракцию вращающего переменного магнитного поля совместно с рабочими телами, представляющими собой ферромагнитные стержни совместно с химическим реагентом (наиболее эффективны содержащие хлор реагенты: гипохлорит



Р и с. 2. Модель вибрационного сепаратора/обезвоживателя: 1 – подача бесподстилочного навоза; 2 – отвод жидкой фракции; 3 – отвод твердой фракции; 4 – дисбалансы, количество и положение которых определяют режим работы вибрационной системы

Fig. 2. Model of vibration separator/dehumidifier: 1 – submission of liquid manure; 2 – removal of the liquid fraction; 3 – the removal of the solid fraction; 4 – imbalances, the number and position of which determine the mode of operation of the vibration system

кальция $\text{Ca}(\text{Cl})\text{OCl}$, гипохлорит натрия NaClO , диоксид хлора ClO_2 , хлорамин NH_2Cl , в основании которых лежит активный хлор) [23; 24]. В зависимости от условий эксплуатации отношение длины ферромагнитных стержней к диаметру лежит в диапазоне $l/d = 5 \dots 25$, масса составляет от 0,5 до 1,5 кг, уровень магнитной индукции $B = 40 \dots 60$ мТл [22; 25; 26]. Использование данного типа воздействий позволяет существенным образом интенсифицировать тепломассообменные и диффузионные процессы в рабочей зоне активатора, а механические воздействия приводят к лизису клеток бактериальных оболочек² [23].



Р и с. 3. Электромагнитный активатор обеззараживания жидкой фракции
F i g. 3. Electromagnetic activator for liquid fraction disinfection

Материалы и методы

В качестве объекта исследования при формировании концептуальной модели энергетической эффективности утилизационного свиного бесподстилочного навоза выступали его операционные воздействия, а предметом — функция максимизации энергетической эффективности данного объекта в условиях санитарно-эпидемиологических и агрохимических ограничений.

Стоит рассмотреть основной инструментарий теории потенциальной эффективности. Понятие «эффективность» является комплексным и включает целые категории параметров, значения которых требуют минимизации/максимизации в зависимости от предъявляемых условий. Оптимальной эффективностью считается нахождение определенных соотношений этих параметров, обеспечивающих заданное положение наиболее информативной целевой функции.

Информативность целевой функции определяется путем введения глобального критерия эффективности процесса и локальных параметров, обеспечивающих наиболее рациональные условия операций. При этом применение теории эффективности подразумевает формализацию цели за счет многопараметрического целеполагания $U_{\text{ТР}}$ (требуемый результат), обеспечивающего требуемый условиями результат. Очевидно, что многопараметрическое целеполагание может быть эффективно обеспечено только путем применения перечня количественных и качественных параметров, оказывающих влияние на обозначенную цель в рамках проблемной ситуации. Под проблемной ситуацией в теории эффективности принято понимать разницу несоответствия реального и ожидаемого состояний технических систем. Разрешить проблемную ситуацию с точки зрения теории эффективности можно путем выполнения комплекса мероприятий по преобразованию некоторого объема имеющихся ресурсов (энергетических, технологических, временных и т. п.), направленных на достижение требуемого результата. Такую совокупность действий принято называть операцией. Реальный результат $U_{\text{Ре}}$ операции (фактический

² Логвиненко Д. Д., Шеляков О. П. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем. Киев: Техника, 1976. 113 с.; Вершинин И. Н., Вершинин Н. П. Аппараты с вращающимся электромагнитным полем. Сальск, 2007. 368 с.; Адошев А. И. Ферровихревой аппарат для обеззараживания жидкого свиного навоза: дис. ... канд. техн. наук. Ставрополь, 2011. 190 с.

и ожидаемый) есть тот результат, который получен или может быть получен при проведении операции. В силу влияния различного рода факторов реальный результат Y_{Re} операции может отличаться от требуемого Y_{TP} . При этом эффективность операций определяется соответствием реального результата выполнения преобразования ресурсов требуемому и позволяет оценивать этот процесс как степень достижения цели³.

Вне зависимости от категории рассмотрения инструментарий теории эффективности включает в себя определение показателя эффективности, характеризующего степень достижения соответствия реального состояния объекта к требуемому. Нахождение данного показателя осуществляется следующим образом. Определяется показатель достижения результата выполнения n -й операции в виде мерного вектора Q , представляющего целевой эффект, характеризуемый затратами времени t и ресурсов P :

$$Y_{Re}^n = \{Q_{Re}^n, t_{Re}^n, P_{Re}^n\}.$$

Затем формулируются граничные условия вектора целеполагания, позволяющие определить область допустимых значений с качественной точки зрения для n -й операции:

$$Y_{TP}^n = \{Q_{TPO}^n, t_{TPO}^n, P_{TPO}^n\}.$$

где Q_{TPO}^n – целевой эффект n -ой операции утилизационного цикла; t_{TPO}^n – временные затраты реализации n -ой операции утилизационного цикла; P_{TPO}^n – ресурсные затраты реализации n -й операции утилизационного цикла.

$$\begin{aligned} Q_{TPO}^n &= \{Q_{TPmin}^{n1} \leq Q_{TP}^{n1} \leq Q_{TPmax}^{n1}; \\ Q_{TPmin}^{n2} \leq Q_{TP}^{n2} \leq Q_{TPmax}^{n2}; Q_{TPmin}^{n3} \leq Q_{TP}^{n3} \leq Q_{TPmax}^{n3}; \\ Q_{TPmin}^{n...} \leq Q_{TP}^{n...} \leq Q_{TPmax}^{n...}; Q_{TPmin}^n \leq Q_{TP}^n \leq Q_{TPmax}^n. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{TPO}^n &= \{t_{TPmin}^{n1} \leq t_{TP}^{n1} \leq t_{TPmax}^{n1}; \\ t_{TPmin}^{n2} \leq t_{TP}^{n2} \leq t_{TPmax}^{n2}; t_{TPmin}^{n3} \leq t_{TP}^{n3} \leq t_{TPmax}^{n3}; \\ t_{TPmin}^{n...} \leq t_{TP}^{n...} \leq t_{TPmax}^{n...}; t_{TPmin}^n \leq t_{TP}^n \leq t_{TPmax}^n. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{TPO}^n &= \{P_{TPmin}^{n1} \leq P_{TP}^{n1} \leq P_{TPmax}^{n1}; \\ P_{TPmin}^{n2} \leq P_{TP}^{n2} \leq P_{TPmax}^{n2}; P_{TPmin}^{n3} \leq P_{TP}^{n3} \leq P_{TPmax}^{n3}; \\ P_{TPmin}^{n...} \leq P_{TP}^{n...} \leq P_{TPmax}^{n...}; P_{TPmin}^n \leq P_{TP}^n \leq P_{TPmax}^n. \end{aligned}$$

После того как определены показатели достижения результата и их граничные условия, необходимо ввести функцию соответствия, характеризующую в некоторой матричной шкале степень достижения цели операции:

$$\rho = f\{Y_{Re}^n, Y_{TP}^n\}.$$

Степень достижения цели при выполнении операции определяется с помощью математического ожидания показателя эффективности n -й операции:

$$W_i^{OP} = M\left[f\{Y_{Re}^n, Y_{TP}^n\}\right],$$

где M – математическое ожидание, определяемое через интеграл Лебега:

$$\begin{aligned} M &= M\left[f\{Y_{Re}^n, Y_{TP}^n\}\right] = \\ &= \int_x \left[f\{Y_{Re}^n, Y_{TP}^n\}\right] P_{[f\{Y_{Re}^n, Y_{TP}^n\}]}(dx), \end{aligned}$$

где x – множество всех возможных значений $\left[f\{Y_{Re}^n, Y_{TP}^n\}\right]$.

Энергетическая эффективность – комплексный показатель результативности реализации операции или процесса, подразумевающий минимизацию удельных энергетических затрат при соблюдении накладываемых технологических ограничений. Рост энергетической

³ Кокорев Г. Д. Повышение эффективности системы технической эксплуатации автомобилей в сельском хозяйстве на основе инженерно-кибернетического подхода: дис. ... д-ра. техн. наук. Саранск, 2014. 457 с.; Надежность и эффективность в технике. Методология. Организация. Терминология: справочник / Под ред. А. И. Рембезы. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.

эффективности технического средства или операции заключается в проведении комплекса системных мероприятий, направленных на максимизацию активной составляющей общих удельных энергетических затрат, то есть эффективного преобразования энергии из одной формы в другую, сопровождающегося достижением технологического эффекта при общей минимизации реактивных (паразитных) составляющих удельных энергетических затрат.

Первым этапом оценки энергетической эффективности является создание концептуальной модели, позволяющей определить целевые функции, факторы, способные оказывать наиболее существенное влияние на них, и ограничения, предъявляемые к исследуемому объекту с точки зрения качества.

Согласно ГОСТу Р 52777-2007 комплекс мероприятий энергетической оценки стационарных агрегатов с приводом от асинхронных электрических двигателей сводится к определению следующих показателей: активной и реактивной мощности; среднего коэффициента мощности и удельных энергозатрат (удельной энергоемкости)⁴. Однако для оценки энергетической эффективности необходимо рассмотреть конструктивно-технологические составляющие каждой операции, способные оказывать влияние на параметры назначения, регламентируемые рассмотренным ГОСТом.

Общая (номинальная) потребляемая энергия чаще всего складывается из трех основных составляющих, однако для повышения адекватности модели в ряде случаев уместно введение дополнительных параметров⁵:

$$N_{gen} = N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_n,$$

где N_1 – мощность, затрачиваемая на выполнение операции с требуемым

технологическим эффектом, кВт; N_2 – мощность, затрачиваемая на привод рабочих органов технологических систем, кВт; N_3 – мощность, затрачиваемая на подачу технологического материала в соответствующее устройство, кВт; N_n – мощность, затрачиваемая на дополнительные технологические операции, Вт.

В общем виде мощность, затрачиваемая на выполнение операции с требуемым технологическим эффектом при утилизации свиного бесподстилочного навоза, может быть представлена как:

$$N_1 = N_{fs} + N_{da} + N_{sfd}, \quad (1)$$

где N_{fs} – удельная мощность фракционного сепаратора, кВт·час/м³; N_{da} – удельная мощность активатора обеззараживания жидкой фракции, кВт·час/м³; N_{sfd} – удельная мощность обезвоживателя твердой фракции, кВт·час/кг.

Результаты исследования

Для разработки аналитической модели энергетической эффективности рассматриваемого утилизационного цикла стоит воспользоваться тремя составляющими ее мощности, которые в общем виде представлены формулой (1).

Рассмотрим составляющие удельной мощности фракционного сепаратора свиного бесподстилочного навоза:

$$N_{fs} = f(P_{fs}, Q_{fs}, \cos \varphi), \quad (2)$$

где P_{fs} – активная мощность, кВт; Q_{fs} – реактивная мощность, кВАр; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности.

Активная мощность фракционного сепаратора свиного бесподстилочного навоза характеризуется энергией, совершившей необратимое преобразование из одной формы в другую, и определяется как интеграл, равный периоду

⁴ ГОСТ Р 52777-2007. Техника сельскохозяйственная. Методы энергетической оценки.

⁵ Успенский И. А. Основы совершенствования технологического процесса и снижения энергозатрат картофелеуборочных машин: дис. ... д-ра. техн. наук. Москва, 1997. 396 с.

мгновенной мощности фракционного сепаратора свиного бесподстилочного навоза $p_{\text{фр.сеп.}}$:

$$P_{fs} = \frac{1}{T} \int_0^T p_{fs} dt, \quad (3)$$

$$= u_{fs} \cdot i_{fs} = U_{mfs} I_{mfs} \sin^2(\omega t + \varphi), \quad (4)$$

где u_{fs} – мгновенное значение напряжения в энергетической цепи фракционного сепаратора, В; i_{fs} – мгновенное значение силы тока в энергетической цепи фракционного сепаратора, А; U_{mfs} – амплитудное значение напряжения в энергетической цепи фракционного сепаратора, В; I_{mfs} – амплитудное значение силы тока в энергетической цепи фракционного сепаратора, А; ω – угловая частота колебаний электрического тока в сети, Гц; φ – угол сдвига фаз между силой тока ϕ_i и напряжением ϕ_u :

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i. \quad (5)$$

При этом активная мощность является функцией зависимости от группы конструктивно-технологических параметров сепаратора:

$$P_{fs} = f\{W_{in}, Sed_{in}, \rho_{in}, k_{in}, W_{lf}, Sed_{lf}, \rho_{lf}, k_{lf}, W_{sf}, Sed_{sf}, \rho_{sf}, k_{sf}, V_{wafs}, t_s, n_{sfq}, m_{db}\}, \quad (6)$$

где W_{in} – исходная влажность свиного бесподстилочного навоза, подаваемого в сепаратор, %; Sed_{in} – седиментационный коэффициент, характеризующий однородность фазового портрета сепарируемого свиного бесподстилочного навоза; ρ_{in} – исходная плотность подаваемого в сепаратор бесподстилочного навоза, кг/м³; k_{in} – коэффициент, характеризующий исходное истечение свиного бесподстилочного навоза во фракционный сепаратор; W_{lf} – влажность жидкой фракции, отводимой из сепаратора, %; Sed_{lf} – седиментационный

коэффициент, характеризующий однородность фазового портрета жидкой фракции; Sed_{sf} – седиментационный коэффициент, характеризующий однородность фазового портрета твердой фракции; ρ_{lf} – плотность жидкой фракции, отводимой из сепаратора, кг/м³; k_{lf} – коэффициент, характеризующий истечение отводимой из сепаратора жидкой фракции; W_{sf} – влажность твердой фракции, отводимой из сепаратора, %; ρ_{sf} – плотность твердой фракции, отводимой из сепаратора, кг/м³; k_{sf} – коэффициент, характеризующий истечение твердой фракции, отводимой из сепаратора; V_{wafs} – объем рабочей зоны фракционного сепаратора, м³; t_s – продолжительность сепарации, мин; n_{sfq} – частота вращения вала фракционного сепаратора, мин⁻¹; m_{db} – масса дисбалансов на валу фракционного сепаратора, кг.

Реактивная мощность фракционного сепаратора свиного бесподстилочного навоза характеризуется энергией, циркулирующей в контуре и каждую четверть полупериода возвращающейся к источнику при условии использования синусоидального источника напряжения промышленной циклической частоты колебаний электрического тока, и определяется как интеграл равный периоду мгновенной реактивной мощности фракционного сепаратора свиного бесподстилочного навоза $q_{\text{фр.сеп.}}$:

$$Q_{fs} = \int_0^T q_{fs} dt, \quad (7)$$

$$= U_{mfs} I_{mfs} \cos^2(\omega t + \varphi). \quad (8)$$

При этом реактивная мощность является функцией зависимости от группы конструктивно-технологических параметров сепаратора:

$$Q_{fs} = f\{W_{in}, Sed_{in}, \rho_{in}, k_{in}, W_{lf}, Sed_{lf}, \rho_{lf}, k_{lf}, W_{sf}, Sed_{sf}, \rho_{sf}, k_{sf}, V_{wafs}, t_s, n_{sfq}, m_{db}\}. \quad (9)$$

Коэффициент, характеризующий энергетическую эффективность выполняемой операции, определяется отношением мгновенных значений активной мощности к полной, представляющей корень квадратный из суммы квадратов мгновенных значений активной и реактивной мощностей:

$$\cos \varphi = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T p dt}{\sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_0^T p dt\right)^2 + \left(\int_0^T q dt\right)^2}}. \quad (10)$$

Удельная мощность активатора обеззараживания жидкой фракции характеризуется функцией от энергии, совершившей необратимое преобразование из одной формы в другую, и энергии, циркулирующей в колебательном энергетическом контуре:

$$N_{da} = f(P_{da}, Q_{da}, \cos \varphi). \quad (11)$$

При этом активная мощность является функцией зависимости от группы конструктивно-технологических параметров активатора:

$$P_{da} = f\{W, Sed_{in}, Sed_{lf}, K_1, pH_1, \omega, \rho_{wa1}, m_{wb1}, K_2, pH_2, NPK, ХПК, БПК, \cos \varphi, V_{wada}, t_d, \rho_{wa2}, m_{wb2}, B, f_i, Q_{tr}\}, \quad (12)$$

где W – влажность подаваемой фракции, %; Sed_{in}, Sed_{lf} – седиментационный коэффициент, характеризующий однородность фазового портрета фракции до и после технологического воздействия; $K_1 = f(\text{КОЕ ОКБ}_1, \text{БОЕ}_1, \text{ТТКБ}_1, \text{ТКФСТК}_1)$ – уровень экологической нагрузки (бактериологическая обсемененности) подаваемой в активатор жидкой фракции, шт; $K_2 = f(\text{КОЕ ОКБ}_2, \text{БОЕ}_2, \text{ТТКБ}_2, \text{ТКФСТК}_2)$ – уровень экологической нагрузки (бактериоло-

гической обсемененности) фракции до и после технологического воздействия, шт; pH_1, pH_2 – уровень pH фракции до и после технологического воздействия; ρ_{wa1}, ρ_{wa2} – уровень заполненности рабочими телами рабочей зоны активатора до и после технологического воздействия, %; m_{wb1}, m_{wb2} – масса рабочих тел до и после технологического воздействия, кг; ω – концентрация химического реагента, мг/л; V_{wada} – объем рабочей зоны активатора обеззараживания, м³; NPK – группа параметров оценки удобрильной агрохимической ценности, %; $ХПК$ – химическое потребление кислорода, мг/л; $БПК$ – биологическое потребление кислорода, мг/л; t_d – продолжительность воздействия, мин; B – уровень магнитной индукции в рабочей зоне индуктора активатора, мТл; f_i – циклическая частота колебаний электрического тока в энергетической цепи устройства, Гц; Q_{tr} – реактивная мощность трансформатора тока энергетической цепи активатора обеззараживания, ВАр.

Физическая природа реактивной составляющей активатора обеззараживания соответствует зависимостям (7), (8), являясь при этом функцией зависимости от группы конструктивно-технологических параметров активатора обеззараживания:

$$Q_{da} = f\{W, Sed_{in}, Sed_{lf}, K_1, pH_1, \omega, \rho_{wa1}, m_{wb1}, K_2, pH_2, NPK, ХПК, БПК, \cos \varphi, V_{wada}, t_d, \rho_{wa2}, m_{wb2}, B, f_i, Q_{tr}\}. \quad (13)$$

Удельная мощность обезвоживателя твердой фракции характеризуется энергией, совершившей необратимое преобразование из одной формы в другую, энергией, циркулирующей в колебательном энергетическом контуре, и их коэффициентом мощности:

$$N_{sfd} = f(P_{sfd}, Q_{sfd}, \cos \varphi), \quad (14)$$

Процессы и машины агроинженерных систем

Активная мощность обезвоживателя твердой фракции является функцией зависимости от группы конструктивно-технологических параметров:

$$P_{sfd} = f\{W, Sed_{in}, Sed_{lf}, K_1, pH_1, K_2, pH_2, NPK, ХПК, БПК, V_{wasfd}, t_{sfd}, f_i, n_{ssfd}, m_{db}\}, \quad (15)$$

где V_{wasfd} – объем рабочей зоны обезвоживателя твердой фракции, м³; t_{sfd} – продолжительность воздействия, мин; f_i – циклическая частота колебаний электрического тока в энергетической цепи обезвоживателя твердой фракции, Гц; n_{ssfd} – частота вращения вала обезвоживателя твердой фракции, мин⁻¹.

Физическая природа реактивной составляющей обезвоживателя твердой фракции соответствует зависимостям (7), (8), при этом также являясь функцией зависимости от группы конструктивно-технологических параметров обезвоживателя твердой фракции:

$$Q_{sfd} = f\{W, Sed_{in}, Sed_{lf}, K_1, pH_1, K_2, pH_2, NPK, ХПК, БПК, V_{wasfd}, t_{sfd}, f_i, n_{ssfd}, m_{db}\}. \quad (16)$$

Удельные затраты мощности, направленные на вспомогательные операции (подачу свиного бесподстилочного навоза в соответствующие технические средства, реализующие основные операции, а также системы накопления/хранения и т. п.), могут складываться из следующих составляющих:

$$N_2 = N_{trlm} + N_{pump} + N_{hom}, \quad (17)$$

где N_{trlm} – удельная мощность транспортеров бесподстилочного свиного навоза, кВт·час/м³; N_{pump} – удельная мощность насосов, обеспечивающих перекачивание свиного бесподстилочного навоза, кВт·час/м³; N_{hom} – удельная мощность гомогенизирующих

устройств и других технических систем, обеспечивающих поддержание требуемого фазового состояния при отстаивании/накоплении/хранении утилизируемого материала, кВт·час/м³.

На основании анализа информационных источников установлено, что энергозатраты N_2 будут определяться прежде всего зависимостью от физико-механических свойств утилизируемого энергоносителя для всех технических средств, выполняющих вспомогательные операции [6; 7; 9; 16]:

$$N_2 = \frac{1}{T} \int_0^T p_2 dt, \quad (18)$$

$$= (U_{mtrlm} I_{mtrlm} \sin^2(\omega t + \varphi)) + (U_{mpump} I_{mpump} \sin^2(\omega t + \varphi)) + (U_{mhom} I_{mhom} \sin^2(\omega t + \varphi)). \quad (19)$$

Активная мощность технических средств, реализующих вспомогательные операции технологического цикла утилизации свиного бесподстилочного навоза, определяется:

$$p_2 = \frac{N_2}{\sqrt{2}} = f(W, t, Sed_{in}, K_1, pH, NPK, ХПК, БПК). \quad (20)$$

Реактивная мощность технических средств, реализующих вспомогательные операции технологического цикла утилизации свиного бесподстилочного навоза, определяется:

$$q_2 = \frac{Q_2}{\sqrt{2}} = f(W, t, Sed_{in}, K_1, pH, NPK, ХПК, БПК). \quad (21)$$

Удельные затраты мощности на привод рабочих органов технологических систем, реализующих основные операции цикла утилизации свиного бесподстилочного навоза, могут составлять порядка 25...30 % от удельной

мощности, затрачиваемой на выполнение технологических воздействий, однако для уточнения этих значений необходимо провести дополнительные исследования [16; 22; 25; 26]:

$$N_3 = 25 \dots 30 \% (N_1 + N_2). \quad (22)$$

Обсуждение и заключение

Разработка систем рационального природопользования напрямую зависит от рациональности использования потенциальных энергоносителей, таких как свиной бесподстильный навоз. Неоспоримой является важность повышения энергетической эффективности и экологизации утилизационных циклов подобных систем.

Обобщив результаты анализа составляющих энергетической эффективности при экологически безопасном утилизационном цикле свиного бесподстильного навоза, получили концептуальную модель, включающую следующие составляющие:

$$\begin{aligned} N_{ulm}^{m+a} &= N_{fs} = f(P_{fs}, Q_{fs}, \cos \varphi), \\ N_{da} &= f(P_{da}, Q_{da}, \cos \varphi), \\ N_{sfd} &= f(P_{sfd}, Q_{sfd}, \cos \varphi), \end{aligned} \quad (23)$$

где N_{fs} – концептуальная модель удельной мощности фракционного сепаратора свиного бесподстильного навоза:

$$\begin{aligned} N_{fs} &= \frac{1}{T} \int_0^T p_{fs} dtf (W_{in}, Sed_{in}, \rho_{in}, \\ &k_{in}, W_{lf}, Sed_{lf}, \rho_{lf}, k_{lf}, W_{sf}, Sed_{sf}, \\ &\rho_{sf}, k_{sf}, V_{wafs}, t_s, n_{sfq}, m_{db}) + \\ &+ \int_0^T q_{fs} dtf (W_{in}, Sed_{in}, \rho_{in}, k_{in}, \\ &W_{lf}, Sed_{lf}, \rho_{lf}, k_{lf}, W_{sf}, Sed_{sf}, \\ &\rho_{sf}, k_{sf}, V_{wafs}, t_s, n_{sfq}, m_{db}) + \\ &+ \frac{P_{fs}}{\sqrt{(P_{fs})^2 + (Q_{fs})^2}}. \end{aligned} \quad (24)$$

N_{da} – концептуальная модель удельной мощности активатора обеззараживания жидкой фракции:

$$\begin{aligned} N_{da} &= \frac{1}{T} \int_0^T p_{da} dtf (W, Sed_{in}, Sed_{lf}, \\ &K_1, pH_1, \omega, \rho_{wa1}, m_{wb1}, K_2, pH_2, \\ &NPK, ХПК, БПК, \cos \varphi, V_{wada}, \\ &t_d, \rho_{wa2}, m_{wb2}, B, f_i, Q_{ir}) + \\ &+ \int_0^T q_{da} dtf (W, Sed_{in}, Sed_{lf}, K_1, \\ &pH_1, \omega, \rho_{wa1}, m_{wb1}, K_2, pH_2, \\ &NPK, ХПК, БПК, \cos \varphi, V_{wada}, \\ &t_d, \rho_{wa2}, m_{wb2}, B, f_i, Q_{ir}) + \\ &+ \frac{P_{da}}{\sqrt{(P_{da})^2 + (Q_{da})^2}}. \end{aligned} \quad (25)$$

Удельная мощность N_{drWB} , затрачиваемая на привод рабочих органов, будет составлять:

$$N_{drWB} = 25 \dots 30 \% (N_{ulm}^{m+a}), \quad (27)$$

$$N = N_{ulm}^{m+a} + N_{drWB}. \quad (28)$$

Концептуальная модель операционных воздействий при получении экологически безопасного утилизационного свиного бесподстильного навоза позволяет определить составляющие удельных энергетических затрат при определенных факторах.

Разработанная модель позволит повысить энергетическую эффективность при разработке, проектировании и эксплуатации технологии переработки жидкого свиного навоза путем выявления факторов способных оказывать влияние на операционные воздействия на каждом из этапов.

Зависимости (24), (25), (26) представляет собой исходные данные для проведения факторного анализа и оп-

ределения их влияния на обозначенные целевые функции с последующим получением статистических моделей, позволяющих определить рациональные параметры операционных воздействий.

Полученные концептуальные основы энергетической эффективности при экологически безопасной утилизации свиного бесподстилочного навоза позволяют предложить системную методику определения целевых функций в виде векторов целеполагания, граничных условий и условий достижения на основании теории потенциальной эффективности.

Следующим этапом развития данного направления является разработка автоматизированного програм-

много комплекса, формирующего концептуальную модель энергетической эффективности в зависимости от накладываемых условий в виде графоаналитического представления распределения удельных энергетических затрат по категориям.

Практическая значимость работы подтверждена выявленными и категоризованными системами факторов в зависимости от типа функционального воздействия операции утилизационного цикла свиного бесподстилочного навоза, что может представлять исходные данные для формирования частных методик исследования и создания статистических моделей при экологически безопасной утилизации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Измайлов, А. Ю.** Создание инновационной техники и ресурсосберегающих технологий производства кормов – основа развития животноводства / А. Ю. Измайлов, Я. П. Лобачевский, О. С. Марченко [и др.] // Вестник ФГБОУ ВО «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2017. – № 6 (82). – С. 23–28.
2. **Briukhanov, A.** Method of Designing of Manure Utilization Technology / A. Briukhanov, I. Subbotin, R. Uvarov [et al.] // Agronomy Research. – 2017. – Vol. 15, Issue 3. – Pp. 658–663. – URL: https://agronomy.emu.ee/wp-content/uploads/2017/05/Vol15Nr3_Briukhanov.pdf (дата обращения: 03.08.2020).
3. **Павлов, П. И.** Эффективные средства механизации для удаления и утилизации навоза / П. И. Павлов // Естественные и технические науки. – 2017. – № 3 (105). – С. 87–89.
4. **Хмыров, В. Д.** Эффективность системы применения удобрений в органическом земледелии / В. Д. Хмыров, Б. С. Труфанов, О. И. Журавлева // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2019. – № 3 (58). – С. 14–18. – URL: http://www.mgau.ru/sciense/journal/PDF_files/vestnik_3_2019.pdf (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.
5. **Еськов, А. И.** Современное состояние и перспективы использования органических удобрений в сельском хозяйстве России / А. И. Еськов, С. М. Лукин, Г. Е. Мерзлая // Плодородие. – 2018. – № 1 (100). – С. 20–23. – URL: http://plodorodie-j.ru/journal/2018/nomer_one/2018-1-20-23.html (дата обращения: 03.08.2020).
6. **Шигапов, И. И.** Технология переработки навозной массы / И. И. Шигапов, А. В. Поросятников, О. Н. Краснова // Сельский механизатор. – 2019. – № 5. – С. 28–29. – URL: http://selmech.msk.ru/519.html#_Технология_переработки_навозной (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.
7. **Субботин, И. А.** Энергоэкологическая оценка использования различных генерирующих источников в сельском хозяйстве / И. А. Субботин, А. Ю. Брюханов, Е. В. Тимофеев [и др.] – DOI 10.15507/2658-4123.029.201903.366-382 // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 3. – С. 366–382. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/84-19-3/715-10-15507-0236-2910-029-201903-3> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

8. Брюханов, А. Ю. Экологоэнергетический показатель внедрения наилучших доступных технологий утилизации куриного помета / А. Ю. Брюханов, И. А. Субботин, Е. В. Тимофеев [и др.] – DOI 10.18412/1816-0395-2019-12-29-33 // Экология и промышленность России. – 2019. – Т. 23, № 12. – С. 29–33. – URL: <https://www.ecology-kalvis.ru/jour/article/view/1413> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

9. Ракутько, С. А. Энергоэкологические основы наилучших доступных технологий светокультуры / С. А. Ракутько. – DOI 10.24411/0131-5226-2019-10121 // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2019. – № 1 (98). – С. 44–60. – URL: <https://www.sznii.ru/images/IAEP/jurnal/jurnali/Jurnal98.pdf> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

10. Ковалев, А. А. Энергетическая эффективность предварительной обработки синтетического субстрата метантенка в аппарате вихревого слоя / А. А. Ковалев, Д. А. Ковалев, В. С. Григорьев. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202001.092-110 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 92–110. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/88-20-1/759-10-15507-0236-2910-030-202001-6> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

11. Суржко, О. А. Повышение энергетической эффективности при сушке барды пищевых производств / О. А. Суржко, М. А. Куликова, Н. Г. Моиссенко [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, № 4 (3). – С. 627–630. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-energeticheskoy-effektivnosti-pri-sushke-bardy-pischevyh-proizvodstv/viewer> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

12. Гоман, Н. В. Эффективность применения жидкой фракции бесподстилочного свиного навоза под яровую пшеницу на лугово-черноземной почве / Н. В. Гоман, И. А. Бобренко, Н. К. Трубина [и др.] // Вестник КрасГАУ. – 2018. – № 5 (140). – С. 51–59. – URL: http://www.kgau.ru/vestnik/2018_5/content/9.pdf (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

13. Киров, Ю. А. Повышение эффективности разделения на фракции стоков пивоваренного производства в гидроциклоне-сгустителе / Ю. А. Киров, Н. В. Батищева, В. С. Шкрабак // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2018. – № 1 (50). – С. 207–213. – URL: https://spbgau.ru/files/nid/6995/izvestiya_no50.pdf (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

14. Бышов, Д. Н. Исследование эффективности очистки воскового сырья в воде при интенсивном механическом перемешивании / Д. Н. Бышов, Д. Е. Каширин, В. В. Павлов [и др.] // Вестник КрасГАУ. – 2017. – № 12 (135). – С. 115–122. – URL: http://www.kgau.ru/vestnik/2017_12/content/19.pdf (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

15. Куликова, М. А. Оценка эффективности нового органоминерального удобрения на основе свиного навоза / М. А. Куликова, Т. А. Колесникова, Е. А. Грибут [и др.] – DOI 10.25680/S19948603.2019.109.16 // Плодородие. – 2019. – № 4 (109). – С. 49–51. – URL: <http://plodorodie-j.ru/journal/2019/4-2019/2019-4-49-51.html> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

16. Бышов, Н. В. Повышение эффективности перевозок плодоовощной продукции в АПК / Н. В. Бышов, С. Н. Борычев // Вестник РГАУ им. П. А. Костычева. – 2016. – № 5. – С. 38–40.

17. Сычев, В. Г. Исследование динамики и баланса гумуса при длительном применении систем удобрения на основных типах почв / В. Г. Сычев, Л. К. Шевцова, Г. Е. Мерзлая. – DOI 10.7868/S0002188118020011 // Агрохимия. – 2018. – № 2. – С. 3–21. – URL: <https://www.libnauka.ru/item.php?doi=10.7868/S0002188118020011> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

18. Шигапов, И. И. Модель биотехнической системы процесса уборки, транспортировки и переработки навоза / И. И. Шигапов // Аграрная наука. – 2017. – № 3. – С. 27–31. – URL: <https://www.vetpress.ru/jour/article/view/53> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

19. Бышов, Н. В. Исследование распределения плотности вероятностей патогенных маркеров свиного бесподстилочного навоза / Н. В. Бышов, Н. В. Лимаренко, И. А. Успенский [и др.]. – DOI 10.32786/2071-9485-2019-04-26 // Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса. – 2019. – № 4 (56). – С. 215–227. – URL: http://www.volgau.com/Portals/0/static/izvestiya_auk/izv_auk_056/izv_auk_056_st_26.pdf?ver=2020-01-31-101602-813 (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.



20. **Byshov, N. V.** Ecological and Technological Criteria for the Efficient Utilization of Liquid Manure / N. V. Byshov, I. A. Uspensky, I. A. Yukhin [et al.]. – DOI 10.1088/1755-1315/422/1/012069 // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – № 422. – 5 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/422/1/012069/pdf> (дата обращения: 03.08.2020).

21. **Лимаренко, Н. В.** Создание математической модели технологического процесса обеззараживания стоков животноводства / Н. В. Лимаренко // Известия ВУЗов. Пищевая технология. – 2017. – № 3. – С. 108–112. – URL: <https://ivpt.kubstu.ru/tocs/356-357/31> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

22. **Месхи, Б. Ч.** Создание математической модели для оценки энергоемкости процесса обеззараживания стоков животноводства / Б. Ч. Месхи, Н. В. Лимаренко, В. П. Жаров [и др.]. – DOI 10.23947/1992-5980-2017-17-4-129-135 // Вестник Донского государственного технического университета. – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 129–135. – URL: <https://vestnik.donstu.ru/jour/article/view/192/193> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

23. **Патент № 2668906 Российская Федерация, МПК B01F 13/08 (2006.01), СПКВ01F 13/08 (2018.08).** Индуктор с замкнутым перемещением рабочих тел : № 2018106113 : заявл. 19.02.2018 : опубл. 04.10.2018 / Лаврентьев А. А., Ананченко Л. Н., Лимаренко Н. В. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет». – 6 с.: ил.

24. **Патент № 2680073 Российская Федерация, МПК C02F 1/48 (2006.01), C02F 1/50 (2006.01), A01N 25/02 (2006.01), C02F 1/76 (2006.01).** Способ обеззараживания жидких сред : № 2018113501 : заявл. 13.04.2018 : опубл. 14.02.2019 / Жаров В. П., Шаповал Б. Г., Лимаренко Н. В. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет». – 5 с.

25. **Успенский, И. А.** Исследование влияния параметров рабочих тел индуктора на коэффициент мощности / И. А. Успенский, И. А. Юхин, Г. А. Борисов [и др.] – DOI 10.32786/2071-9485-2019-03-45 // Известия нижегородского агроуниверситетского комплекса. – 2019. – № 3 (55). – С. 360–369. – URL: http://www.volgau.com/Portals/0/static/izvestiya_auk/izv_auk_055/izv_auk_055_st_45.pdf?ver=2019-10-24-135950-203 (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

26. **Byshov, N. V.** Parameters of Optimized System of Technological Process of Waste Water Disinfection of Livestock Enterprises in Integrated Physico-Chemical Effects / N. V. Byshov, I. A. Uspensky, I. A. Yukhin [et al.]. – DOI 10.1088/1755-1315/341/1/012140 // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – № 341. – 6 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/341/1/012140> (дата обращения: 03.08.2020).

Поступила 13.01.2020; принята к публикации 20.03.2020; опубликована онлайн 30.09.2020

Об авторах:

Бышов Николай Владимирович, профессор кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева» (390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: B-8363-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4619-6446>, byshov@rgatu.ru

Успенский Иван Алексеевич, заведующий кафедрой технической эксплуатации транспорта ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева» (390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: B-7990-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, Scopus ID: 57193743041, ivan.uspenskiij@yandex.ru

Юхин Иван Александрович, заведующий кафедрой автотракторной техники и теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева» (390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), доктор технических наук, доцент, Researcher ID: Q-8188-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3822-0928>

Чаткин Михаил Николаевич, профессор кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), доктор технических наук, Researcher ID: O-7004-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, chatkinm@yandex.ru

Лимаренко Николай Владимирович, доцент кафедры электротехники и электроники ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), кандидат технических наук, Researcher ID: O-5342-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3075-2572>, limarenkodstu@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

Н. В. Бышов, И. А. Успенский – научное руководство, постановка цели и задач исследования; И. А. Юхин, М. Н. Чаткин – поиск и анализ информационных источников, критический анализ исследования и редактирование текста; Н. В. Лимаренко – проведение исследования, создание концептуальной модели, компьютерные работы, визуализация, редактирование текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Izmaylov A.Y., Lobachevsky Y.P., Marchenko O.S., et al. Development of Innovative Machinery and Resource-Saving Technologies of Feed Production as the Basis of Livestock Breeding Development. *Vestnik FGBOU VO "Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina"* = Moscow Goryachkin Agroengineering University Bulletin. 2017; (6):23-28. (In Russ.)
2. Briukhanov A., Subbotin I., Uvarov R., et al. Method of Designing of Manure Utilization Technology. *Agronomy Research*. 2017; 15(3):658-663. Available at: https://agronomy.emu.ee/wp-content/uploads/2017/05/Vol15Nr3_Briukhanov.pdf (accessed 03.08.2020). (In Eng.)
3. Pavlov P.I. Effective Mechanization Means for Manure Removal and Disposal. *Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki* = Natural and Technical Sciences. 2017; (3):87-89. (In Russ.)
4. Khmyrov V.D., Trufanov B.S., Zhuravleva O.I. Efficiency of Fertilizer Application System in Organic Agriculture. *Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Michurinsk State Agrarian University. 2019; (3):14-18. Available at: http://www.mgau.ru/sciense/journal/PDF_files/vestnik_3_2019.pdf (accessed 03.08.2020). (In Russ.)
5. Eskov A.I., Lukin S.M., Merzlaya G.E. Current Status and Perspectives of Organic Fertilizers Application in Russian Agriculture. *Plodorodie* = Fertility. 2018; (1):20-23. Available at: http://plodorodie.j.ru/journal/2018/nomer_one/2018-1-20-23.html (accessed 03.08.2020). (In Russ.)
6. Shigapov I.I., Porosyatnikov A.V., Krasnova O.N. Manure Processing Technology. *Selskiy Mekhanizator* = Rural Mechanic. 2019; (5):28-29. Available at: http://selmech.msk.ru/519.html#_Технология_переработки_навозной (accessed 03.08.2020). (In Russ.)
7. Subbotin I.A., Briukhanov A.Yu., Timofeev E.V., et al. Energy and Environment Assessment of Agricultural Application of Power Generating Sources. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):366-382. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.366-382>
8. Bryuchanov A.Yu., Subbotin I.A., Timofeev E.V., et al. Ecological and Energy Indicator of the Implementation of the Best Available Technologies for the Disposal of Poultry Manure. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* = Ecology and Industry of Russia. 2019; 23(12):29-33. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-12-29-33>
9. Rakutko S.A. Energy and Ecological Basis of Best Available Techniques of Plant Lighting. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanized Crop and Livestock Production. 2019; (1):44-60. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10121>



10. Kovalev A.A., Kovalev D.A., Grigoriev V.S. Energy Efficiency of Pretreatment of Digester Synthetic Substrate in a Vortex Layer Apparatus. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(1):92-110. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.092-110>
11. Surzhko O.A., Kulikova M.A., Moissenko N.G., et al. Increase of Power Efficiency at Drying Bards of Food Productions. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* = Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2014; 16(4):627-630. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-energeticheskoy-effektivnosti-pri-sushke-bardy-pisch-evyih-proizvodstv/viewer> (accessed 03.08.2020). (In Russ.)
12. Goman N.V., Bobrenko I.A., Trubina N.K. The Efficiency of Using Liquid Fraction of Littered Pork Manure under Spring Wheat on Meadow and Chernozom Soil. *Vestnik KrasGAU* = the Bulletin of KrasGAU. 2018; (5):51-59. Available at: http://www.kgau.ru/vestnik/2018_5/content/9.pdf (accessed 03.08.2020). (In Russ.)
13. Kirov U.A., Batishcheva N.V., Shkrabak V.S. Efficiency Increasing of Brewing Manufacture Drains Division Into Fractions in the Hydrocyclone-Densifier. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = News of Saint-Petersburg State Agrarian University. 2018; (1):207-213. Available at: https://spbgau.ru/files/nid/6995/izvestiya_no50.pdf (accessed 03.08.2020). (In Russ.)
14. Byshov D.N., Kashirin D.E., Pavlov V.V., et al. The Research of Efficiency of Purification of Wax Raw Materials in Water at Intensive Mechanical Mixing. *Vestnik KrasGAU* = Krasnoyarsk State Agrarian University Bulletin. 2017; (12):115-122. Available at: http://www.kgau.ru/vestnik/2017_12/content/19.pdf (accessed 03.08.2020). (In Russ.)
15. Kulikova M.A., Kolesnikova T.A., Gribut Ye.A., et al. Estimation of Efficiency of the New Organomineral Fertilizer Based on Pig Manure. *Plodородie*. 2019; (4):49-51. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25680/S19948603.2019.109.16>
16. Byshov N.V., Borychev S.N. Increased Efficiency of Transportation of Fruit and Vegetable Products in the Agrarian Sector. *Vestnik RGATU im. P. A. Kostycheva* = Kostychev Ryazan State Agrotechnological University Bulletin. 2016; (5):38-40. (In Russ.)
17. Sychev V.G., Shevtsova L.K., Merzlaya G.Ye. Study of the Dynamics and Balance of Humus during Long-Term Application of Fertilization Systems on Main Types of Soils. *Agrokhimiya* = Agricultural Chemistry. 2018; (2):3-21. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.7868/S0002188118020011>
18. Shigapov I.I. Model of Biotechnical System of Process of Cleaning Up, Transportation and Processing of Manure. *Agrarnaya nauka* = Agrarian Science. 2017; (3):27-31. Available at: <https://www.vetpress.ru/jour/article/view/53> (accessed 03.08.2020). (In Russ.)
19. Byshov N.V., Limarenko N.V., Uspensky I.A., et al. Study of the Distribution of the Probability Density of Pathogenic Markers of Liquid Pig Manure. *Izvestiya nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa* = News of the Lower Volga Agro-University Complex. 2019; (4):215-227. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2019-04-26>
20. Byshov N.V., Uspensky I.A., Yukhin I.A., et al. Ecological and Technological Criteria for the Efficient Utilization of Liquid Manure. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 422. 5 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/422/1/012069>
21. Limarenko N.V. The Definition of the Law of Distribution of Density of Probabilities of Specific Electrical Energy Consumption during the Disinfection of Wastewater of Agroindustrial Complex. *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya* = News of Higher Schools. Food Technology. 2017; (3):108-112. Available at: <https://ivpt.kubstu.ru/tocs/356-357/31> (accessed 03.08.2020). (In Russ.)
22. Meskhi B.C., Limarenko N.V., Zharov V.P., et al. Creation of Mathematical Model for Estimating Energy Intensity of Livestock Wastes Disinfection. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Don State Technical University Bulletin. 2017; 17(4):129-135. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-4-129-135>
23. Inductor with Closed Movement of the Working Bodies: Patent 2668906 Russian Federation. No. 2018106113; appl. 19.02.2018; publ. 04.10.2018. 6 p.
24. Method of Disinfection of Liquids: Patent 2680073 Russian Federation. No. 2018113501; appl. 13.04.2018; publ.14.02.2019. 5 p. (In Russ.)

25. Uspensky I.A., Yukhin I.A., Borisov G.A., et al. Study of the Influence of the Inductor Bodies of the Inductor on the Power Factor. *Izvestiya nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa* = News of the Lower Volga Agro-University Complex. 2019; (3):360-369. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2019-03-45>

26. Byshov N.V., Uspensky I.A., Yukhin I.A., et al. Parameters of Optimized System of Technological Process of Waste Water Disinfection of Livestock Enterprises in Integrated Physico-Chemical Effects. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 341. 6 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/341/1/012140>

Received 13.01.2020; revised 20.03.2020; published online 30.09.2020

About the authors:

Nikolay V. Byshov, Professor of Chair of Machine Park Operation, Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev (1 Kostychev St., Ryazan 390044, Russia), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: B-8363-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4619-6446>; byshov@rgatu.ru

Ivan A. Uspenskiy, Head of Chair of Technical Operation of Transport, Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev (1 Kostychev St., Ryazan 390044, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: B-7990-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, Scopus ID: 57193743041, ivan.uspenskiy@yandex.ru

Ivan A. Yukhin, Head of Chair of Machine Park Operation, Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev (1 Kostychev St., Ryazan 390044, Russia), D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Researcher ID: Q-8188-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3822-0928>

Mikhail N. Chatkin, Professor of Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: O-7004-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, chatkinm@yandex.ru

Nikolay V. Limarenko, Associate Professor of Chair of Electrical Engineering and Electronics, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: O-5342-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3075-2572>, limarenkodstu@yandex.ru

Contribution of the authors:

N. V. Byshov, I. A. Uspenskiy – scientific guidance, formulation of research objectives and goals; I. A. Yukhin, M. N. Chatkin – search and analysis of information sources, critical analysis of research, text editing; N. V. Limarenko – conducting research, creating a conceptual model, computer work, visualization, text editing.

All authors have read and approved the final manuscript.



Определение угла трения между колосом пшеницы и очесывающей гребенкой

В. Ю. Савин*

Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана»

(г. Калуга, Россия)

**savin.study@yandex.ru*

Введение. Определение угла трения между гребенкой и колосом является важной задачей, направленной на поиск оптимальных параметров конструкции и режимов работ очесывающих устройств. При взаимодействии гребенки и колоса происходит уплотнение взаимного расположения колосковых чешуй, цветковых пленок и зерен, при этом изменяется шероховатость поверхности колосков.

Материалы и методы. Для определения углов трения между стальной гребенкой и колосьями пшеницы была произведена серия опытов. Для исследования выбраны сорта пшеницы «Московская 40» и «Московская 56». Экспериментальная измерительная установка представляет собой каркас с установленной на нем поворотной площадкой с возможностью регулировки угла поворота. Угломерная делительная головка обеспечивает возможность фиксации значения угла поворота площадки. Вес гири, подвешенной к стеблю растения, имитировал силы, возникающие в процессе очеса. Также измерялись и фиксировались ширина и толщина колоса.

Результаты исследования. Установлено влияние размеров колоса на угол трения. Результаты исследования разбиты на две группы. Получены следующие значения углов трения: 26,4–31,5° для пшеницы с шириной колоса менее 10,4 мм; 22,0–27,1° для пшеницы с шириной колоса более 10,4 мм.

Обсуждение и заключение. Получены углы трения колосьев по гребенке для сортов пшеницы, характерных для Центрального региона. Установлена зависимость угла трения от соотношения геометрических размеров колоса и ширины щели очесывающей гребенки. При ширине колоса менее 10,4 мм наблюдался эффект защемления колосков между зубьями гребенки, при этом коэффициент трения заметно возрастал.

Ключевые слова: уборка зерновых, очесывающее устройство, очесывающий барабан, очесывающая гребенка, угол трения, колос пшеницы

Для цитирования: Савин, В. Ю. Определение угла трения между колосом пшеницы и очесывающей гребенкой / В. Ю. Савин. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202003.413-425 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 3. – С. 413–425.



Determination of the Friction Angle between the Wheat Ear and Stripper Fingers

V. Yu. Savin*

*Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University
(Kaluga, Russia)*

*savin.study@yandex.ru

Introduction. Determining the angle of friction between stripper fingers and a wheat ear is an important task aimed at finding the optimal design parameters and operating modes of stripping devices. When stripper fingers and wheat ears interact, the relative position of the ear glumes, flower glumes, and grains is densified. In this case, the spikelet surface roughness changes.

Materials and Methods. A series of experiments was carried out to determine the angles of friction between a steel stripper fingers and wheat ears. Wheat varieties “Moskovskaya 40” and “Moskovskaya 56” were selected for the study. The experimental measuring installation is a frame with a rotatable platform mounted on it with the adjustable angle of rotation. The goniometer head provides the ability to fix the platform rotation angle value. The weight suspended from the stem of the plant imitated the forces arising in the process of stripping. The width and thickness of the wheat ear were also measured and recorded.

Results. The influence of the size of the wheat ear on the angle of friction is determined. The results of the study are divided into two groups. The following values of the friction angles were obtained: 26.4–31.5° for the wheat with ear width of less than 10.4 mm; 22.0–27.1° for the wheat with ear width of more than 10.4 mm.

Discussion and Conclusion. The angles of friction of wheat ears on the stripper fingers for wheat varieties specific to the Central region are obtained. The dependence of the angle of friction on the ratio of the geometric dimensions of the wheat ear and the slit width of the stripper fingers is established. When a wheat ear width is less than 10.4 mm, an effect of pinching the spikelets between the stripper fingers was observed. In this case, the coefficient of friction noticeably increased.

Keywords: grain harvesting, stripping device, strippin cylinder, stripper fingers, friction angle, wheat ear

For citation: Savin V.Yu. Determination of the Friction Angle between the Wheat Ear and Stripper Fingers. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(3):413-425. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.413-425>

Введение

Очес растений на корню – одна из альтернативных технологий уборки зерновых культур. В работах ряда исследователей отмечаются определенные достоинства и перспективы метода [1; 2]. Одним из базовых преимуществ использования технологии очеса при уборке зерновых является повышенное содержание зерна в первичном ворохе, то есть ворохе после жатки, традиционного или очесывающего типа [3]. Немаловажным является и то, что технология очеса лучше, чем традиционная, подходит для созда-

ния малогабаритных, в том числе прицепных, уборочных машин, так как в целом может совмещать в себе процессы отделения зерна и его транспортировки. Разработан и предложен ряд схем очесывающих устройств, из которых наибольшее распространение получили устройства гребневого типа [4; 5].

Очес зерновой массы – сложный процесс взаимодействия гребенки и колоса с учетом внутренних сил, возникающих между отдельными частями растения.

Разработаны методики для определения оптимальных параметров

конструкции очесывающих рабочих органов уборочных машин. Одним из важнейших параметров конструкции является профиль гребенки очесывающего барабана.

Обзор существующих и перспективных конструкций очесывающих аппаратов позволяет выделить прямолинейные, криволинейные и комбинированные профили гребенок. Комбинированный профиль сочетает как криволинейные, так и прямолинейные участки. В одной из работ рассмотрен вопрос выбора оптимального профиля гребенки очесывающего барабана [6]. При этом рабочий процесс очесывающего устройства рассматривается как совокупность процессов очеса и транспортирования очесанной массы. Предложены две характерные зоны гребенки очесывающего аппарата: критическая зона очеса и рабочая зона очеса. Одним из параметров, определяющих рабочие зоны гребенок и, соответственно, выбор оптимального профиля гребенок, является угол трения гребенки о колос.

В работе М. А. Бурьянова предложена методика, в которой угол трения гребенки о колос, наряду с другими параметрами, позволяет оценить величину и направление начальной скорости движения зерновки после ее отрыва от колоса [7].

В статье А. А. Ковалева и соавторов коэффициент трения продукта очеса по поверхности лопасти указан как один из ключевых параметров, влияющих на угол поворота барабана, при котором начинается перемещение растения по гребню [8].

Таким образом, определение угла трения между гребенкой и колосом является важной задачей, направленной на поиск оптимальных параметров конструкции и режимов работ очесывающих устройств.

Проанализируем факторы, которые могут влиять на угол трения. В начальной стадии очеса колос движется по гребенке. При этом взаимодейству-

ют поверхность гребенки и колосковые чешуи нижних колосков колоса. Колосковые чешуи разделяют по длине и форме. По длине выделяют короткие, средние и длинные. По форме чешуи делятся на овальные, яйцевидные, ланцетные. Учитывая, что пятна контакта колоса с гребенкой стремятся к двум линиям, можно предположить, что сила трения гребенки о колос не зависит от геометрических параметров и формы чешуй и, следовательно, от сорта пшеницы.

Введем такое понятие, как плотность взаимодействия гребенки и колосков колоса. Если расположить колос на гребенке вертикально, то при отсутствии связей пятно контакта гребенки с колосом будет стремиться к двум точкам. При этом собственный вес колоса достаточно мал и в целом картину взаимодействия не меняет. При реальном взаимодействии гребенки и колоса вследствие появления внешних и внутренних сил происходит уплотнение взаимного расположения колосковых чешуй, цветковых пленок и зерен. Меняется площадь пятна контакта гребенки и колоса и шероховатость поверхностей колосков. Таким образом, угол трения изменяется.

Одними из основных факторов, влияющих на угол трения, являются материал и шероховатость гребенки. В данной статье основное внимание будет уделено исследованию угла трения между колосом и стальной гребенкой.

Обзор литературы

Определение угла либо коэффициента трения – важная задача не только в рамках исследования процессов при очесе зерновых культур. Аналогичные задачи ставятся и при исследовании процессов высева семян, взаимодействия минеральных удобрений с криволинейными поверхностями и т. д.

В работе Н. И. Шестакова предложена методика определения коэффициента трения минеральных удобрений о криволинейную поверхность бун-

кера [9]. Предлагается определять коэффициент трения графическими или численными методами, подставляя значения скоростей в решение дифференциального уравнения движения точки без сопротивления среды. Причем скорости, согласно методике, определяются с помощью скоростной видеосъемки. При этом гранула представлена как материальная точка. Для нашего случая взаимодействия упрощение колоса до материальной точки будет некорректным вследствие наличия сложной поверхности контакта колоса с гребенкой.

Методика определения коэффициента трения семян зерновых культур по поверхностям из стали, полиэтилена, технической резины, органического стекла предполагает использование наклонной плоскости [10; 11]. При этом в работе приведена схема наклонной плоскости с силами, действующими на материал, без указания конструкции устройства.

Коэффициент трения покоя семян сои определялся с помощью прибора, содержащего наклонную платформу, шарнирно закрепленную на станине, шкалу и тяговое устройство [12]. Платформа выполнена с продольными пазами полукруглой формы для исключения перекачивания частиц на наклонной плоскости [13].

Зарубежные авторы отмечают гетерогенную структуру зерновых культур, вследствие чего они проявляют высокую восприимчивость к внешним условиям [14]. Выделяются такие внешние факторы, влияющие на силу трения, как нагрузка, влажность и скорость. Также выделяются внешние факторы, такие как давление и скорость [15]. При этом авторы предлагают измерять коэффициенты трения при типичных значениях выделенных факторов. В указанном случае это давления и скорости, которые регистрируются при заполнении и опорожнении бункеров.

Ученые продемонстрировали влияние материалов очесывающей гре-

бенки и обтекателя на качество выполняемого процесса [16]. При описании процессов, происходящих при контакте колоса с очесывающим зубом, указываются коэффициенты трения покоя для зерна и колоса озимой пшеницы сорта «Дмитрий» по поверхностям из стали и сверхвысокомолекулярного полиэтилена. При этом в статье приведена методика определения величины усилий, действующих на колос, движущийся по поверхности обтекателя, с использованием лабораторной установки с тензодатчиками. Не совсем четко описано, являются ли приведенные коэффициенты трения, представленные при описании процессов взаимодействия колоса с гребенкой, результатом исследования на лабораторной установке. Следует отметить, что колосья взаимодействуют с гребенкой и обтекателем различными поверхностями, поэтому и коэффициенты трения будут различаться.

В другой работе определялся коэффициент трения покоя зерна, полывы и колоса озимой пшеницы с целью обоснования параметров и режимов работы очесывающей жатки [17]. Указано, что использовалось устройство, изготовленное с применением головки чертежного прибора. Методика определения коэффициентов трения и схема устройства не приведены.

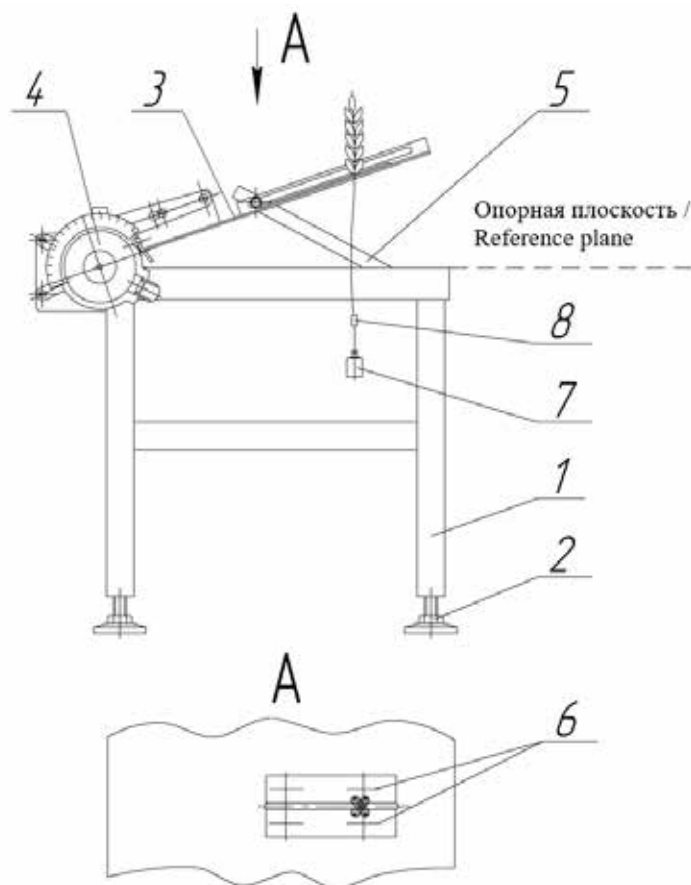
Материалы и методы

Для определения углов трения между стальной гребенкой и колосьями пшеницы была произведена серия опытов. Экспериментальные исследования выполнены в Калужской области на полях Калужского научно-исследовательского института сельского хозяйства – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А. Г. Лорха». Для исследования выбраны характерные для Центрального региона сорта пшеницы: «Московская 40» и «Московская 56». Влажность зерна пшеницы составила 10–12 %.

Сорта «Московская 40» и «Московская 56» принадлежат к мягким озимым

пшеницам. Пшеница «Московская 40» имеет веретеновидный колос, «Московская 56» – полубулавовидный. Колосья сорта «Московская 56» рыхлые, средней плотности. Колосья сорта «Московская 40» средней плотности, плотные. Средняя урожайность пшеницы сорта «Московская 40» в центральном регионе – 33,7 ц/га; 32,2 ц/га – у пшеницы сорта «Московская 56»¹.

Экспериментальная измерительная установка (рис. 1) представляет собой каркас с размещенной на нем поворотной площадкой с возможностью регулировки угла поворота и состоит из рамы 1 с регулируемыми опорами 2, поворотной площадки 3 с закрепленными на ней пластинами 6, угломерной делительной головки 4, механизма фиксации 5. Регулируемые опоры необ-



Р и с. 1. Измерительное устройство: 1 – рама; 2 – регулируемые опоры; 3 – поворотная площадка; 4 – угломерная головка; 5 – механизм фиксации; 6 – пластины; 7 – гиря; 8 – зажим

F i g. 1. Measuring device: 1 – frame; 2 – adjustable feet; 3 – rotating platform; 4 – goniometer; 5 – locking mechanism; 6 – plates; 7 – weight; 8 – clamp

¹ Государственный реестр селекционных достижений. Сорта культуры «Пшеница мягкая озимая» [Электронный ресурс]. URL: https://gossortrf.ru/wp-content/uploads/2020/03/FIN_reestr_dop_12_03_2020.pdf (дата обращения: 03.08.2020).

ходимы для выставления опорной плоскости рамы в горизонтальном положении. Угломерная делительная головка обеспечивает возможность фиксации значения угла поворота площадки. Механизм фиксации обеспечивает неподвижность и жесткость поворотной площадки относительно рамы во время эксперимента. Пластины, установленные на поворотной площадке, имитируют зубья гребенки очесывающего устройства. Ширина щели между пластинами регулируется.

С целью получения структуры и шероховатости поверхности колоса в месте контакта с пластинами-имитаторами, идентичными структуре и шероховатости колоса при работе очесывающего аппарата, предложено подвешивать гирию 7 из набора разновесов за фрагмент стебля в соответствии с рисунком 1. Вес гири имитирует внутренние силы, возникающие в стебле при взаимодействии колоса и гребенки в процессе очеса. Вес гири был подобран опытным путем. Оптимальным признан вес, равный 100 г. При использовании гири большей массы угол трения и, соответственно, шероховатость пятна контакта не меняются, при этом появляются сложности, связанные с проведением опытов, в частности с креплением гири к стеблю.

Стальные гребенки и пластины экспериментальной установки изготавливаются из тонколистового проката качественной углеродистой стали без шлифовки поверхностей контакта с колосом. Если говорить о стальных гребенках, данный материал является наиболее технологичным. Шероховатость Ra поверхности тонколистового проката качественной углеродистой стали регламентируется ГОСТом 1625-97 и для матового состояния поверхности составляет не более 1,6 мкм. Для определения диапазона шероховатости используемых в экспериментальной установке пластин-имитаторов гребенок применялся профилограф профи-

лометр «Абрис-ПМ7». Полученный диапазон шероховатости пластин Ra составил 1,56–1,68 мкм.

Методика исследования состоит в следующем. Во время регулирования опоры 2 выставлялась опорная плоскость измерительного устройства в горизонтальном положении. Для оценки соответствия опорной плоскости горизонтали использовался ватерпас. Ширина щели между пластинами-имитаторами выставлялась с использованием штангенциркуля. Описываемые измерения были выполнены с шириной щели, равной 7 мм. Далее площадка с пластинами поворачивалась в промежуточное положение, устанавливался колос, с использованием зажима 8 крепилась гирия 7 из набора разновесов. С использованием угломерной головки площадка поворачивалась до тех пор, пока колос не начинал скользить по пластинам. Определив примерный диапазон угла трения, исследуемый параметр уточнялся. Для этого площадка поворачивалась и фиксировалась в нескольких точках в районе определенного диапазона, и устанавливался угол трения.

С целью определения влияния размеров колоса на угол трения измерялись и фиксировались такие структурные показатели, как ширина и толщина колоса. Измерения производились с помощью штангенциркуля.

Результаты исследования

Структурные показатели пшеницы сортов «Московская 40» и «Московская 56» приведены в таблицах 1 и 2. Средние величины длины и ширины колоса чуть больше у пшеницы сорта «Московская 40».

Результаты измерения углов трения гребенки о колос пшеницы сорта «Московская 40» представлены на диаграмме рисунка 2. Как видно из диаграммы, угол трения изменялся от 22,0° до 33,4°.

Результаты измерения углов трения гребенки о колос пшеницы сорта «Московская 56» представлены на диаграм-

Таблица 1

Table 1

Структурные показатели колосьев пшеницы сорта «Московская 40»
Structure indicators of ears of “Moskovskaya 40” wheat

Номер опыта / Experience number	Ширина, мм / Width, mm	Толщина, мм / Thickness, mm
1	11,8	11,0
2	8,8	8,8
3	11,2	10,2
4	10,4	9,8
5	11,8	11,0
6	11,0	10,5
7	11,5	10,8
8	10,2	9,5
9	10,8	10,2
10	11,0	10,0

Таблица 2

Table 2

Структурные показатели колосьев пшеницы сорта «Московская 56»
Structure indicators of ears of “Moskovskaya 56” wheat

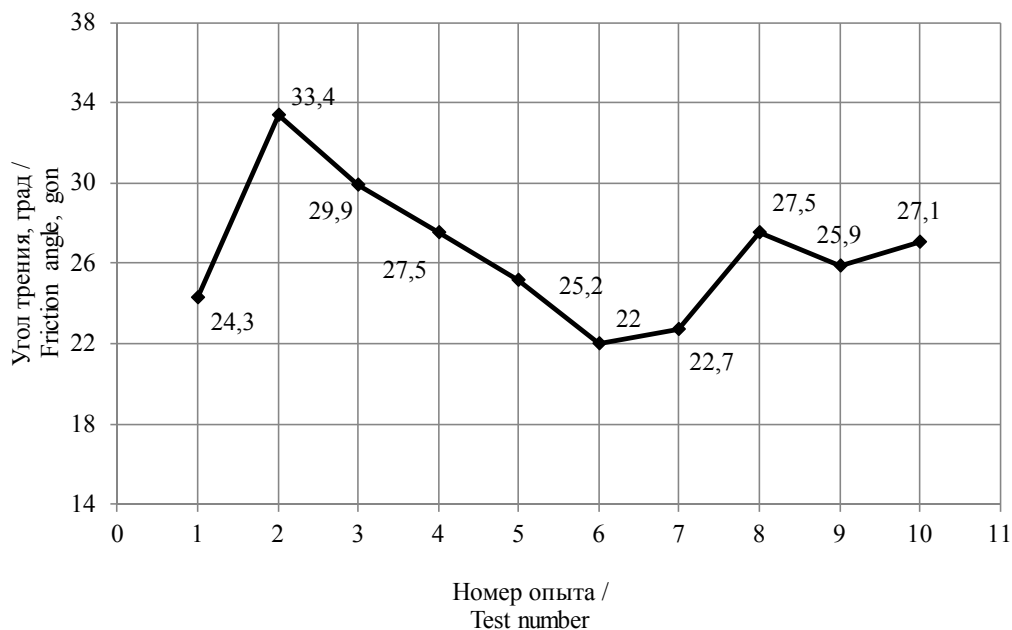
Номер опыта / Experience number	Ширина, мм / Width, mm	Толщина, мм / Thickness, mm
1	10,4	9,8
2	10,6	10,2
3	9,5	9,0
4	8,8	8,2
5	10,2	10,0
6	10,5	10,1
7	10,2	9,5
8	10,5	10,1
9	10,2	10,0
10	9,7	9,5

ме рисунка 3. Угол трения изменялся в диапазоне от 22,7° до 31,5°.

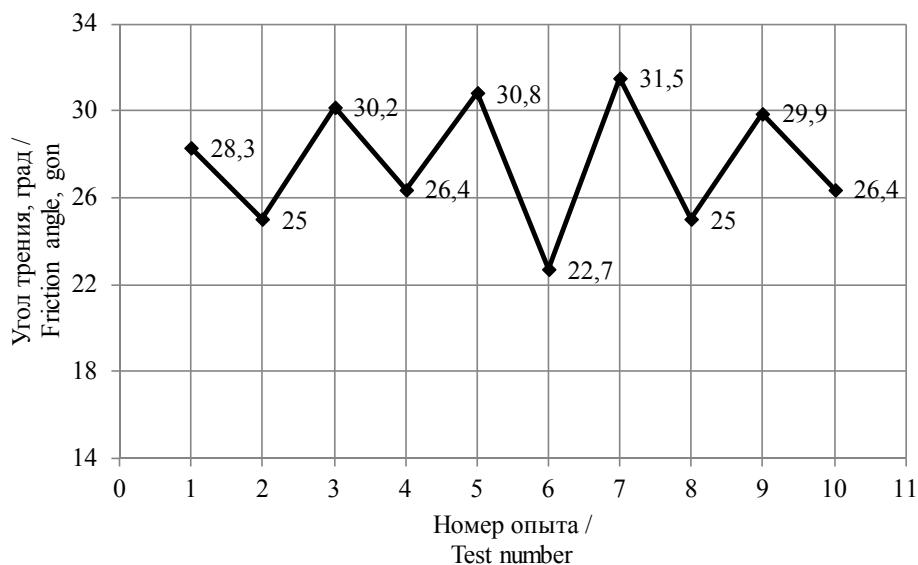
Анализируя диаграммы, можно сделать вывод, что в целом углы трения для обоих сортов пшеницы изменяются в одинаковом диапазоне. При этом, если сопоставить структурные показатели колосьев, представленные в таблицах 1 и 2, и диаграммы углов трения,

можно сделать определенные выводы. Меньшим размерам колоса соответствует больший угол трения. Разграничив опыты шириной колоса 10,4 мм, можно получить диаграммы, представленные на рисунке 4.

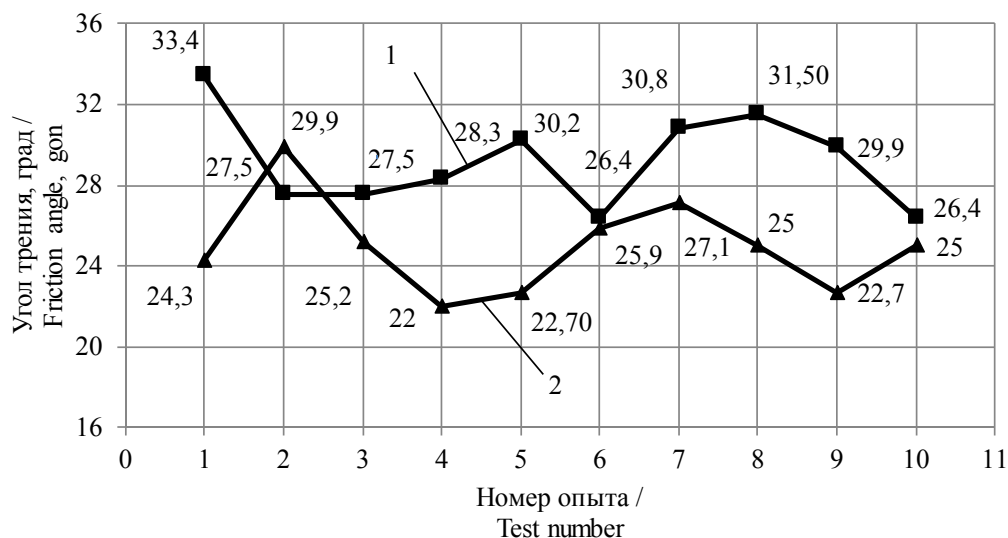
Если на диаграммах, представленных на рисунке 4, убрать по одному резко выделяющемуся результату, то



Р и с. 2. Диаграмма углов трения колоса пшеницы сорта «Московская 40» о гребенку
F i g. 2. Diagram of friction angles of “Moskovskaya 40” wheat on stripper fingers



Р и с. 3. Диаграмма углов трения колоса пшеницы сорта «Московская 56» о гребенку
F i g. 3. Diagram of friction angles of “Moskovskaya 56” wheat on stripper fingers



Р и с. 4. Диаграмма углов трения колоса пшеницы о гребенку: 1 – колос с шириной менее 10,4 мм; 2 – колос с шириной более 10,4 мм

F i g. 4. Diagram of friction angles of wheat ears on stripper fingers:

1 – the ear with a width of less than 10.4 mm; 2 – the ear with a width of more than 10.4 mm

можно установить следующие диапазоны углов трения: 26,4–31,5° для пшеницы с шириной колоса менее 10,4 мм; 22,0–27,1° для пшеницы с шириной колоса более 10,4 мм.

Для оценки тесноты зависимости угла трения от ширины колоса был выполнен корреляционный анализ. В его рамках определены следующие корреляционные отношения: 0,93 для сорта «Московская 40» и 0,97 для сорта «Московская 56». Данные результаты позволяют охарактеризовать связь между углом трения и шириной колоса как весьма высокую.

Очевидно, что коэффициент трения зависит не столько от геометрических размеров колоса, сколько от соотношения геометрических размеров и ширины щели между зубьями гребенки. Наблюдения в ходе опытов позволили установить природу данной зависимости. На рисунке 5 показаны два случая взаимодействия колоска колоса пшеницы с зубьями очесывающей гребенки: а) зубья взаимодействуют с колоском

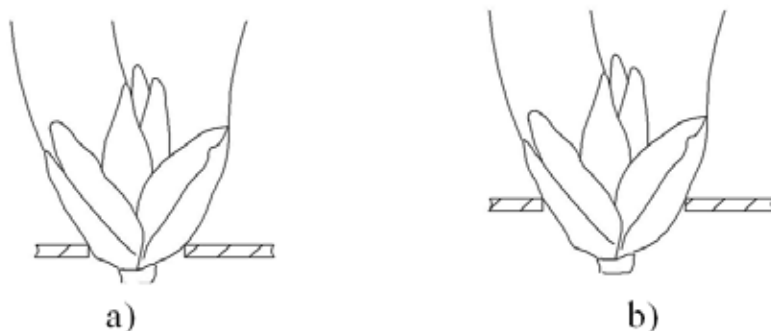
у его основания; б) зубья взаимодействуют с колоском ближе к его центру. Во втором случае имеет место эффект защемления колосков колоса пшеницы между гребенками. Этим и объясняется увеличение угла трения при малых размерах колоса относительно щели очесывающей гребенки.

Таким образом, эффект защемления колоса позволяет объяснить определенный разброс результатов по полученным углам трения гребенки о колос и разделить результаты на две группы.

Обсуждение и заключение

Предложено в процессе экспериментальных исследований использовать гири, подвешенные к стеблю растения, вес которых имитировал силы, возникающие в процессе очеса.

В результате исследования получены углы трения колосьев озимой пшеницы сортов, характерных для Центрального региона, по гребенке очесывающего устройства. Угол трения колосьев пшеницы сорта «Московская 40» составил 22,0–33,4°. Угол тре-



Р и с. 5. Схема взаимодействия колоска колоса пшеницы с зубьями очесывающей гребенки:

- а) зубья взаимодействуют с колоском у его основания;
- б) зубья взаимодействуют с колоском ближе к его центру

F i g. 5. Scheme of interaction of a spikelet of wheat ear with stripper fingers:

- a) stripper fingers interact with the spikelet at its base;
- b) stripper fingers interact with the spikelet closer to its center

ния колосьев пшеницы сорта «Московская 56» изменялся в диапазоне от $22,7^\circ$ до $31,5^\circ$. Зависимость значения угла трения колоса по очесывающей гребенке от сорта пшеницы не установлена.

Установлена зависимость угла трения от соотношения геометрических размеров колоса и ширины щели очесывающей гребенки. При ширине колоса менее 10,4 мм и ширине щели гребенки, равной 7 мм, наблюдался эффект защемления колосков. При этом коэффициент трения заметно возрастал.

Результаты экспериментальных исследований разбиты на 2 группы. При

отсутствии эффекта защемления колоса между зубьями гребенки угол трения изменялся в диапазоне $22,0-27,1^\circ$. При появлении эффекта защемления колоса угол трения увеличивался и составил $26,4-31,5^\circ$.

Полученные значения углов трения позволяют уточнить и подтвердить результаты работы по выбору профиля гребенки очесывающего барабана, где в качестве ориентировочного угла трения между колосом и очесывающей гребенкой был принят угол трения стеблей зерновых культур по шлифованной стали, равный $19,3^\circ$ [6].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ковлягин, Ф. В. Уборка зерновых культур методом очеса / Ф. В. Ковлягин, Г. Г. Маслов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1991. – № 8. – С. 5–6.
2. Жалнин, Э. В. Уборка с очесом на корню: за и против / Э. В. Жалнин // Сельский механизатор. – 2013. – № 8. – С. 10–12. – URL: <http://selmech.msk.ru/> (дата обращения: 03.08.2020).
3. Савин, В. Ю. Определение состава очесанного вороха при уборке пшеницы с использованием прицепного очесывающего устройства / В. Ю. Савин. – DOI 10.17238/issn2071-2243.2016.4.96 // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2016. – № 4 (51). – С. 96–99. – URL: <https://rucont.ru/efd/572167> (дата обращения: 03.08.2020).
4. Галкин, А. В. Исследование качественных характеристик льноволокна в зависимости от конструкции очесывающего аппарата / А. В. Галкин, Д. Г. Фадеев, И. В. Ушаповский. – DOI 10.15507/0236-2910.028.201803.389-399 // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 3. – С. 389–399. –

URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/62-18-3/429-10-15507-0236-2910-028-201803-8> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

5. **Алдошин, Н. В.** Совершенствование конструкции очесывающих устройств для уборки зернобобовых культур / Н. В. Алдошин, М. А. Мосяков. – DOI 10.26897/1728-7936-2018-2-23-27 // Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2018. – № 2. – С. 23–27. – URL: <http://elib.timacad.ru/dl/full/vmgau-04-2018-02.pdf/view> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

6. **Савин, В. Ю.** К выбору профиля гребенки очесывающего барабана / В. Ю. Савин. – DOI 10.17238/issn2071-2243.2019.1.67 // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2019. – № 1 (60). – С. 67–72. – URL: <http://elib.timacad.ru/dl/full/vmgau-04-2018-02.pdf/view> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

7. **Бурьянов, М. А.** Исследование взаимодействия колоса растения с зубьями однобарабанной навесной на комбайн жатки при уборке зерновых культур очесом / М. А. Бурьянов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2011. – № 67. – С. 91–100. – URL: <https://elck.ru/Q48Z2> (дата обращения: 03.08.2020).

8. **Ковалев, М. М.** Взаимодействие продуктов очеса с лопастями очесывающе-транспортирующего барабана льноуборочной машины / М. М. Ковалев, А. В. Галкин, Д. Г. Фадеев // Техника в сельском хозяйстве. – 2011. – № 2. – С. 3–7.

9. **Шестаков, Н. И.** Определение коэффициента трения минеральных удобрений о криволинейную поверхность бункера / Н. И. Шестаков, В. А. Хрипин, В. А. Макаров [и др.] // Техника в сельском хозяйстве. – 2013. – № 2. – С. 29–30. – URL: <http://xn--80aak3h.xn--p1ai/wp-content/uploads/2017/05/Doc11.pdf> (дата обращения: 03.08.2020).

10. **Евченко, А. В.** Анализ физико-механических свойств семян зерновых культур / А. В. Евченко // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2016. – № 8. – С. 144–149. – URL: http://www.kgau.ru/vestnik/2016_8/content/23.pdf (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

11. **Цепляев, А. Н.** Результаты экспериментальных исследований по определению коэффициентов трения / А. Н. Цепляев, Я. С. Лазаренко // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2012. – № 4 (28). – С. 221–225. – URL: http://www.volgau.com/Portals/0/static/izvestiya_auk/izvestiya_2012_28_4.pdf?ver=2013-05-16-115944-073 (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

12. **Балашов, А. В.** Определение физико-механических свойств семян сои / А. В. Балашов, С. П. Стрыгин, А. А. Синельников [и др.] // Наука в центральной России. – 2017. – № 2 (26). – С. 5–12. – Рез. англ.

13. **Патент 2488094 Российская Федерация, МПК G01N19/02.** Прибор для определения коэффициента силы трения покоя : № 2012107007/28 : заявл. 27.02.2012 : опубл. 20.07.2013 / Тишанинов Н. П., Амелянц А. Г., Анашкин А. В. [и др.] ; заявитель и патентообладатель ГНУ ВНИИТиН Россельхозакадемии. 6 с.

14. **Wojcik, A.** The Methodical Aspects of the Friction Modeling of Plant Granular Materials / A. Wojcik, J. Fraczek, A. K. Wota. – DOI 10.1016/j.powtec.2018.12.037 // Powder Technology. – 2019. – Vol. 344. – Pp. 504–513. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591018310738?via%3Dihub> (дата обращения: 03.08.2020).

15. **Chiputula, J. P.** Effect of Moisture Content on Coefficients of Friction between Triticale and Galvanized Steel / J. P. Chiputula, R. A. Bucklin, A. R. Blount. – DOI 10.13031/aea.12575 // Applied Engineering in Agriculture. – 2018. – Vol. 34, Issue 3. – Pp. 599–602. – URL: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?AID=48978&t=3&dabs=Y&redir=&redirType=> (дата обращения: 03.08.2020).

16. **Бурьянов, М. А.** О влиянии свойств материалов, применяемых для изготовления рабочих органов очесывающей жатки, на качество выполняемого процесса / М. А. Бурьянов, И. В. Червяков, А. И. Бурьянов // Тракторы и сельхозмашины. – 2018. – № 3. – С. 54–61. – URL: <https://rucont.ru/efd/623610> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

17. Бурьянов, М. А. Результаты исследования характеристик растений озимой пшеницы сорта «Дмитрий» для обоснования параметров и режимов работы очесывающей жатки / М. А. Бурьянов, А. И. Бурьянов, И. В. Червяков [и др.] // *Зерновое хозяйство России*. – 2017. – № 5 (53). – С. 51–56. – URL: <https://www.zhros.ru/jour/article/view/102> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

Поступила 10.02.2020; принята к публикации 20.05.2020; опубликована онлайн 30.09.2020

Об авторе:

Савин Владимир Юрьевич, доцент кафедры тепловых двигателей и гидромашин Калужского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана» (248000, Россия, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2), кандидат технических наук, Researcher ID: D-4378-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2476-9768>, savin.study@yandex.ru

Благодарности: Автор выражает благодарность сотрудникам Калужского научно-исследовательского института сельского хозяйства – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А. Г. Лорха» за помощь в подготовке статьи.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Kovliagin F.V. Harvesting of Grain Crops by Combing. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva* = Mechanization and Electrification of Agriculture. 1991; (8):5-6. (In Russ.)
2. Zhalnin E.V. Cleaning With a Comb on the Roots: Pros and Cons. *Selskiy Mechanizator* = Country Mechanic. 2013; (8):10-12. Available at: <http://selmech.msk.ru/> (accessed 03.08.2020). (In Russ.)
3. Savin V.Yu. Determination of Composition of Thrashed Heap at Harvesting Wheat Using the Trail-Type Rippler. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Voronezh State Agrarian University Bulletin. 2016; (4):96-99. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2016.4.96>
4. Galkin A.V., Fadeev D.G., Uschapovsky I.V. Studying Quality Characteristics of Flax Fiber Depending on Deseeding Device Design. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):389-399. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.389-399>
5. Aldoshin N.V., Mosyakov M.A. Improving the Design of a Combing Device for Harvesting Leguminous Crops. *Vestnik federalnogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskiy gosudarstvenniy agroinzhenerniy universitet imeni V.P. Goryachkina"* = Goryachkin Moscow State Agroengineering University Bulletin. 2018; (2):23-27. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-23-27>
6. Savin V.Yu. Rationale for Choosing the Profile of Stripping Fingers of the Stripping Cylinder. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Voronezh State Agrarian University Bulletin. 2019; (1):67-72. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2019.1.67>
7. Burianov M.A. Investigation of Plant Stalk Interaction with Fingers of One-Drum Combine Mounted Header While Harvesting of Crops Through Stripping. *Politematicheskii setevoy elektronniy nauchniy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University. 2011; (67):91-100. Available at: <https://clck.ru/Q48Z2> (accessed 03.08.2020). (In Russ.)
8. Kovalev M.M., Galkin A.V., Fadeev D.G. Interaction of Combing Products with the Blades of the Stripping and Conveying Cylinder of the Forager. *Tekhnika v selskom khozyaystve* = Machinery in Agriculture. 2011; (2):3-7. (In Russ.)
9. Shestakov N.I., Khripin V.A., Makarov V.A., et al. Determination of the Coefficient of Friction of Mineral Fertilizers Against the Curved Surface of the Hopper. *Tekhnika v selskom khozyaystve* = Machinery in Agriculture. 2013; (2):29-30. Available at: <http://xn--80aaak3h.xn--p1ai/wp-content/uploads/2017/05/Doc11.pdf> (accessed 03.08.2020). (In Russ.)



10. Evchenko A.V. Analysis of Physical and Mechanical Properties of Grain Crops Seeds. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Krasnoyarsk State Agrarian University Bulletin. 2016; (8):144-149. Available at: http://www.kgau.ru/vestnik/2016_8/content/23.pdf (accessed 03.08.2020). (In Russ.)
11. Tseplyaev A.N., Lazarenko Ya.S. Results of Experimental Researches on Friction Coefficients Determination. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie* = News of the Nizhnevolzhsk Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education. 2012; (4):221-225. Available at: http://www.volgau.com/Portals/0/static/izvestiya_auk/izvestiya_2012_28_4.pdf?ver=2013-05-16-115944-073 (accessed 03.08.2020). (In Russ.)
12. Balashov A.V., Strygin S.P., Sinelnikov A.A., et al. Determination of Physical and Mechanical Properties of Soybean Seeds. *Nauka v Tsentralnoy Rossii* = Science in the Central Russia. 2017; (2):5-12. (In Russ.)
13. The Device for Determination of the Quiescent Friction Factor: Patent 2488094 Russian Federation. No. 2012107007/28; appl. 27.02.2012; publ. 20.07.2013. 6 p. (In Russ.)
14. Wojcik A., Fraczek J., Wota A.K. The Methodical Aspects of the Friction Modeling of Plant Granular Materials. *Powder Technology*. 2019; 344:504-513. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.037>
15. Chiputula J.P., Bucklin R.A., Blount A.R. Effect of Moisture Content on Coefficients of Friction between Triticale and Galvanized Steel. *Applied Engineering in Agriculture*. 2018; 34(3):599-602. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.13031/aea.12575>
16. Buryanov M.A., Chervyakov I.V., Buryanov A.V. The Influence of the Properties of Materials Used to Make the Working Bodies of Stripper Header on the Quality of the Performed Process. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2018; (3):54-61. Available at: <https://rucont.ru/efd/623610> (accessed 03.08.2020). (In Russ.)
17. Buryanov M.A., Buryanov A.I., Chervyakov I.V., et al. The Study Results of the Characteristics of Winter Wheat Variety 'Dmitry' to Substantiate Parameters and Regimes of Stripping Reaper Work. *Zernovoe khozyaystvo Rossii* = Grain Economy of Russia. 2017; (5):51-56. Available at: <https://www.zhros.ru/jour/article/view/102> (accessed 03.08.2020). (In Russ.)

Received 10.02.2020; revised 20.05.2020; published online 30.09.2020

About author:

Vladimir Yu. Savin, Associate Professor of Chair of Heat Engines and Hydromachines, Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University (2 Bazhenov St., Kaluga 248000, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: D-4378-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2476-9768>, savin.study@yandex.ru

Acknowledgments: The author thanks the staff of the Kaluga Research Institute of Agriculture, the Branch of Lorkh Federal Research Center of Potatoes for assistance in writing the article.

The author has read and approved the final manuscript.

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

УДК 621.65.03:620.178.162

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202003.426-447



Оценка технического состояния круглых шестеренных гидронасосов навесных гидросистем тракторов

**П. В. Чумаков^{1*}, А. В. Мартынов¹, А. В. Коломейченко²,
И. Х. Хасан³, А. С. Коломейченко⁴**

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

²ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» (г. Москва, Россия)

³Министерство науки и технологий (г. Багдад, Ирак)

⁴ФГБОУ ВО «Орловский ГАУ» (г. Орёл, Россия)

*pav-chumakov@yandex.ru

Введение. В условиях предприятий технического сервиса достоверная оценка технического состояния гидравлических шестеренных насосов навесных гидросистем тракторов является первоочередной задачей при внедрении в производство новых процессов ремонта. Отсутствие данных заводов-изготовителей о предельных значениях износов рабочих поверхностей деталей гидравлических насосов, при достижении которых принимается решение о ремонте, приводит к необходимости проведения дополнительных исследований. В связи с этим целью работы является поиск предельных значений износов рабочих поверхностей деталей круглых шестеренных гидронасосов.

Материалы и методы. Лабораторные стендовые испытания бывших в эксплуатации круглых шестеренных гидронасосов осуществлялись по разработанной в ГНУ ГОСНИТИ Россельхозакадемии методике на гидравлическом стенде КИ-28097М-ГОСНИТИ. Контролируемым параметром при проведении стендовых испытаний является коэффициент подачи насоса.

Результаты исследования. В работе представлены результаты лабораторных, стендовых и микрометражных исследований бывших в эксплуатации круглых шестеренных гидронасосов. Получена математическая зависимость (модель) коэффициентов подачи круглых шестеренных гидронасосов от износов рабочих поверхностей их деталей. Методом крутого восхождения по полученной математической модели определены предельные значения износов рабочих поверхностей деталей круглых шестеренных гидронасосов.

Обсуждение и заключение. По результатам входного стендового контроля бывших в эксплуатации круглых шестеренных насосов установлено, что 81 % исследуемых агрегатов эксплуатировался в запредельном состоянии. Установленные методом крутого восхождения предельные значения износов рабочих поверхностей деталей

© Чумаков П. В., Мартынов А. В., Коломейченко А. В., Хасан И. Х., Коломейченко А. С., 2020



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

круглых шестеренных гидронасосов позволяют сделать заключение о необходимости их восстановления при ремонте на предприятиях технического сервиса.

Ключевые слова: гидравлический насос, коэффициент подачи, техническое состояние, износ, микрометр

Для цитирования: Чумаков, П. В. Оценка технического состояния круглых шестеренных гидронасосов навесных гидросистем тракторов / П. В. Чумаков, А. В. Мартынов, А. В. Коломейченко [и др.]. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202003.426-447 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 3. – С. 426–447.

Evaluation of Technical Condition of Round Gear Hydraulic Pumps of Tractor Mounted Hydraulic Systems

P. V. Chumakov^{a*}, A. V. Martynov^a, A. V. Kolomeychenko^b,
I. H. Hasan^c, A. S. Kolomeychenko^d

^aNational Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

^bState Scientific Center NAMI (Moscow, Russia)

^cMinistry of Science and Technology (Baghdad, Iraq)

^dOrel State Agrarian University (Orel, Russia)

*pav-chumakov@yandex.ru

Introduction. In the technical service enterprises, the reliable estimation of a technical condition of hydraulic gear pumps of tractor mounted hydraulic systems is a priority in introducing new repair processes. The absence of data of manufacturing plants on limiting wear of working surfaces of hydraulic pump details, when the decision on repair is taken, leads to the necessity of carrying out additional researches. In this regard, the purpose of work is to find the limit wear values for working surfaces of details of round gear hydraulic pumps.

Materials and Methods. The laboratory tests of used round gear hydraulic pumps were carried out according to the method developed in the GOSNITI on the hydraulic bench of the KI-28097M-GOSNITI. The controlled parameter during tests is the pump delivery rate.

Results. The results of laboratory bench and micrometer studies of used round gear hydraulic pumps are presented in the work. The mathematical model of pump delivery rate dependence on statistically significant independent factors is obtained. The limit values for wear of working surfaces of round gear hydraulic pump details are determined by the steepest ascent method on the received mathematical model.

Discussion and Conclusion. According to the results of the input bench control of the used round gear pumps, 81% of the tested units were operated in the over-extreme limit state. The limit values for wear of working surfaces of round gear hydraulic pump details obtained by the steepest ascent method make it possible to make a conclusion about the necessity of their restoration in repairing at technical service enterprises.

Keywords: hydraulic pump, delivery rate, technical condition, wear, micrometry

For citation: Chumakov P.V., Martynov A.V., Kolomeychenko A.V., et al. Evaluation of Technical Condition of Round Gear Hydraulic Pumps of Tractor Mounted Hydraulic Systems. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(3):426-447. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.426-447>

Введение

Одним из основных агрегатов гидросистемы тракторов является гидравлический насос, который предназначен для преобразования части механиче-

ской энергии двигателя внутреннего сгорания трактора в энергию рабочей жидкости. При этом гидронасос способен приводить в движение одновременно несколько конечных элементов

гидросистемы (гидроцилиндров), а значит и рабочих органов машины.

Оценочным параметром технического состояния круглых шестеренных гидронасосов является коэффициент подачи η_Q . Согласно данным ряда источников коэффициент подачи новых шестеренных гидронасосов составляет 0,95...0,92 [1]. Для навесных гидросистем тракторов, согласно РТМ 70.0001.246-84, предельное значение коэффициента подачи принимается при его падении ниже 60 % от коэффициента подачи новых шестеренных гидронасосов [2].

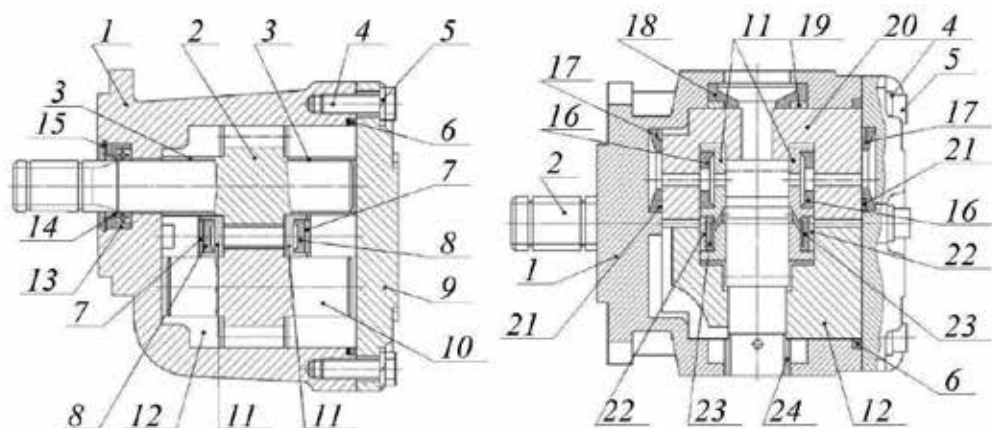
Согласно данным завода-изготовителя 80-процентный гамма-ресурс круглых шестеренных гидронасосов составляет 6 000 часов [3; 4]. Согласно исследованиям при работе шестеренных насосов в реальных условиях эксплуатации 80-процентный гамма-ресурс составляет 1 800...2 200 часов [5].

Конструкция круглых шестеренных гидронасосов представлена на рисунке 1.

Согласно устройству круглых шестеренных насосов, представленному на рисунке 1, поверхности под цапфами шестерен поджимной 20 и подшипниковой 12 полуобойм являются наиболее нагруженными узлами.

Износ посадочных мест под цапфы приводит к незначительному повороту поджимной обоймы 20, в связи с чем происходит нарушение ее прижима к подшипниковой обойме 12. При этом между наружным диаметром шестерни ведомой 10 и поверхностью обоймы поджимной 20 образуется утечка рабочей гидравлической жидкости [6].

Зазор в сопряжении «поджимная обойма 20 – корпус 1» значительно снижает работоспособность насоса на холостом ходу. Здесь поджимная



Р и с. 1. Устройство круглого шестеренного насоса: 1 – корпус гидронасоса; 2 – шестерня ведущая; 3 – вкладыши; 4 – винты крепления крышки гидронасоса; 5 – шайбы; 6 – кольцо уплотнительное; 7, 19, 21 и 22 – пластина опорная; 8, 16, 17, 18, 23 – манжета торцевого уплотнения; 9 – крышка насоса; 10 – шестерня ведомая; 11 – пластики; 12 – обойма подшипниковая; 13 – манжета ведущей шестерни; 14 – кольцо опорное; 15 – стопорное; 20 – обойма поджимная; 24 – втулка центрирующая

Fig. 1. Structure of a round gear pump: 1 – hydraulic pump case; 2 – driving gear; 3 – liners; 4 – hydraulic pump cover mounting screws; 5 – washers; 6 – sealing ring; 7, 19, 21 and 22 – support plate; 8, 16, 17, 18, 23 – mechanical seal cuff; 9 – pump cover; 10 – driven gear; 11 – plates; 12 – bearing ring; 13 – driving gear cuff; 14 – support ring; 15 – locking ring; 20 – preload ring; 24 – centering sleeve

обойма 20, скользя по манжете 18, поворачивается относительно цапф ведомой 10 и ведущей 2 шестерен. Таким образом увеличивается угол между плоскостями сопряжения обойм. Описанные процессы происходят в связи с возникновением износов рабочих поверхностей деталей, а также релаксационных процессов материала манжеты радиального уплотнения.

С одной стороны, возникновение износов рабочих поверхностей деталей насосов способствует образованию зазора в сопряжении «обойма 20 – корпус 1», с другой, – возникновению зазора (за счет увеличения межцентрового расстояния) между камерой нагнетания и камерой ведомой и ведущей шестерен.

За счет усилия, создаваемого давлением камеры, обеспечивается герметичное прижатие платиков 11 к торцам ведомой и ведущей шестерен. Выражение для расчета силы поджатия платиков 11 к торцам шестерен 2, 10 запишется:

$$F_m = f_1 p_{\text{нр}} - f_2 p_{\text{щ}}, \quad (1)$$

где f_1 – боковая площадь платика; $p_{\text{нр}}$ – давление нагнетания; f_2 – площадь контакта; $p_{\text{щ}}$ – давление в щели уплотнения [7].

Так как $f_2 / f_1 = 1,2 \dots 1,3 = \text{const}$, то с повышением давления $p_{\text{нр}}$ возрастает усилие прижима F_m [7]. Поэтому в круглых шестеренных насосах с увеличением усилия прижима уменьшается зазор в торцовом уплотнении, которое снижается с увеличением износа рабочих поверхностей деталей.

На основании проведенного анализа можно утверждать, что в период эксплуатации насоса его детали (корпус, шестерни, платики) испытывают напряжения, которые приводят к износам их контактирующих поверхностей, нарушению пространственной геометрии сопряжений и, как следствие, к образованию утечек и снижению объемной подачи агрегата.

В технической документации и технических требованиях на капитальный ремонт круглых шестеренных насосов отсутствуют данные о предельных значениях износов рабочих поверхностей деталей, при достижении которых дальнейшая эксплуатация агрегата не допустима. Однако значения предельных износов рабочих поверхностей деталей круглых гидравлических насосов необходимы для принятия решения об их восстановлении при ремонте. Целью работы является определение предельных значений износов рабочих поверхностей деталей круглых шестеренных гидронасосов.

Обзор литературы

В настоящее время существует множество способов восстановления рабочих поверхностей деталей круглых шестеренных гидронасосов, которые имеют свои преимущества и недостатки [8–10]. Однако потребность восстановления определяется предельными значениями износов деталей [11–14]. В связи с этим необходимо обоснование подхода к определению предельных значений износов рабочих поверхностей деталей круглых шестеренных гидронасосов с учетом наростки и критерия предельного состояния. Критерием предельного состояния круглых шестеренных гидронасосов является снижение коэффициента подачи менее 40 % [2].

По результатам исследования ряда авторов, снижение коэффициента объемной подачи шестеренных гидронасосов подчиняется закону, описываемому формулой [15–18]:

$$\eta(t) = \eta_0 - kt^\lambda, \text{ при } \eta_0 \geq \eta > \eta_{\text{пр}}, \quad (2)$$

где η_0 , $\eta_{\text{пр}}$ – номинальное (нормативное) и предельное значения коэффициента подачи гидронасоса соответственно; k – величина, характеризующая интенсивность снижения коэффициента подачи; λ – показатель степени, определяющий

характер изменения коэффициента подачи. Иллюстрация закона (2) приведена на рисунке 2.

По установленным при входном контроле значениям коэффициента подачи и наработки t_i средний остаточный ресурс шестеренных гидронасосов определяется по формуле [19; 20]:

$$t_{\text{ост}} = t_i \left[\left(\frac{\eta_0 - \eta_{\text{пр}}}{\eta_0 - \eta_i} - 1 \right)^{\frac{1}{\lambda}} \right]. \quad (3)$$

С целью установления предельных значений размеров рабочих поверхностей деталей шестеренных гидронасосов по величинам износов [17; 18], а также соответствующим значениям на момент исследования наработок строится динамика изнашивания [19–22]:

$$u(t) = V_c t^\theta + Z + u_1, \quad (4)$$

где $u(t)$ – износ рабочих поверхностей деталей, мкм; V_c – показатель скорости изменения износов рабочих поверхностей деталей u при $t = 1$, уменьшенный в θ раз; t – наработка до предельного состояния гидронасоса (ресурс); θ – показатель степени; Z – отклонение фактического изменения износов дета-

лей u от теоретической кривой; u_1 – показатель, характеризующий приработку деталей [23].

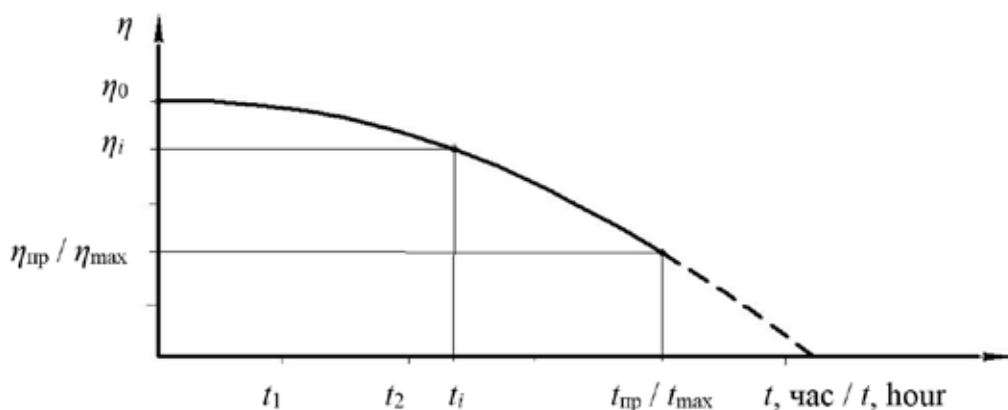
Наиболее правильным подходом в определении предельных и допустимых значений износов рабочих поверхностей деталей гидронасосов является множественная регрессия, которая показывает связь нескольких независимых переменных с зависимой переменной.

Зависимой переменной является параметр технического состояния гидронасоса (коэффициент подачи), а независимыми переменными – износы рабочих поверхностей деталей.

Материалы и методы

Оценка технического состояния бывших в эксплуатации круглых шестеренных насосов осуществлялась по допустимому значению коэффициента подачи η_0 . Допустимое значение коэффициента подачи составляет 0,5 от предельного [24]. Для круглых шестеренных насосов навесных гидросистем тракторов нормативное предельное значение коэффициента подачи составляет 0,4 [2]. Тогда допустимое значение коэффициента подачи составит 0,7.

Определение значения коэффициента подачи насоса осуществляется на стенде КИ-28097М-ГОСНИТИ по описанной ниже методике.



Р и с. 2. Характер зависимости изменения коэффициента подачи насоса от наработки

F i g. 2. Character of dependence of change of pump delivery rate on operating time

Используя соответствующие приспособления, насос устанавливают на стенд. Гидроукав напорной секции насоса соединяют с дросселем стенда, а гидроукав всасывания – с баком стенда. Поворотом рукоятки дросселя стенда определяют максимальное давление, развиваемое насосом.

В экспериментальные исследования входили гидронасосы, максимально развиваемое давление которых превышало номинальное значение.

Поворотом рукоятки дросселя стенда устанавливается номинальное для испытуемого насоса давление. Обнулив счетчик циклов, рукоятку трехходового крана поворачивают в положение «включено». Выбрав начало отсчета на шкале счетчика жидкости, включают счетчик циклов, по которому фиксируется контрольный объем масла: для гидронасосов марки НШ 32А – 60 л; для НШ 50А – 100 л; для НШ 100А – 200 л. Выключив счетчик импульсов, по зависимости, представленной на рисунке 3,

определяют действительную подачу насоса Q_d отдельно для каждой модели.

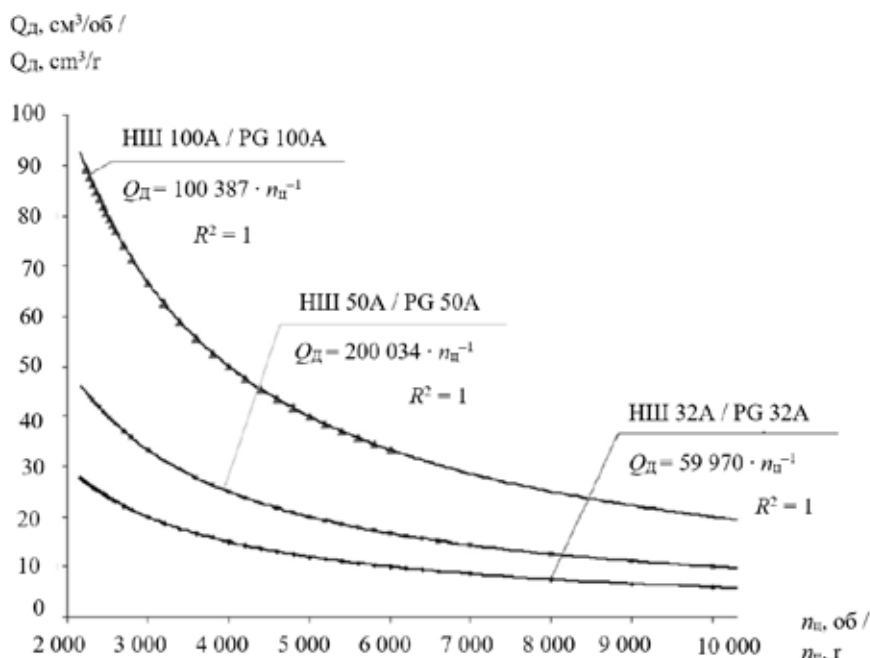
Затем по отношению действительной объемной подачи Q_d к теоретической объемной подаче Q_t определяется коэффициент подачи η_Q .

Для проведения микрометражных исследований приняты следующие поверхности: цапфы валов, наружный диаметр по вершинам зубьев, ширина зубьев шестерен, поверхности платиков, полуотверстия под цапфы валов поджимной обоймы, колодцы под шестерни валов поджимной обоймы.

Результаты исследования

Статистические параметры результатов стендовых испытаний технического состояния круглых шестеренных гидронасосов для исследуемых моделей представлены в таблице 1.

Для определения отношения независимых выборок к одной генеральной совокупности в статистических исследованиях широкое применение нашел критерий Стьюдента (t -критерий). Од-



Р и с. 3. Зависимость действительной подачи шестеренных гидронасосов от числа циклов

F i g. 3. Dependence of the actual supply of gear hydraulic pumps on the number of cycles

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Статистические параметры выборок круглых шестеренных гидронасосов
Statistical parameters of samples of round gear hydraulic pumps

Модель гидронасоса / Hydraulic pump model	N	\bar{X}	σ	Диапазон значений / Range of values		p_w
				X_{\max}	X_{\min}	
НШ 32А / PG 32А	50	0,3358	0,083	0,418	0,153	0,00000
НШ 50А / PG 50А	50	0,3327	0,082	0,415	0,152	0,00000
НШ 100А / PG 100А	50	0,3359	0,083	0,418	0,153	0,00000

нако для применения данного параметра необходима проверка нормальности распределения полученных выборок, которая осуществляется применением критерия Шапиро – Уилка (W).

Нулевая гипотеза гласит: «распределение измерений для каждой исследуемой модели насосов близко к нормальному, альтернативная – нет. Если уровень значимости текущего значения W -критерия p_w выше принятого значения $p = 0,05$, то имеет место нулевая гипотеза и наоборот» [25].

Согласно результатам таблицы 1 уровень значимости W -критерия $p_w < 0,05$, что говорит об отличии распределения значений выборок η_o исследуемых гидронасосов от нормального распределения.

В данном случае для оценки возможности объединения независимых выборок возникает необходимость применения критериев непараметрической статистики, в частности критерия Краскела – Уоллиса (KW). Согласно ре-

зультатам проверки выборок на расходимость критерий Краскела – Уоллиса составил $p_{KW} = 0,4792$, что больше порогового значения $p = 0,05$ и подтверждает возможность их объединения.

Методом максимального правдоподобия с применением программы Statistica осуществлялось определение параметров закона распределения объединенной выборки η_o . Качество подгонки оценивалось по критерию Холландера – Прошана (HP).

Гипотеза звучит так: «закон распределения коэффициента подачи насосов не согласуется с законом распределения Вейбулла, альтернативная – согласуется. Если уровень значимости текущего значения критерия p_{HP} ниже принятого значения $p = 0,05$, то имеет место нулевая гипотеза и наоборот» [25].

Коэффициент подачи насосов подчиняется закону распределения Вейбулла, параметры которого представлены в таблице 2. При помощи модуля «вероятностный калькулятор» про-

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

Параметры закона распределения Вейбулла коэффициента подачи насосов
Parameters of the Weibull distribution law pump feed ratio

Математическое ожидание функции / Expectation of function	μ	0,3420
Параметры закона распределения Вейбулла / The parameters of the law of Weibull distribution	α	0,3654
	b	5,2890
Критерий Холландера – Прошана / Hollander – Proshan Criterion	p_{HP}	0,1670

граммы Statistica определялось математическое ожидание двухпараметрической функции μ .

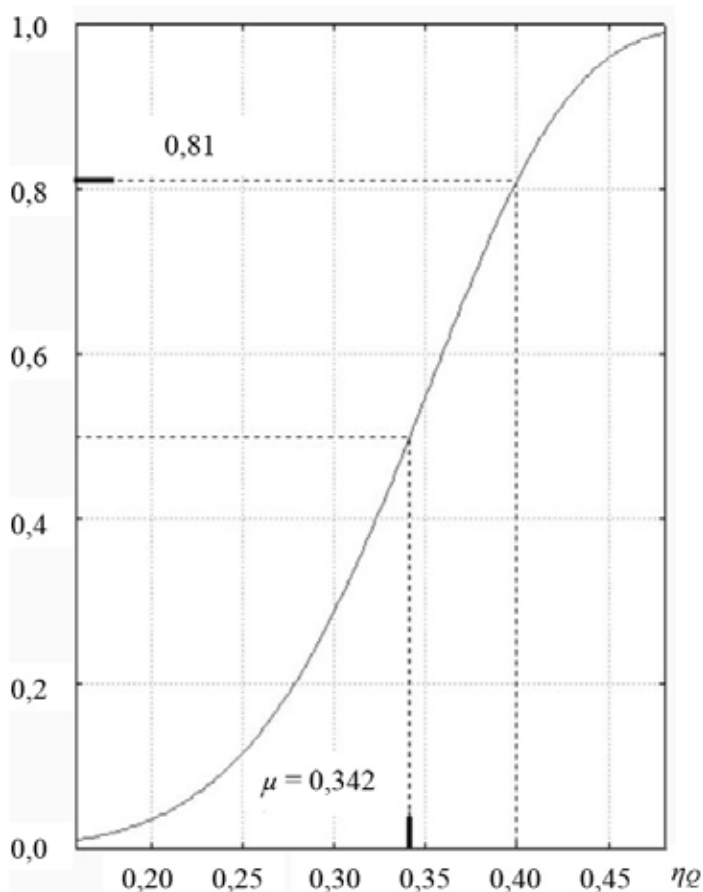
Согласно функции распределения коэффициента подачи, представленной на рисунке 4, доля эксплуатируемых в запредельном состоянии круглых шестеренных гидронасосов составляет 81 %.

Результаты микрометричных исследований рабочих поверхностей деталей шестеренных гидронасосов показали, что уровень значимости вариационных рядов износов менее 0,05, что отвергает нулевую гипотезу нормальности распределения выборок. В связи с этим

с целью сравнения выборок на расходимость применим критерий Краскела – Уоллиса (KW) (таблица 3).

Согласно результатам проверки выборок на расходимость уровень значимости критерия Краскела – Уоллиса превышает значение 0,05, что отвергает гипотезу их расхождения.

Применив программное обеспечение Statistica, методом максимального правдоподобия определили параметры закона распределения объединенных выборок износов, а математическое ожидание функции – при помощи «вероятностного калькулятора». Оценка



Р и с. 4. Функция распределения коэффициента подачи насоса

F i g. 4. Distribution function of the pump delivery rate

Сравнение исследуемых выборок по KW -критерию
Comparison of the studied samples by the KW -criterion

Выборка / Sample	KW -критерий / KW -criteria
Износ цапфы ведомой шестерни U_C^1 , мкм / Wear of the axle driven gear U_C^1 , μm	0,0841
Износ цапфы ведущей шестерни U_C^2 , мкм / Wear of the lead gear axle U_C^2 , μm	0,0882
Износ полуотверстий под шестерню ведомую поджимной обоймы U_p^1 , мкм / Wear of half-holes for driven gear of pressure holder U_p^1 , μm	0,0785
Износ полуотверстий под шестерню ведущую поджимной обоймы U_p^2 , мкм / Wear of semi-holes for the drive gear of pressure holder U_p^2 , μm	0,0836
Износ по ширине зубьев ведомой шестерни $U_{SH,Z}^1$, мкм / Wear over the width of the teeth of the driven gear $U_{SH,Z}^1$, μm	0,0801
Износ по ширине зубьев ведущей шестерни $U_{SH,Z}^2$, мкм / Wear over the width of the teeth of the drive gear $U_{SH,Z}^2$, μm	0,0820
Износ рабочей поверхности пластика первого U_{PL}^1 , мкм / Wear of the working surface of the first plate U_{PL}^1 , μm	0,0880
Износ рабочей поверхности пластика второго U_{PL}^2 , мкм / Wear of the working surface of the second plate U_{PL}^2 , μm	0,0827
Износ по вершинам зубьев ведомой шестерни $U_{V,Z}^1$, мкм / Wear on tips of driven gear teeth $U_{V,Z}^1$, μm	0,0968
Износ по вершинам зубьев ведущей шестерни $U_{V,Z}^2$, мкм / Wear on tips of drive gear teeth $U_{V,Z}^2$, μm	0,0924
Износ колодцев под ведомую шестерню поджимной обоймы U_K^1 , мкм / Wear of wells for driven gear of pressure holder U_K^1 , μm	0,0946
Износ колодцев под ведущую шестерню поджимной обоймы U_K^2 , мкм / Wear of wells for the drive gear of the pressure cage U_K^2 , μm	0,1001

качества подгонки осуществлялась при помощи критерия Холландера – Прошана (HP). Статистические характеристики объединенных выборок и параметры законов распределения представлены в таблице 4.

В работе В. В. Конева и коллег для проведения регрессионного анализа рекомендуется применять круглые шестеренные гидронасосы, у которых зафиксированы значения коэффициентов

подачи и соответствующие значения износов деталей [24].

При проведении регрессионного анализа зависимой переменной принят коэффициент подачи шестеренного гидронасоса η_Q , а независимыми переменными: U_C^1 – износ цапф шестерни ведомой, мкм; U_C^2 – износ цапф шестерни ведущей, мкм; U_p^1 – износ полуотверстий под шестерню ведомую обоймы поджимной, мкм; U_p^2 – износ

**Статистические характеристики объединенных износов рабочих поверхностей деталей
бывших в эксплуатации гидронасосов**

Statistical characteristics of combined wear of working surfaces of used hydraulic pump details

Объединенные выборки / Combined samples		\bar{X}	Диапазоны износов / Wear ranges		σ	Параметры Вейбулла распределения / Parameters of the Weibull distribution		μ	p_{HP}
			X_{\max}	X_{\min}		a	b		
U_C^1	мкм / μm	14,5	4	42	7,76	16,44	2,00	13,70	0,581
U_C^2		15,9	4	38	7,35	18,05	2,34	15,40	0,622
U_P^1		136,0	32	367	81,43	154,00	1,80	125,60	0,461
U_P^2		139,1	32	389	83,20	157,54	1,81	128,60	0,449
$U_{SH.Z}^1$		79,6	18	224	41,70	90,14	2,04	75,30	0,779
$U_{SH.Z}^2$		82,4	16	235	44,08	93,33	1,99	77,60	0,774
U_{PL}^1		171,1	25	440	106,98	191,30	1,63	152,80	0,958
U_{PL}^2		174,2	26	446	106,91	195,20	1,67	156,70	0,959
$U_{V.Z}^1$		79,1	12	211	43,23	89,45	1,94	74,10	0,774
$U_{V.Z}^2$		81,8	16	219	43,12	92,69	2,03	77,38	0,685
U_K^1		31,9	8	72	15,28	36,15	2,25	30,72	0,706
U_K^2		35,1	10	81	16,47	39,82	2,31	33,98	0,707

полуотверстий под шестерню ведущую обоймы поджимной, мкм; $U_{SH.Z}^1$ – износ по ширине зубьев шестерни ведомой, мкм; $U_{SH.Z}^2$ – износ по ширине зубьев шестерни ведущей, мкм; U_{PL}^1 – износ рабочей поверхности пластика первого, мкм; U_{PL}^2 – износ рабочей поверхности пластика второго, мкм; $U_{V.Z}^1$ – износ по вершинам зубьев шестерни ведомой, мкм; $U_{V.Z}^2$ – износ по вершинам зубьев шестерни ведущей, мкм; U_K^1 – износ колодцев под шестерню ведомую

обоймы поджимной, мкм; U_K^2 – износ колодцев под шестерню ведущую обоймы поджимной, мкм.

Однородность исследуемых выборок проверяли по критерию Манна – Уитни. Статистические параметры вариационных рядов представлены в таблице 5.

Согласно результатам, представленным в таблице 5, уровень значимости критерия Манна – Уитни p_U для исследуемых выборок значительно превыша-

Статистические параметры и оценка однородности объединенных выборок
Statistical parameters and estimation of homogeneity of combined samples

Объединенные выборки / Combined samples		N	\bar{X}	Диапазон износа / Wear range		σ	p_U
				Xmax	Xmin		
U_C^1	мм / μm	120	14,800	4,000	42,000	8,79	0,790
U_C^2			16,900	2,000	47,000	11,42	0,681
U_P^1			143,000	39,000	365,000	75,37	0,311
U_P^2			145,000	25,000	380,000	86,10	0,577
$U_{SH.Z}^1$			80,500	11,000	200,000	45,68	0,926
$U_{SH.Z}^2$			81,600	16,000	209,000	46,75	0,821
U_{PL}^1			166,900	18,000	440,000	106,74	0,863
U_{PL}^2			176,500	44,000	439,000	95,45	0,550
$U_{V.Z}^1$			81,800	10,000	236,000	52,04	0,745
$U_{V.Z}^2$			85,400	10,000	210,000	45,45	0,595
U_K^1			32,820	4,000	108,000	22,72	0,481
U_K^2			35,200	8,000	110,000	18,50	0,817
η_Q			0,311	0,130	0,418	0,09	0,128

ет 5-процентный пороговый уровень, что говорит об их однородности.

Уравнение линейной множественной регрессии в натуральном масштабе имеет вид:

$$\begin{aligned} \eta_C = & \beta_0 + \beta_1 \cdot U_C^1 + \beta_2 \cdot U_C^2 + \\ & + \beta_3 \cdot U_P^1 + \beta_4 \cdot U_P^2 + \beta_5 \cdot U_{SH.Z}^1 + \\ & + \beta_6 \cdot U_{SH.Z}^2 + \beta_7 \cdot U_{PL}^1 + \\ & + \beta_8 \cdot U_{PL}^2 + \beta_9 \cdot U_{V.Z}^1 + \\ & + \beta_{10} \cdot U_{V.Z}^2 + \beta_{11} \cdot U_K^1 + \beta_{12} \cdot U_K^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Корреляционный анализ уравнения (5) показал, что коэффициент мно-

жественной корреляции между зависимой и независимыми переменными равен $R = 0,986$, а коэффициент детерминации $R^2 = 0,974$ ($\bar{R}^2 = 0,971$), то есть полученное уравнение регрессии показывает 97-процентный разброс значений коэффициента подачи относительно среднего значения бывших в эксплуатации шестеренных гидронасосов.

В таблице 6 представлены значения попарных коэффициентов корреляции между зависимыми и независимыми факторами.

Согласно данным таблицы 6 наблюдается отсутствие связи между независимыми факторами, что позволяет их

Таблица 6
Table 6

Попарные коэффициенты корреляции между факторами
The values of pairwise correlation coefficients between the factors

Факторы / Factors	Коэффициенты корреляции / Correlation coefficient												η_Q
	U_C^1	U_C^2	U_P^1	U_P^2	$U_{SH,Z}^1$	$U_{SH,Z}^2$	U_{PL}^1	U_{PL}^2	$U_{V,Z}^1$	$U_{V,Z}^2$	U_K^1	U_K^2	
U_C^1	1,00	0,95	0,93	0,95	0,95	0,99	0,94	0,94	0,96	0,92	0,94	0,93	-0,95
U_C^2	0,95	1,00	0,95	0,97	0,97	0,97	0,95	0,96	0,96	0,94	0,97	0,96	-0,97
U_P^1	0,93	0,95	1,00	0,93	0,94	0,95	0,94	0,91	0,95	0,93	0,93	0,94	-0,96
U_P^2	0,94	0,97	0,93	1,00	0,99	0,96	0,96	0,95	0,97	0,93	0,94	0,95	-0,95
$U_{SH,Z}^1$	0,95	0,97	0,94	0,99	1,00	0,96	0,97	0,95	0,97	0,93	0,93	0,95	-0,95
$U_{SH,Z}^2$	0,99	0,97	0,95	0,96	0,96	1,00	0,95	0,95	0,97	0,9	0,95	0,94	-0,96
U_{PL}^1	0,94	0,95	0,94	0,96	0,97	0,95	1,00	0,95	0,98	0,92	0,93	0,94	-0,95
U_{PL}^2	0,94	0,96	0,91	0,95	0,95	0,95	0,95	1,00	0,95	0,92	0,94	0,93	-0,95
$U_{V,Z}^1$	0,96	0,96	0,95	0,97	0,97	0,97	0,98	0,95	1,00	0,93	0,94	0,95	-0,95
$U_{V,Z}^2$	0,92	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92	0,93	1,00	0,92	0,90	-0,91
U_K^1	0,94	0,97	0,93	0,93	0,93	0,95	0,93	0,94	0,94	0,92	1,00	0,94	-0,94
U_K^2	0,93	0,96	0,94	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,95	0,90	0,94	1,00	-0,93
η_Q	-0,95	-0,97	-0,96	-0,95	-0,95	-0,96	-0,95	-0,95	-0,95	-0,91	-0,94	-0,93	1,00

применять в многофакторном регрессионном анализе.

По результатам оценки неизвестных коэффициентов уравнения (5) выявлена их статистическая значимость, в связи с чем они приняты для дальнейшего анализа.

Коэффициенты статистической связи между независимыми факторами и зависимой переменной, полученные многофакторным регрессионным анализом, представлены в таблице 7.

Согласно результатам таблицы 7 для каждого независимого фактора уровень значимости критерия Стьюдента (p_i) ниже принятого значения $p_i = 0,005$, что подтверждает связь коэффициента по-

дачи насоса НШ серии А от всех принятых для исследования износос рабочих поверхностей деталей.

Таким образом, математическая модель связи коэффициента подачи насоса и независимых факторов записывается:

$$\begin{aligned} \eta_Q = & 0,450879 - 0,005507 \cdot U_C^1 - \\ & - 0,005588 \cdot U_C^2 - 0,000631 \cdot U_P^1 - \\ & 0,00043 \cdot U_P^2 + 0,000772 \cdot U_{SH,Z}^1 + \\ & + 0,000776 \cdot U_{SH,Z}^2 - 0,000255 \cdot U_{PL}^1 - \\ & - 0,000145 \cdot U_{PL}^2 + 0,000407 \cdot U_{V,Z}^1 + \\ & + 0,000426 \cdot U_{V,Z}^2 + 0,000646 \cdot U_K^1 + \\ & + 0,001159 \cdot U_K^2 \end{aligned} \quad (6)$$

Т а б л и ц а 7

Table 7

Коэффициенты статистической связи между независимыми факторами и зависимой переменной

Coefficients of the statistical relationship between independent factors and a dependent variable

N = 120	Множественный регрессионный анализ: зависимая переменная η_Q / Multiple regression analysis: dependent variable η_Q $R = 0,986$; $R^2 = 0,974$; $F = 334,45$; $S_{v/\Sigma} = 0,015$					
	b_i	Стандартная ошибка b_i / Standard error b_i	β_i	Стандартная ошибка β_i / Standard error β_i	$t(107)$	p_i -уровень / p_i -level
Свободный член β_0 / Free member β_0	—	—	0,450879	0,005249	85,89374	0,000000
U_C^1	-0,536494	0,101716	-0,005507	0,001044	-5,27441	0,000001
U_C^2	-0,706618	0,110604	-0,005588	0,000875	-6,38873	0,000000
U_P^1	-0,526533	0,061685	-0,000631	0,000074	-8,53585	0,000000
U_P^2	-0,409875	0,157847	-0,000430	0,000165	-2,59665	0,010737
$U_{SH,Z}^1$	0,390446	0,160855	0,000772	0,000318	2,42731	0,016881
$U_{SH,Z}^2$	0,402034	0,125289	0,000776	0,000242	3,20886	0,001759
U_{PL}^1	-0,302038	0,094454	-0,000255	0,000080	-3,19772	0,001822
U_{PL}^2	-0,153396	0,064721	-0,000145	0,000061	-2,37012	0,019573
$U_{V,Z}^1$	0,234337	0,109213	0,000407	0,000189	2,14569	0,034159
$U_{V,Z}^2$	0,214251	0,053170	0,000426	0,000106	4,02955	0,000105
U_K^1	0,162526	0,068433	0,000646	0,000272	2,37496	0,019331
U_K^2	0,237451	0,066637	0,001159	0,000325	3,56335	0,000548

Высокая значимость полученной регрессии (6) подтверждена проверкой по критерию Фишера, согласно результатам которой расчетное значение составило $F = 334,45$, что значительно больше критического $F_{кр} = 12,107$.

Значение стандартной ошибки (меры рассеяния) экспериментальных значений относительно регрессионной прямой составило $S_{\bar{y}/\Sigma z} = 0,015$, что отличается от среднего значения функции отклика, равного 0,016, менее чем на 5 %.

Проведенная оценка остатков по критерию Дарбина – Уотсона показала: $d = 1,8 > DU - 12(d_{кр}) = 1,78$, что подтверждает независимость остатков регрессионной модели (6) на 5-процентном уровне [26].

С целью проверки полученной регрессионной модели (6) на адекватность рассмотрим график распределения остатков, представленный на рисунке 5.

Из графика, представленного на рисунке 5, видно, что остатки функции отклика имеют нормальное распределе-

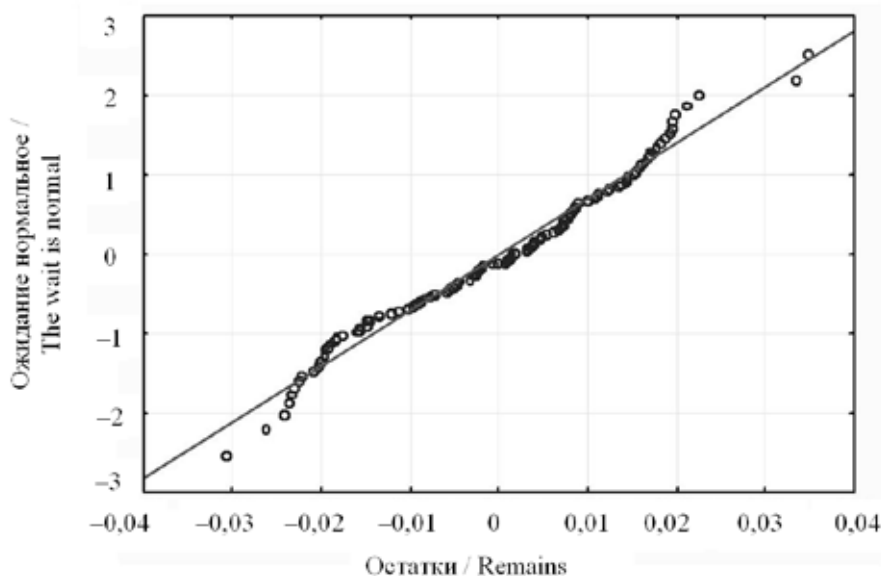
ние, что также подтверждает уровень значимости W -критерия, равный 0,062.

Из представленных на рисунке 6 экспериментальных величин остатков следует, что они разбросаны хаотически, слабо коррелированы между собой, а также отсутствует закономерность в их поведении.

Согласно исследованным критериям полученная математическая модель (6) адекватно описывает связь коэффициента подачи насоса с независимыми факторами (износами).

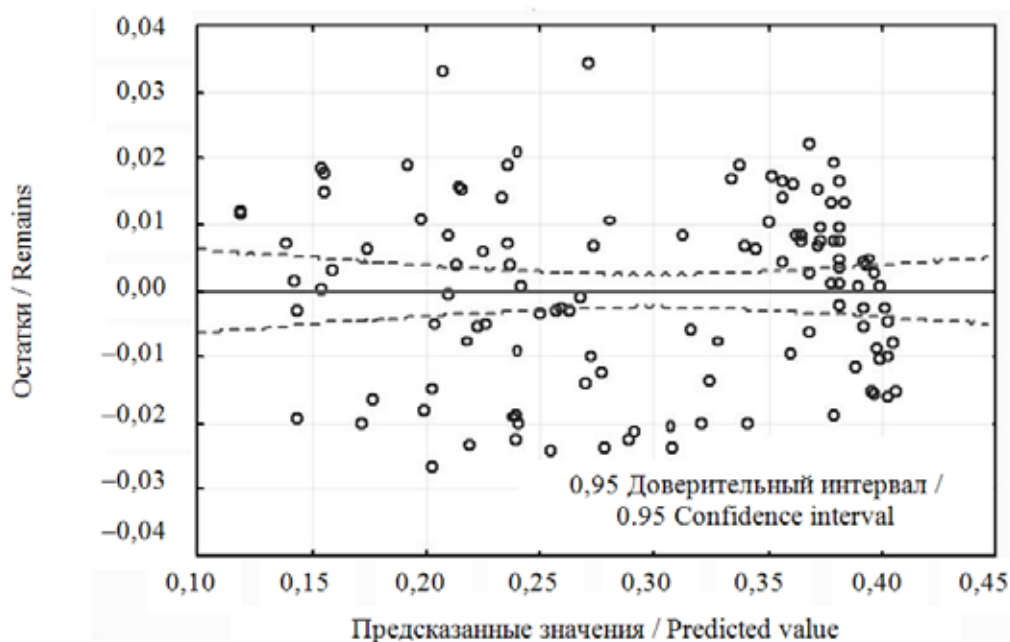
Проверка регрессии (6) по среднему значению показала, что расчетное значение $\eta_o = 0,3112$ превышает среднее значение функции отклика $\bar{\eta}_o = 0,3111$, полученного экспериментально, менее чем на 0,03 %.

Согласно анализу значений стандартизированного коэффициента регрессии независимых факторов по модулю $|b_i|$ наибольшее влияние на зависимую переменную η_o оказывают: износ поверхности цапф шестерни ведущей ($|b_i| = |0,706618|$); износ поверхности цапф



Р и с. 5. Графическая зависимость нормального распределения остатков

F i g. 5. The graphical dependence of the normal distribution of the remains



Р и с. 6. Разброс экспериментальных величин остатков и удаленных остатков

F i g. 6. Spread of experimental values of remains and deleted remfins

шестерни ведомой ($|b_i| = |0,536494|$); износ поверхности подшипниковой полуобоймы под шестерню ведомую ($|b_i| = |0,526533|$); износ поверхности подшипниковой полуобоймы под шестерню ведущую ($|b_i| = |0,40985|$).

Из анализа принципа работы, конструктивных особенностей круглых шестеренных насосов и проведенных статистических исследований можно утверждать, что данные сопряжения являются ресурсопределяющими для агрегата в целом.

Методом крутого восхождения найдем значения износов рабочих поверхностей деталей насоса, соответствующие предельному значению коэффициента подачи, равному $\eta_o = 0,4$.

Произведение $\beta_i \cdot \Delta X_i$ вычислялось по каждому фактору (табл. 8). Максимальное значение фактора составило

0,1257 для U_C^2 , в связи с чем этот фактор принят за базовый.

Параметры метода крутого восхождения представлены в таблице 8, где: $\lambda_{ш}$ – начальный шаг эксперимента; μ – значение сдвига крутого восхождения по базовому фактору, $\mu = 0,1$; $\lambda_{ш}(\beta_i \cdot \Delta X_i)$ – шаг фактора.

Согласно таблице 8 предельное значение коэффициента подачи гидронасоса, равное 0,4, соответствует 11-му шагу. В связи с этим установлены предельные значения износов рабочих поверхностей деталей круглых шестеренных гидронасосов: износ цапфы шестерни ведомой $U_C^1 = 23$ мкм; износ цапфы шестерни ведущей $U_C^2 = 25$ мкм; износ полуотверстий под шестерню ведомую поджимной обоймы $U_p^1 = 202$ мкм; износ полуотверстий под шестерню ведущую поджимной обоймы $U_p^2 = 203$ мкм;

Таблица 8
Table 8

Параметры метода крутого восхождения
The parameters of the steepest ascent method

Параметр / Parameter	МКМ / μm										η_Q			
	U_C^1	U_C^2	U_P^1	U_P^2	$U_{SH,Z}^1$	$U_{SH,Z}^2$	U_{PL}^1	U_{PL}^2	$U_{V,Z}^1$	$U_{V,Z}^2$				
X_{\min}	4	2	39	25	11	16	18	44	10	10	4	8		
X_{\max}	42	47	365	380	200	209	440	439	236	210	108	110		
β_i	0,00551	0,00559	0,00063	0,0004	0,00077	0,00078	0,00026	0,00015	0,00041	0,00043	0,00065	0,00116		
ΔX	19	22,5	163	177,5	94,5	96,5	211	197,5	113	100	52	51		
$X_{\text{осн}}$	23	24,5	202	202,5	105,5	112,5	230	241,5	123	110	56	59		
$\beta_i \cdot \Delta X$	0,10463	0,1257	0,10285	0,07632	0,07488	0,07488	0,0538	0,02863	0,04599	0,0426	0,03359	0,0591		
$\lambda_{\text{м}} = \mu / \beta_{\phi} $	18,15	17,89	158,48	232,57	126,2	128,87	392,19	689,83	245,7	234,74	154,8	82,29		
$\lambda_{\text{м}}(\beta_i \cdot \Delta X_i)$	1,9	2,25	16,3	17,75	9,45	9,65	21,1	19,75	11,3	10	5,2	5,1		
Опыты на линии восхождения / Experiments on the line of ascent														
1	4	2	39	25	11	16	18	44	10	10	4	8	0,43394	
2	5,9	4,25	55,3	42,75	20,45	25,65	39,1	63,75	21,3	20	9,2	13,1	0,41004	
–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
11	23,0	24,5	202,0	202,5	105,5	112,5	229,0	241,5	123,0	110,0	56,0	59,0	0,40086	
12	24,9	26,75	218,3	220,25	114,95	122,15	250,1	261,25	134,3	120	61,2	64,1	0,39984	
13	26,8	29	234,6	238	124,4	131,8	271,2	281	145,6	130	66,4	69,2	0,39882	
14	28,7	31,25	250,9	255,75	133,85	141,45	292,3	300,75	156,9	140	71,6	74,3	0,39780	
15	30,6	33,5	267,2	273,5	143,3	151,1	313,4	320,5	168,2	150	76,8	79,4	0,39678	
16	32,5	35,75	283,5	291,25	152,75	160,75	334,5	340,25	179,5	160	82	84,5	0,39576	

износ по ширине зубьев шестерни ведомой $U_{SH.Z}^1 = 106$ мкм; износ по ширине зубьев шестерни ведущей $U_{SH.Z}^2 = 113$ мкм; износ рабочей поверхности пластика первого $U_{PL}^1 = 229$ мкм; износ рабочей поверхности пластика второго $U_{PL}^2 = 242$ мкм; износ по вершинам зубьев шестерни ведомой $U_{V.Z}^1 = 123$ мкм; износ по вершинам зубьев шестерни ведущей $U_{V.Z}^2 = 110$ мкм; износ колодцев под шестерню ведомую поджимной обоймы $U_K^1 = 56$ мкм; износ колодцев под шестерню ведущую поджимной обоймы $U_K^2 = 59$ мкм. Коэффициент подачи гидронасосов при округленных значениях износов составил 0,398.

Обсуждение и заключение

В результате проведенных стендовых испытаний бывших в эксплуатации круглых шестеренных гидрона-

сосов можно сделать вывод, что 81 % насосов эксплуатировался в запредельном состоянии.

По регрессионной модели связи коэффициента подачи круглых шестеренных гидронасосов с износами рабочих поверхностей деталей установлены их предельные значения: $U_C^1 = 23$ мкм, $U_C^2 = 25$ мкм, $U_P^1 = 202$ мкм, $U_P^2 = 203$ мкм, $U_{SH.Z}^1 = 106$ мкм, $U_{SH.Z}^2 = 113$ мкм, $U_{PL}^1 = 229$ мкм, $U_{PL}^2 = 242$ мкм, $U_{V.Z}^1 = 123$ мкм, $U_{V.Z}^2 = 110$ мкм, $U_K^1 = 56$ мкм, $U_K^2 = 59$ мкм. По этим значениям износов рабочих поверхностей деталей круглых шестеренных гидронасосов принимается решение об их восстановлении.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Величко, С. А. Ресурс и допустимое значение коэффициента полезного действия шестеренных круглых гидронасосов / С. А. Величко, Ф. Х. Бурумкулов, П. А. Ионов // Техника в сельском хозяйстве. – 2011. – № 2. – С. 26–28. – URL: http://foliant.ru/catalog/psulibr?SHOW_ONE_BOOK+4130E2 (дата обращения: 06.08.2020).
2. Величко, С. А. Оценка показателей G-процентного ресурса новых и отремонтированных по новой технологии агрегатов навесных гидросистем тракторов / С. А. Величко, П. В. Сенин, А. В. Мартынов // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы. – 2016. – С. 77–87.
3. Бурумкулов, Ф. Х. Ресурсосбережение на основе повышения межремонтной наработки изделия / Ф. Х. Бурумкулов, С. А. Величко, П. В. Чумаков // Труды ГОСНИТИ. – 2012. – № 1. – С. 110–114.
4. Величко, С. А. Ремонт агрегатов машин с восстановлением показателей безотказности и долговечности на уровне нового изделия / С. А. Величко // Труды ГОСНИТИ. – 2013. – Т. 111, № 2. – С. 19–23. – Рез. англ.
5. Басинюк, В. Л. Система мобильного мониторинга гидропривода навесных устройств энергонасыщенных тракторов / В. Л. Басинюк, А. С. Калинин, И. Н. Усс [и др.] // Наука и техника. – 2013. – № 5. – С. 49–54. – URL: <https://sat.bntu.by/jour/article/view/231> (дата обращения: 06.08.2020). – Рез. англ.
6. Сенин, П. В. Восстановление круглых шестеренных гидронасосов типа НШ-К комбинированным методом / П. В. Сенин, Е. А. Нуязин, П. А. Ионов [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – № 10. – С. 42–43. – Рез. англ.
7. Рылякин, Е. Г. Исследование интенсивности изнашивания ресурсопределяющих сопряжений гидронасосов / Е. Г. Рылякин // Молодой ученый. – 2014. – № 8. – С. 243–246. – URL: <https://moluch.ru/archive/67/11188> (дата обращения: 06.08.2020). – Рез. англ.

8. **Котомчин, А. Н.** Восстановление деталей узлов и агрегатов техники, работающих при гидроабразивном изнашивании / А. Н. Котомчин, Е. Ю. Ляхов. – DOI 10.31044/1684-2561-2019-0-5-8-12 // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2019. – № 5. – С. 8–12. – URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2924 (дата обращения: 06.08.2020). – Рез. англ.
9. **Коломейченко, А. В.** Износостойкость МДО-покрытий, сформированных на алюминиевых сплавах АОЗ-7 и АК7Ч / А. В. Коломейченко, В. Н. Логачев // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2006. – № 8. – С. 44–46. – URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=444 (дата обращения: 06.08.2020). – Рез. англ.
10. **Хромов, В. Н.** Технология восстановления корпуса шестеренного насоса термопластическим деформированием / В. Н. Хромов, И. К. Сенченков, А. В. Коломейченко [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2006. – № 9. – С. 11–15. – URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=445 (дата обращения: 06.08.2020). – Рез. англ.
11. **Коломейченко, А. В.** Анализ внутренних напряжений корпуса восстановленного шестеренного насоса / А. В. Коломейченко, В. Н. Логачев // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 7. – С. 33–34.
12. **Величко, С. А.** Восстановление шестерен гидронасосов НШ-А методом свободных ремонтных размеров / С. А. Величко, А. В. Мартынов // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 2. – С. 47–49.
13. **Бурумкулов, Ф. Х.** Повышение ресурса агрегатов созданием на рабочих поверхностях деталей наноструктурированных покрытий / Ф. Х. Бурумкулов, С. А. Величко, А. М. Давыдкин [и др.] // Технология металлов. – 2008. – № 1. – С. 2–7.
14. **Бурумкулов, Ф. Х.** Нанозлектротехнологии для повышения межремонтного ресурса агрегатов машинно-тракторного парка сельского хозяйства / Ф. Х. Бурумкулов, С. А. Величко, В. И. Иванов [и др.] // Труды ГОСНИТИ. – 2007. – Т. 99. – С. 85–94.
15. **Shia, L.** Numerical Simulation and Experimental Study on the Comparison of the Hydraulic Characteristics of an Axial-Flow Pump and a Full Tubular Pump / L. Shia, W. Zhanga, H. Jiaoa [et al.]. – DOI 10.1016/j.renene.2020.02.082 // Renewable Energy. – 2020. – Vol. 153. – Pp. 1455–1464. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148120302779?via%3Dihub> (дата обращения: 06.08.2020).
16. **Bedotti, A.** Dynamic Modelling of the Swash Plate of a Hydraulic Axial Piston Pump for Condition Monitoring Applications / A. Bedotti, M. Pastori, F. Scolari [et al.]. – DOI 10.1016/j.egypro.2018.08.077 // Energy Procedia. – 2018. – Vol. 148. – Pp. 266–273. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218303709?via%3Dihub> (дата обращения: 06.08.2020).
17. **Gao, Y.** Wavelet Packet and Residual Analysis Based Method for Hydraulic Pump Health Diagnosis / Y. Gao, Q. Zhang. – DOI 10.1243/09544070JAUTO253 // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. – 2006. – Vol. 220, no. 6. – Pp. 735–745. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1243/09544070JAUTO253> (дата обращения: 06.08.2020).
18. **Casoli, P.** Overall Efficiency Evaluation of a Hydraulic Pump with External Drainage through Temperature Measurements / P. Casoli, F. Campanini, A. Bedotti [et al.]. – DOI 10.1115/1.4039084 // Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. – 2018. – Vol. 140, Issue 8. – 9 p. – URL: <https://asmedigitalcollection.asme.org/dynamicsystems/article-abstract/140/8/081005/439974/Overall-Efficiency-Evaluation-of-a-Hydraulic-Pump?redirectedFrom=fulltext> (дата обращения: 06.08.2020).
19. **Frith, R. H.** Comparison of an External Gear Pump Wear Model with Test Data / R. H. Frith, W. Scott. – DOI 10.1016/0043-1648(95)06845-7 // Wear. – 1996. – Vol. 196, no. 1. – Pp. 64–71. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0043164895068457?via%3Dihub> (дата обращения: 06.08.2020).
20. **Battarra, M.** On the Assessment of Lumped Parameter Models for Gearpump Performance Prediction / M. Battarra, E. Mucchi. – DOI 10.1016/j.simpat.2019.102008 // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2019. – Vol. 99. – Pp. 34–40. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1569190X19301418?via%3Dihub> (дата обращения: 06.08.2020).

21. **Нан, М.** Reliability Analysis of a Hydraulic Pump / М. Нан // Journal of Mechanical Engineering. – 2002. – Vol. 38, no. 1. – Pp. 10–15. – URL: https://www.researchgate.net/publication/245444192_Reliability_analysis_of_a_hydraulic_pump (дата обращения: 06.08.2020).

22. **Ткач, З.** Experimental Hydraulic Device for the Testing of Hydraulic Pumps and Liquids / Z. Tkáč, J. Kosiba, L. Hujo [et al.]. – DOI 10.24874/ti.2018.40.01.14 // Tribology in Industry. – 2018. – Vol. 40, no. 1. – Pp. 149–155. – URL: <http://www.tribology.rs/journals/2018/2018-1/2018-1-14.html> (дата обращения: 06.08.2020).

23. **Пумпур, Е. В.** Применение аддитивных технологий для ремонта гидропривода горных машин на примере шестеренного насоса НШ-32 / Е. В. Пумпур // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2016. – № 1. – С. 311–314.

24. **Конев, В. В.** Экспериментальные исследования гидропривода строительно-дорожных машин / В. В. Конев, С. П. Пирогов, Д. М. Бородин [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – С. 68. – URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=17665> (дата обращения: 06.08.2020). – Рез. англ.

25. **Боровиков, В. П.** Мнение профессионала / В. П. Боровиков // Автотранспортное предприятие. – 2010. – № 2. – С. 14–15.

26. **Боровиков, В. П.** Об асимптотическом распределении статистик, основанных на выборочных промежутках, с оцененными параметрами / В. П. Боровиков. – DOI 10.4213/tvp2791// Теория вероятности и ее применения. – 1996. – Т. 41, № 1. – С. 181–186. – URL: http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=tvp&paperid=2791&option_lang=rus (дата обращения: 06.08.2020). – Рез. англ.

Поступила 06.02.2020; принята к публикации 16.04.2020; опубликована онлайн 30.09.2020

Об авторах:

Чумаков Павел Васильевич, доцент кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), кандидат технических наук, Researcher ID: G-8320-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8504-5907>, pav-chumakov@yandex.ru

Мартынов Алексей Владимирович, доцент кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), кандидат технических наук, Researcher ID: AAR-8786-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4744-4373>, martynov-230685@yandex.ru

Коломейченко Александр Викторович, заведующий отделом Управления перспективных технологий Центра сельскохозяйственного машиностроения ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» (125438, Россия, г. Москва, ул. Автомоторная, д. 2), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: D-6053-2019, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3865-4486>, a.kolomeychenko@nami.ru

Хасан Исмаил Халил, научный сотрудник лаборатории материаловедения Министерства науки и технологий (765, Ирак, г. Багдад, аль-Джадрия), Researcher ID: C-5025-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4560-1016>, storismael@gmail.com

Коломейченко Алла Сергеевна, заведующий кафедрой информационных технологий и математики ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет» (302019, Россия, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69), кандидат экономических наук, доцент, Researcher ID: AAR-8498-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7200-8819>, alla.kolomeychenko@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

П. В. Чумаков – анализ литературных данных, разработка методики, анализ регрессионной модели; А. В. Мартынов – статистическая обработка данных, получение регрессионной модели



связи объемной подачи круглых гидронасосов с износами рабочих поверхностей деталей; А. В. Колмейченко – постановка задачи исследования, накопление статистических данных; И. Х. Хасан – проведение микрометрических исследований деталей круглых шестеренных гидронасосов; А. С. Колмейченко – анализ и построение графических зависимостей распределения.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Velichko S.A., Burumkulov F.Kh., Ionov P.A. Resource and Permissible Value of Efficiency Coefficient of Gear Circular Hydraulic Pumps. *Tekhnika v selskom khozyaystve* = Machinery in Agriculture. 2011; (2):26-28. Available at: http://foliant.ru/catalog/psulibr?SHOW_ONE_BOOK+4130E2 (accessed 06.08.2020). (In Russ.)
2. Velichko S.A., Senin P.V., Martynov A.V. Assessment of G-Percent Service Life of New and Repaired Tractor Mounted Hydraulic System Units Using a New Technology. *Energoeffektivnye i resursoberegayushchie tekhnologii i sistemy* = Energy-Efficient and Resource-Saving Technologies and Systems. 2016; Pp. 77-87. (In Russ.)
3. Burumkulov F.H., Velichko S.A., Chumakov P.V. Resource-Based on the Basis of Increase of the Between-Repairs Operating Time of the Product. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2012; (1):110-114. (In Russ.)
4. Velichko S.A. Repair of Units of Cars with Restoration of Indicators of Non-Failure Operation and Durability at the Level of a New Product. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2013; 111(2):19-23. (In Russ.)
5. Basinyuk V.L., Kalinichenko A.S., Uss I.N., et al. Mobile Monitoring System for Suspension Hydraulic Drives of High-Power Tractors. *Nauka i tekhnika* = Science and Technology. 2013; (5):49-54. Available at: <https://sat.bntu.by/jour/article/view/231> (accessed 06.08.2020). (In Russ.)
6. Senin P.V., Nuyanzin Ye.A., Ionov P.A., et al. Renewal of NSh-K Round Gear Type Hydraulic Pumps with the Use of Combined Method. *Traktory i selkhozmachiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2012; (10):42-43. (In Russ.)
7. Rylyakin Ye.G. Study of the Wear Rate of the Resource-Determining Conjugations of Hydraulic Pumps. *Molodoy uchenyy* = Young Scientist. 2014; (8):243-246. Available at: <https://moluch.ru/archive/67/11188> (accessed 06.08.2020). (In Russ.)
8. Kotomchin A.N., Lyakhov Ye. Yu. Component Reconditioning of Joints and Units of Equipment, Operating under Hydroabrasive Wear Conditions. *Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya* = Repair, Reconditioning, Modernization. 2019; (5):8-12. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2019-0-5-8-12>
9. Kolomeychenko A.V., Logachev V.N. Wear Resistance of Micro Arc Oxidizing Coatings on Aluminium Alloys AO3-7 and AK7Ch. *Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya* = Repair, Reconditioning, Modernization. 2006; (8):44-46. Available at: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=444 (accessed 06.08.2020). (In Russ.)
10. Khromov V.N., Senchenkov I.K., Kolomeychenko A.V., et al. Technology for Reconditioning the Case of Gear Pump by Thermoplastic Deformation. *Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya* = Repair, Reconditioning, Modernization. 2006; (9):11-15. Available at: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=445 (accessed 06.08.2020). (In Russ.)
11. Kolomeychenko A.V., Logachev V.N. Analysis of Internal Stresses in the Body of Renovated Gear Pump. *Traktory i selkhozmachiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2010; (7):33-34. (In Russ.)
12. Velichko S.A., Martynov A.V. Recovery of Gears Of NSh-A Hydraulic Pumps Using Free Repair Sizes Method. *Traktory i selkhozmachiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2015; (2):47-49. (In Russ.)

13. Burumkulov F.Kh., Velichko S.A., Davydkin A.M., et al. Improvement in Service Life of Units by Means of Creating the Nanostructured Coatings on the Working Surfaces of Parts. *Tekhnologiya metallov*. 2008; (1):2-7. (In Russ.)
14. Burumkulov F.Kh., Velichko S.A., Ivanov V.I., et al. Nanoelectro-Technologies for Increasing the Overhaul Life of Aggregates of the Machinery and Tractor Fleet of Agriculture. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2007; 99:85-94. (In Russ.)
15. Shia L., Zhanga W., Jiaoa H., et al. Numerical Simulation and Experimental Study on the Comparison of the Hydraulic Characteristics of an Axial-Flow Pump and a Full Tubular Pump. *Renewable Energy*. 2020; 153:1455-1464. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.082>
16. Bedotti A., Pastori M., Scolari F., et al. Dynamic Modelling of the Swash Plate of a Hydraulic Axial Piston Pump for Condition Monitoring Applications. *Energy Procedia*. 2018; 148:266-273. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.077>
17. Gao Y., Zhang Q. Wavelet Packet and Residual Analysis Based Method for Hydraulic Pump Health Diagnosis. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2006; 220(6):735-745. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1243/09544070JAUTO253>
18. Casoli P., Campanini F., Bedotti A., et al. Overall Efficiency Evaluation of a Hydraulic Pump with External Drainage through Temperature Measurements. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*. 2018; 140(8). 9 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4039084>
19. Frith R.H., Scott W. Comparison of an External Gear Pump Wear Model with Test Data. *Wear*. 1996; 196(1):64-71. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)06845-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)06845-7)
20. Battarra M., Mucchi E. On the Assessment of Lumped Parameter Models for Gearpump Performance Prediction. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2019; 99:34-40. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.102008>
21. Han M. Reliability Analysis of a Hydraulic Pump. *Journal of Mechanical Engineering*. 2002; 38(1):10-15. Available at: https://www.researchgate.net/publication/245444192_Reliability_analysis_of_a_hydraulic_pump (accessed 06.08.2020). (In Eng.)
22. Tkáč Z., Kosiba J., Hujo L., et al. Experimental Hydraulic Device for the Testing of Hydraulic Pumps and Liquids. *Tribology in Industry*. 2018; 40(1):149-155. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.01.14>
23. Pumpur Ye.V. Application of Additive Technologies for Repair of Hydraulic Drive of Mining Machines on the Example of the Hsh-32 Gear Pump. *Problemy razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh = Problems of Hydrocarbon and Ore Mineral Deposits Development*. 2016; (1):311-314. (In Russ.)
24. Konev V.V., Pirogov S.P., Borodin D.M., et al. Experimental Study of Hydraulic Road Construction Machinery. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*. 2015; (1):68. Available at: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=17665> (accessed 06.08.2020). (In Russ.)
25. Borovikov V.P. Professional Opinion. *Avtotransportnoe predpriyatie = Motor Transport Company*. 2010; (2):14-15. (In Russ.)
26. Borovikov V.P. On the Asymptotic Distribution of Statistics Based on Sampling Intervals with Estimated Parameters. *Teoriya veroyatnosti i ee primeneniya = Theory of Probability and its Applications*. 1996; 41(1):181-186. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.4213/tvp2791>

Received 06.02.2020; revised 16.04.2020; published online 30.09.2020

About the authors:

Pavel V. Chumakov, Associate Professor of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: G-8320-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8504-5907>, pav-chumakov@yandex.ru



Alexei V. Martynov, Associate Professor of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: AAR-8786-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4744-4373>, martynov-230685@yandex.ru

Alexander V. Kolomeychenko, Chief of Advanced Technology Management Board, Agricultural Engineering Centre NAMI (2 Avtomotornaya St., Moscow 125438, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: D-6053-2019, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3865-4486>, a.kolomeychenko@nami.ru

Ismail H. Hasan, Researcher of Material Science Laboratory, Ministry of Science and Technology (Al-Jadriya, Baghdad 765, Iraq), Researcher ID: C-5025-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4560-1016>, srorismael@gmail.com

Alla S. Kolomeychenko, Head of Information Technology and Mathematics Chair, Orel State Agrarian University (69 General Rodin St., Orel 302019, Russia), Ph.D. (Economics), Associate Professor, Researcher ID: AAR-8498-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7200-8819>, alla.kolomeychenko@mail.ru

Contribution of the authors:

P. V. Chumakov – literature data analysis, methodology development, regression model analysis; A. V. Martynov – statistical processing of data, obtaining a regression model of connection of volumetric feeding of round hydraulic pumps with wear of working surfaces of parts; A. V. Kolomeychenko – formulation of research agenda, statistical accumulation; I. H. Hasan – micrometer examination of round gear hydraulic pump components; A. S. Kolomeychenko – analysis and plotting of graphical distribution dependencies.

All authors have read and approved the final manuscript.



Оценка предельного состояния тестоделительных машин вакуумно-поршневого типа по критерию расхода масла

С. А. Величко¹, Е. Г. Мартынова^{1*}, В. И. Иванов²

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

²ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (г. Москва, Россия)

*el.mart2012@yandex.ru

Введение. Сельское хозяйство включает одну из отраслей переработки сырья, конечным продуктом которой является производство хлеба. При этом наиболее сложной операцией в технологической цепочке производства хлеба является деление готового теста на заготовки одинаковой массы. За эту операцию отвечают тестоделительные машины вакуумно-поршневого типа. В условиях эксплуатации срок службы машин на 30–40 % ниже заявленного заводом-изготовителем. Из-за отсутствия в технической документации предельного состояния машин их эксплуатация продолжается с большими расходами технологических материалов, что отражается на себестоимости готового продукта. Таким образом, целью работы является определение критерия оценки работоспособности тестоделительных машин и предельного значения критерия.

Материалы и методы. Оценка технического состояния тестоделительных машин вакуумно-поршневого типа проводится по расходу пищевого масла Foodline WP 32 (производитель AIMOL). Для измерения массы израсходованного масла и кусков теста применялись весы с точностью измерения $\pm 0,1$ г и ± 1 г соответственно.

Результаты исследования. По результату анализа принципа работы тестоделительных машин критерием работоспособности принят расход масла, который отвечает за точность развесовки теста, создавая в камере всасывания вакуум при заполнении зазоров в сопряжении деталей. При оценке технического состояния машин изготовлением 300 тестовых заготовок, настраиваемых на массу 500 г, получен предельный расход масла, равный 218 г. По предельному расходу масла определен допустимый расход, равный 109 г.

Обсуждение и заключение. Установлено, что на хлебопекарных предприятиях около 30 % тестоделительных машин эксплуатируются в запредельном состоянии. Точность развесовки теста не удастся восстановить увеличением расхода масла. Однако, начиная с расхода масла выше допустимого значения, равного 109 г, машины нуждаются в капитальном ремонте. Полученные значения предельного и допустимого состояния тестоделительных машин находят широкое применение на хлебопекарных предприятиях для оценки их технического состояния.

Ключевые слова: тестоделительная машина, тесто, всасывающий механизм, делительный механизм, развесовка теста, предельное состояние, дрессель

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



The Assessment of the Limit State of the Vacuum Piston Type Dough Divider by Oil Consumption

S. A. Velichko^a, E. G. Martynova^{a*}, V. I. Ivanov^b

^aNational Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

^bFederal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russia)

*el.mart2012@yandex.ru

Introduction. Agriculture includes one of the branches of raw material processing, the final product of which is bread making. At the same time, the most complex operation in the technological chain of bread making is the division of the finished dough into billets of the same mass. This operation is performed by vacuum-piston type dough dividers. Under operating conditions, the service life of dividers is 30-40% lower than the manufacturer's stated. In the technical documentation there is not point of the limit state of dividers, so they continued to be used with high costs of technological materials that determine the cost of the finished product. The purpose of the work is to determine the criterion for evaluating the performance of dough dividers and the limit value of the criterion.

Materials and Methods. Evaluation of the technical condition of vacuum piston type dough dividers was based on the edible oil consumption of food line WP 32 (manufacturer AIMOL). To measure the mass of the consumed oil and the mass of the dough pieces, scales were used with an accuracy of ± 0.1 g and ± 1 g, respectively.

Results. Based on the results of the analysis of the operation principle of dough dividers, the criterion of efficiency is called the oil consumption, which is responsible for the accuracy of weighing the dough through creating a vacuum in the suction chamber when filling gaps in the coupling of parts. When evaluating the technical condition of machines by manufacturing 300 test pieces configured for a mass of 500 g the maximum oil consumption is obtained equal to 218 g. According to the maximum oil consumption, the allowed oil consumption is determined to be 109 g.

Discussion and Conclusion. It is established that at bakery enterprises, about 30% of used dough dividers have an over-extreme limit state and the accuracy in weighing the dough cannot be restored by increasing the oil consumption. However, starting from the oil consumption above the allowed value of 109 g, the machines need major repairs. The obtained values of the limit and allowed state of dough dividers are widely used in bakery enterprises to assess their technical condition.

Keywords: dough divider, dough, dough suction mechanism, dividing mechanism, dough weighing, ultimate limit state, throttle

For citation: Velichko S.A., Martynova E.G., Ivanov V.I. The Assessment of the Limit State of the Vacuum Piston Type Dough Divider by Oil Consumption. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(3):448-463. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.448-463>

Введение

Сельское хозяйство включает в себя одну из отраслей переработки сырья, направленную на обеспечение населения хлебом. Современное хлебопекарное производство оснащено разнообразным технологическим и транспортным оборудованием, предназначенным для транспортирования, хранения и подготовки к про-

изводству муки и дополнительного сырья, приготовления теста, его деления и формовки, выпечки и упаковки с последующей транспортировкой [1]. От надежности работы оборудования, используемого в технологических линиях, зависит продовольственная безопасность государства.

Одним из важных этапов в технологическом процессе производства хлеба

и хлебобулочных изделий является деление готового теста на заготовки одинаковой массы. Эту операцию выполняет тестоделительная машина [2].

Проведенный анализ поставляемых на рынок России и стран СНГ тестоделительных машин показал, что лидером в данном сегменте рынка является ЗАО НПП фирма «Восход», на долю которой приходится более 45 % общего объема продаж. Высокая востребованность на российском и зарубежном рынках объясняется сочетанием уникальных технологий, применяемых на предприятии, высокоэффективной организации производственного процесса, бескомпромиссного качества и выгодной цены. В последние годы на предприятии внедрена система Hazard Analysis and Critical Control Point, которая направлена на минимизацию возможных проблем, связанных с безопасностью пищевых изделий.

ЗАО НПП фирма «Восход» выпускает тестоделительные машины марки ТД, которые имеют идентичную конструкцию камер всасывания и отличаются их объемом и количеством мерных камер делительного узла (ТД-4 – одна, ТД-2М – две и ТД-3М – три мерные камеры)¹.

Зарубежными аналогами тестоделительных машин вакуумно-поршневого типа являются: Parta U (Германия), Glimex SD-180 (Швеция), KTM-1 CRV (Турция) [3]. При этом стоимость этого оборудования на порядок превышает стоимость отечественных машин при сопоставимых показателях надежности. Заявленный нормативный срок службы тестоделительных машин отечественных и зарубежных производителей составляет не менее 10 лет при условии соблюдения всех регламент-

ных работ по их обслуживанию и технической эксплуатации².

Исследования эксплуатационной надежности делительных устройств (ДУ) тестоделительных машин, которые ответственны за стабильность развесовки тестовых заготовок, были проведены лабораторией № 11 ГНУ ГОСНИТИ и показали, что при технологической загрузке от 10 до 20 часов в сутки их срок службы составляет не более 5–7 лет [4].

Показателем работоспособности тестоделительных машин является точность развесовки настроенной массы теста. В руководстве по эксплуатации регламентировано, согласно ГОСТу Р 58233-2018, допустимое отклонение заготовок теста значением $\pm 2\%$ при их массе более 200 г³.

Однако в технической документации отсутствуют данные о составных частях, ответственных за выход показателя работоспособности за допустимые пределы, и о характеристике их состояния.

Обзор литературы

В паспорте на изделие завод изготовитель указывает, что за предельное состояние тестоделительной машины следует принимать⁴:

1) отказ одной или нескольких составных частей, восстановление или замена которых на месте эксплуатации невозможны;

2) состояние составных частей, которые приводят к прекращению функционирования тестоделителя или выходу его показателя работоспособности за допустимые пределы;

3) превышение установленного уровня текущих (суммарных) затрат на техническое обслуживание и ремонт или другие признаки, определя-

¹ Машина тестоделительная «Восход-ТД-4». Руководство по эксплуатации В495.00.00.000РЭ; Машина тестоделительная «Восход-ТД-2М». Руководство по эксплуатации В572.00.00.000РЭ; Машина тестоделительная «Восход-ТД-3М». Руководство по эксплуатации В574.00.00.000РЭ.

² Там же.

³ ГОСТ Р 58233-2018. Хлеб из пшеничной муки. Технические условия.

⁴ Машина тестоделительная «Восход-ТД-4». Руководство по эксплуатации...

ющие экономическую нецелесообразность дальнейшей эксплуатации.

Однако в паспорте отсутствует критерий и критериальное значение предельного состояния тестоделительных машин, при достижении которого их эксплуатация запрещена.

По данным ряда работ, при проведении исследований эксплуатационной надежности ДУ тестоделительных машин критерием предельного состояния является внешняя утечка теста через образовавшиеся зазоры в соединениях деталей [5–8]. Однако это противоречит принципу работы тестоделительных машин.

В других работах представленные результаты микрометражных исследований поверхностей деталей тестоделительных машин вакуумно-поршневого типа «А2–ХПО/5», PARTA U2, SP-2, BENIER показали, что максимальные эксплуатационные зазоры в соединениях всасывающей камеры составляют от 300 до 1 000 мкм [9; 10]. Эти значения зазоров в соединениях деталей превышают принятые в машиностроении нормы более чем в два раза, а их дальнейшая эксплуатация становится нецелесообразной. Однако в работах дан только диапазон зазоров, но неопределенно его предельное значение.

В серии исследований отмечается зависимость качества хлебобулочных изделий из пшеничного теста от режимов его обработки в тестоделительных машинах [11; 12]. Проведенные исследования направлены на определение критерия предельного состояния работы тестоделительных машин. Однако заводы-изготовители машин дают рекомендации по вязкости теста, а ее изменение приводит к внешней утечке теста и нарушению дальнейшей его обработки в технологической цепочке, например, на округлителях.

Из-за отсутствия критерия оценки работоспособности тестоделительной машины предлагается конструкторское решение по замене дозирующего устройства теста [13].

Таким образом, целью данных исследований является определение критерия и критериального значения предельного состояния работоспособности ДУ вакуумно-поршневого типа.

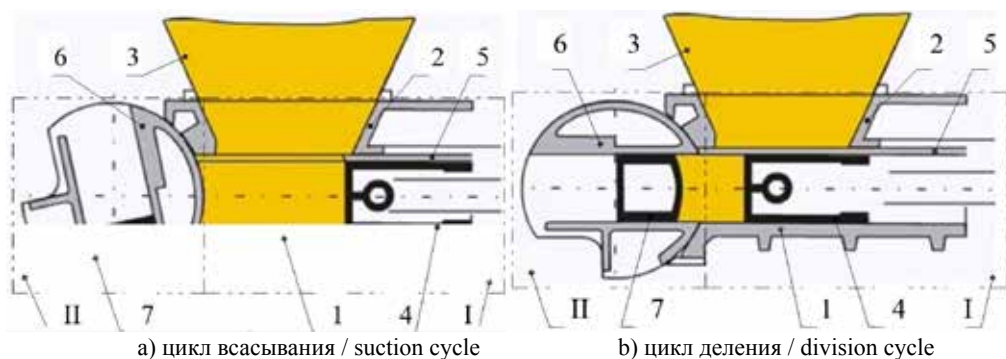
Материалы и методы

В качестве смазочно-технологической жидкости применялось масло Foodline WP 32 (производитель AIMOL), имеющее при температуре 40 °С вязкость 40 сСт, плотность 0,840 г/мл; температура масла при испытаниях составляла (25 ± 5) °С. Весы для измерения емкости с пищевым маслом, которое подается в дроссели, имеют точность измерения $\pm 0,1$ г. Весы, используемые для измерения массы кусков теста, имеют точность измерения ± 1 г.

Конструкция ДУ вакуумно-поршневого типа (рис. 1) включает в себя два основных механизма: всасывающий (I) для наполнения камеры всасывания тестом и делительный (II) для получения заготовки настроенной массы.

В начальный момент наполнения всасывающей камеры тестом отверстие в конце камеры закрыто боковой поверхностью барабана 6, а всасывающий поршень и отрезной нож находятся в конце камеры с зазором относительно поверхности барабана 5 ± 1 мм и 3 ± 1 мм соответственно (рис. 1а). Этот зазор после первого запуска тестоделительной машины заполняется тестом. При наполнении всасывающей камеры тестом первым движением начинает отрезной нож, открывая нижнюю часть бункера. Затем в этом же направлении начинает двигаться поршень, засасывая внутрь камеры тесто за счет создаваемого разрежения.

После наполнения всасывающей камеры наступает цикл деления (рис. 1б). При делении из камеры всасывания поршень нагнетает тесто в мерную камеру, заполняя ее до момента, когда мерный поршень упрется в ограничитель, настроенный на заданную массу заготовки. Затем барабан поворачива-



Р и с. 1. Схема работы ДУ: 1 – корпус всасывающей камеры; 2 – верхняя часть камеры всасывания; 3 – бункер; 4 – всасывающий поршень; 5 – отрезной нож; 6 – барабан; 7 – мерный поршень

Fig. 1. Operation diagram of the remote control unit: 1 – suction chamber body; 2 – upper part of the suction chamber; 3 – hopper; 4 – suction piston; 5 – cutting knife; 6 – drum; 7 – dimensional piston

ется на 90° , отрезая порцию заготовки теста, и при вертикальном положении мерной камеры мерный поршень выталкивает ее на транспортерную ленту.

Детали ДУ, работающие в подвижных соединениях, изготавливаются с зазорами не более 0,05–0,1 мм. Подаваемое через дроссели пищевое масло, растекаясь по поверхностям деталей, заполняет зазоры, перекрывая доступ воздуха внутрь камеры и обеспечивая вакуум [14–17].

Два дросселя подают масло через боковые отверстия камеры всасывания, откуда оно попадает в зазоры (рис. 1) «всасывающий поршень 4 – камера 1» и «отрезной нож 5 – камера 1». Третий дроссель подает масло через верхнюю часть камеры всасывания со стороны делительного барабана. Отсюда масло попадает в зазор соединения «барабан 6 – камера всасывания 1». Четвертый дроссель подает масло также через верхнюю часть камеры всасывания, но с противоположной стороны от делительного барабана, заполняя зазор соединения «отрезной нож 5 – верхняя часть камеры всасывания 2». Кроме того, масло, стекая по технологическим отверстиям в ноже и поршне,

омывает поверхности этих деталей в соединениях «поршень 4 – дно камеры 1» и «поршень 4 – отрезной нож 5». Подача масла регулируется винтом дросселя, имеющим 10 оборотов, от полного закрытия до полного открытия проходного сечения.

Насос марки РЕКАР, установленный на тестоделительных машинах, имеет пропускную способность масла 1,4 мл за один рабочий ход диафрагмы, благодаря которой расход масла увеличивается при увеличении зазоров или прекращается при их отсутствии [14]. При этом давление нулевой подачи составляет не более 0,3 кгс/см², так как он перестает засасывать масло.

Согласно техническому паспорту система подачи масла настраивается регулировкой дросселей на расход 320–350 мл на 1 000 заготовок. Для обеспечения указанного расхода масла верхние дроссели открываются на 3 оборота, а боковые на 2 оборота из-за разной площади трения деталей.

В процессе эксплуатации тестоделительной машины изнашиваются рабочие поверхности деталей как всасывающего, так и делительного механизмов [18–21].

Так как торцевая часть всасывающей камеры со стороны делительного механизма закрыта остатками теста, то на падение вакуума будет влиять увеличение зазоров в соединениях «всасывающий поршень – вертикальная часть камеры», «отрезной нож – вертикальная часть камеры», «отрезной нож – верхняя часть камеры всасывания», «поршень – дно камеры» и «поршень – отрезной нож».

Исключение попадания воздуха в камеру всасывания из-за износа деталей достигается увеличением подачи масла. При этом подачу начинают через верхний дроссель с противоположной стороны от делительного барабана. После его полного открытия подачу масла увеличивают боковыми дросселями.

По мере увеличения износа деталей наступает момент, когда подача масла не обеспечивает вакуум во всасывающей камере и точность развесовки теста в допустимых границах. Данное состояние ДУ тестodelительных машин вакуумно-поршневого типа следует принимать как предельное [18; 22].

Задачей эксперимента являлось определение предельного значения расхода пищевого масла, подаваемого в зазоры соединений, при котором не обеспечивается точность развесовки в заданных пределах. Исследования проведены с использованием тестodelительных машин ТД-4, находящихся в эксплуатации на хлебопекарных предприятиях г. Саранска.

Настройку подачи масла через дроссели производили из расчета для 300 тестовых заготовок из пшеничной муки влажностью более 40 % массой 500 ± 10 г. Исходя из условия, что подача масла для новых тестodelительных машин должна составлять 269–294 г на 1 000 таких заготовок, для 300 тесто-

вых заготовок среднее значение составляло 85 г. Данную подачу обеспечили открытием верхних дросселей на три оборота и боковых – на два оборота.

С учетом технических характеристик насоса пропускная способность дросселей за один оборот винта составляла 8,8 г.

После загрузки теста в бункер включается тестodelительная машина и увеличением частоты вращения коленчатого вала выставляется средняя производительность получения тестовых заготовок, равная 15 шт/мин.

Контроль массы тестовых заготовок осуществлялся выборочно. Для нормального закона распределения массы при доверительной вероятности $\alpha_0 = 0,90$, значении относительной ошибки $\varepsilon_a = 5\%$, коэффициенте вариации $V = 0,15$ достаточно взвесить 16 заготовок из 300 полученных⁵ [23].

Если среднее значение массы измеренных кусков тестовых заготовок выходило за допустимые значения, то дополнительно открывались дроссели: сначала верхний с противоположной стороны от барабана, а затем боковые. Учитывалось, что подача масла через боковые дроссели должна начинаться только после того, как верхний дроссель будет выкручен до конца. После каждой регулировки процесс контроля расхода масла и массы тестовых заготовок повторялся до достижения точности развесовки в заданных пределах.

После определения критериального значения работоспособности ДУ проводилась оценка их технического состояния в условиях эксплуатации хлебопекарных предприятий.

Для выбора количества объектов исследования использовали критерий $хи$ -квадрат, задав критическое значение мощности $p_{кр} = 0,5$ и значение од-

⁵ Боровиков В. П. STATISTIKA. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов. СПб.: Питер, 2003. 688 с.; Артемьев Ю. Н. Качество ремонта и надежность машин в сельском хозяйстве. М.: Колос, 1981. 239 с.; Сковородин В. Я., Тишкин Л. В. Справочная книга по надежности сельскохозяйственной техники. Л.: Лениздат, 1985. 204 с.

носторонней доверительной вероятности $p_d = 0,80^6$ [23].

Результаты исследования

Проведенный анализ принципа работы тестоделительных машин вакуумно-поршневого типа позволил определить критерий предельного состояния – подача пищевого масла в трущиеся соединения деталей.

Результаты оценки технического состояния ДУ тестоделительных машин по критерию расхода масла, обеспечивающего разрежение воздуха в камере всасывания, представлены в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, что из 16 тестоделительных машин, принятых для исследований, две машины (№ 1 и 3)

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Результаты определения массы кусков теста от расхода масла

Results of determining the dependence of the weight of dough pieces on oil consumption

Номер тестоделительной машины / Number of the dough dividing machine	Масса заготовок при номинальной подаче масла M_n , г / Weight of workpieces at nominal oil supply M_n , g	Масса заготовок при увеличенной подаче масла M_y , г / Weight of the workpieces at an increased oil supply M_y , g	Расход масла Q , г / Oil consumption Q , g	Величина открытия дросселей / Throttle opening value
1	506	–	81	Верхний 3 оборота, боковые 2 оборота / Upper 3 turns, sidebar 2 turns
2	478	494	95	Верхний 4 оборота, боковые 2 оборота / Upper 4 turns, sidebar 2 turns
3	498	–	86	Верхний 3 оборота, боковые 2 оборота / Upper 3 turns, sidebar 2 turns
4	462	504	125	Верхний 7 оборотов, боковые 2 оборота / Upper 7 turns, sidebar 2 turns
5	460	503	129	Верхний 8 оборотов, боковые 2 оборота / Upper 8 turns, sidebar 2 turns
6	468	504	112	Верхний 6 оборотов, боковые 2 оборота / Upper 6 turns, sidebar 2 turns
7	472	498	104	Верхний 5 оборотов, боковые 2 оборота / Upper 5 turns, sidebar 2 turns

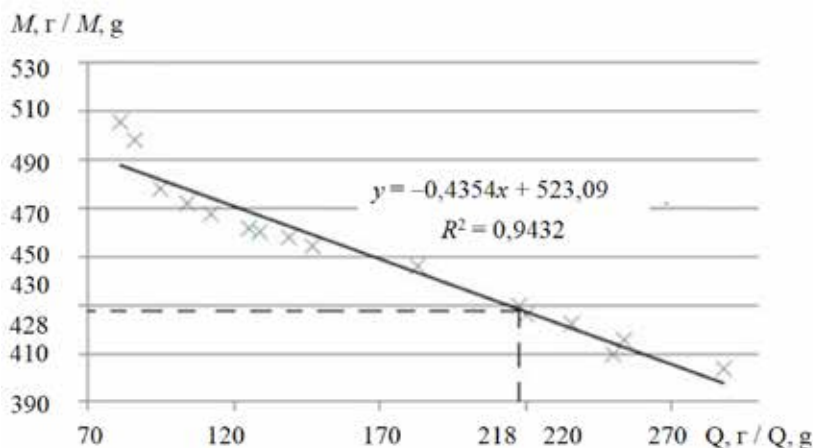
⁶ Боровиков В. П. STATISTIKA. Искусство анализа...

Окончание табл. 1 / End of table 1

Номер тестоделительной машины / Number of the dough dividing machine	Масса заготовок при номинальной подаче масла M_n , г / Weight of workpieces at nominal oil supply M_n , g	Масса заготовок при увеличенной подаче масла M_v , г / Weight of the workpieces at an increased oil supply M_v , g	Расход масла Q , г / Oil consumption Q , g	Величина открытия дросселей / Throttle opening value
8	458	496	139	Верхний 9 оборотов, боковые 2 оборота / Upper 9 turns, sidebar 2 turns
9	422	482	236	Верхний 10 оборотов, боковые 7 оборотов / Upper 10 turns, sidebar 7 turns
10	446	494	183	Верхний 10 оборотов, боковые 4 оборота / Upper 10 turns, sidebar 4 turns
11	454	500	147	Верхний 10 оборотов, боковые 2 оборота / Upper 10 turns, sidebar 2 turns
12	404	468	288	Верхний 10 оборотов, боковые 10 оборотов / Upper 10 turns, sidebar 10 turns
13	426	502	220	Верхний 10 оборотов, боковые 6 оборотов / Upper 10 turns, sidebar 6 turns
14	430	496	218	Верхний 10 оборотов, боковые 6 оборотов / Upper 10 turns, sidebar 6 turns
15	416	474	254	Верхний 10 оборотов, боковые 8 оборотов / Upper 10 turns, sidebar 8 turns
16	410	478	250	Верхний 10 оборотов, боковые 8 оборотов / Upper 10 turns, sidebar 8 turns

обеспечивают точность развесовки массы теста в заданных пределах при открытии верхних дросселей на три оборота, а боковых – на два оборота. Из остальных 14 машин у 4 точность развесовки массы теста выходит за допустимые значения, начиная с открытия верхнего дросселя с противоположной стороны от барабана делителя

на 10 оборотов, а боковых – на семь оборотов (№ 9, 12, 15, 16). У остальных 10 машин точность развесовки массы теста, выходящая за допустимые значения, восстанавливается при открытии верхнего дросселя с противоположной стороны от барабана делителя на 10 оборотов, а боковых – на 6 оборотов.



Р и с. 2. График зависимости массы тестовых заготовок тестоделительных машин от расхода масла
 F i g. 2. Graph of the dependence of the weight of dough blanks of dough dividers on the oil consumption

По значениям, полученным экспериментальным путем, методом наименьших квадратов получена линейная зависимость, описывающая корреляционную связь технического состояния тестоделительной машины по критерию расхода масла, обеспечивающего вакуум во всасывающей камере, и точностью развесовки массы тестовой заготовки. График представлен на рисунке 2.

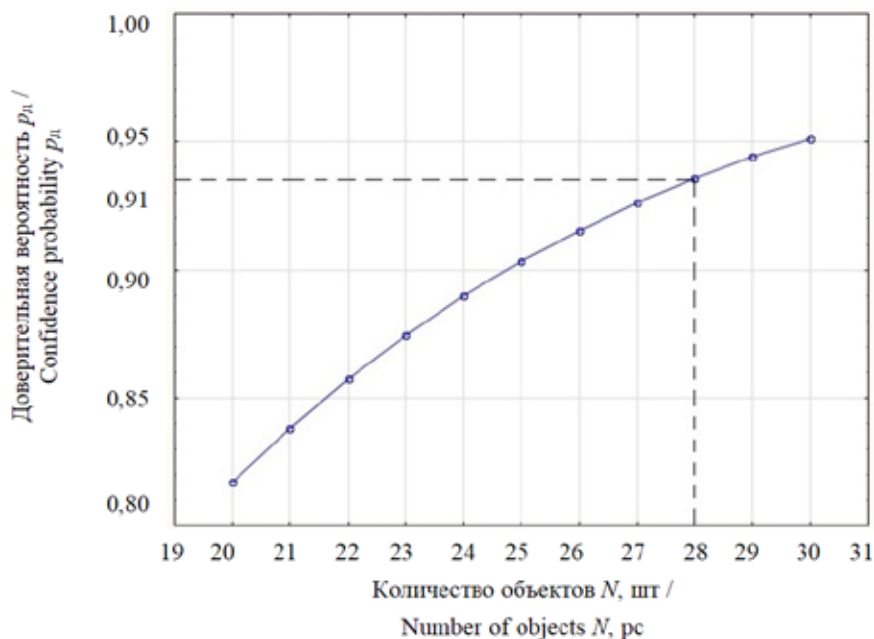
Установлено, что при подаче пищевого масла, начиная со значения 218 г за 300 заготовок, оно не успевает заполнять зазоры и обеспечивать вакуум во всасывающей камере, то есть обеспечение точности развесовки теста исключается. Данное значение следует принимать как предельное состояние работоспособности ДУ тестоделительной машины. Для обеспечения предельного расхода масла верхний дроссель с противоположной стороны от барабана делителя открывается на 10 оборотов, а боковые – на 7 оборотов.

Согласно регламенту постановки изделия на капитальный ремонт за критерий технического состояния принимается допустимое значение параметра работоспособности. Многократно дока-

зано, что предельное и допустимое значения являются функцией ресурса, условий эксплуатации и ремонта. Тогда, чтобы после первого капитального ремонта наработка соединения была равна фактической наработке в доремонтный период эксплуатации, допустимое значение не должно превышать 50 % от предельного значения параметра работоспособности. Основываясь на данном положении, для тестоделительной машины ТД-4 допустимый расход масла на 300 заготовок составит 109 г. Для обеспечения допустимого расхода масла верхний дроссель с противоположной стороны от барабана делителя открывается на 6 оборотов, а боковые – на два оборота.

Для определения технического состояния ДУ, находящихся в условиях эксплуатации, количество принятых для исследования машин определялось для установленных значений параметров по графику зависимости количества объектов N от односторонней доверительной вероятности p_d критерия хи-квадрат (рис. 3) [23].

«Из графика на рисунке 3 видно, что для принятой односторонней дове-



Р и с. 3. График зависимости количества объектов N от односторонней доверительной вероятности p_n критерия χ^2 -квадрат

F i g. 3. Graph of the dependence of the number of objects N on the one-way confidence probability of the hi -square criterion

рительной вероятности $p_n = 0,80$ количество объектов для проведения эксперимента равно $N = 28$ шт» [23].

В таблице 2 представлены результаты статистической обработки параметра работоспособности тестodelительных машин модели ТД-4, значения которых выше допустимого, где \bar{Q} – среднее арифметическое выборки расхода масла, мкм; σ – стандартное отклонение; Q_{\max} (Q_{\min}) – максимальное (минималь-

ное) значение выборки расхода масла, мкм.

Для определения теоретического закона распределения расхода масла, характеризующего техническое состояние ДУ тестodelительных машин, проведена проверка нормальности результатов измерений по критерию Шапиро – Уилка (W)⁷ [23].

Представленные в таблице 2 результаты показывают, что для тестodelительных машин

Т а б л и ц а 2

Table 2

Параметры дескриптивной статистики выборки расхода масла тестodelительных машин ТД-4

Parameters of descriptive statistics for sampling oil consumption of TD-4 dough divider

N	\bar{Q}	σ	Диапазон значений / Range of values		p_w
			Q_{\max}	Q_{\min}	
28	180,7	65,2	296	110	0,0009

⁷ Там же.

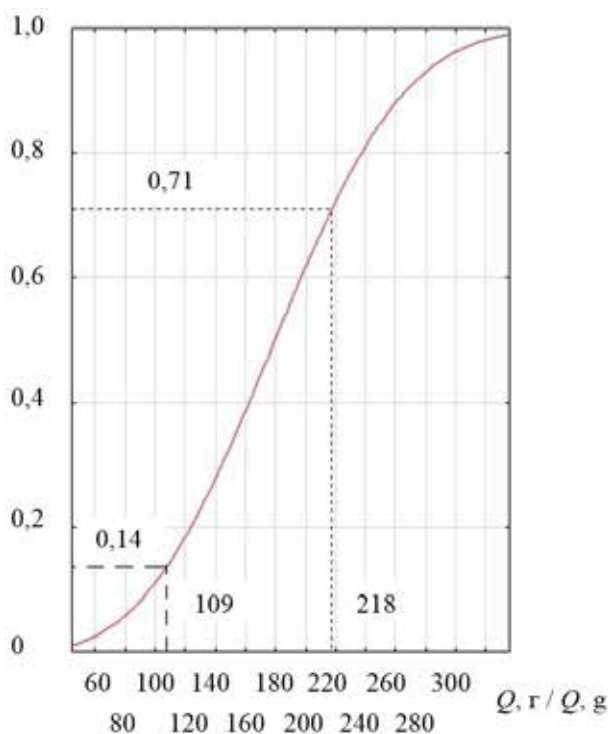
делительных машин ТД-4 уровень W -критерия $p_w < 0,05$, что отвергает нулевую гипотезу о нормальном распределении значений выборки.

Оценку качества подгонки измерений расхода масла к закону Вейбулла – Гнеденко проводили по критерию Холландера – Прошана (HP)⁸ [23]. Результаты расчета показали, что текущее

значение уровня значимости p_{HP} равно 0,88, следовательно, имеет место альтернативная гипотеза.

Параметры закона определялись методом максимального правдоподобия с использованием программы Statistica.

В таблице 3 представлены параметры закона распределения Вейбулла – Гнеденко. Математическое ожидание



Р и с. 4. Функция распределения расхода масла

F i g. 4. Function of oil consumption distribution

Т а б л и ц а 3

T a b l e 3

Параметры закона распределения Вейбулла расхода масла Q тестodelительных машин ТД-4
Parameters of the law of Q Weibull distribution of oil consumption of TD-4 dough dividers

Параметры трехпараметрического закона распределения Вейбулла / Parameters of the three-parameter law distributions Weibull	μ	181,00
	c	100,70
	a	85,80
	b	1,23
p_{HP}		0,63

⁸ Там же.

трехпараметрической функции μ определялось с использованием модуля «вероятностный калькулятор» в программе Statistica.

Из рисунка 4 и таблицы 3 видно, что 29 % тестоделительных машин на хлебопекарных предприятиях эксплуатируются в запредельном состоянии. У 71 % находящихся на эксплуатации тестоделительных машин расход масла не превышает предельного значения.

Обсуждение и заключение

Установлено, что из-за отсутствия регламента постановки тестоделительных машин на капитальный ремонт не менее 29 % из их числа эксплуатируются в запредельном состоянии с нарушением установленной ГОСТом нормы развесовки теста. При этом значительно превышает расход дорогостоящего пищевого масла, что негативно отражается на себестоимости готового продукта.

На основе анализа конструкции и принципа работы делительных устройств вакуумно-поршневого типа тестоделительных машин установлено, что критерием предельного технического состояния служит количество пищевого масла, необходимое для за-

полнения зазоров в трущихся соединениях, создания за счет этого вакуума во всасывающей камере и обеспечения таким образом точности развесовки теста в заданных пределах.

В качестве оценки предельного состояния работоспособности делительного устройства тестоделительной машины экспериментально установлено предельное значение расхода пищевого масла для получения 300 заготовок теста, равное 218 г. При этом принятое допустимое значение расхода пищевого масла при получении 300 тестовых заготовок равно 109 г.

Определение предельного и допустимого значения расхода масла тестоделительных машин вакуумно-поршневого типа находит практическое применение в инженерных службах хлебопекарных предприятий, позволяющих своевременно поставлять оборудование на капитальный ремонт. Полученная зависимость развесовки теста от расхода масла позволяет провести диагностику оценки технического состояния тестоделительных машин и спрогнозировать остаточный ресурс.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Махмадшоев, О. Х. Оборудование для замеса теста / О. Х. Махмадшоев, А. В. Михеев // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. – 2018. – № 20. – С. 594–596.
2. Арабей, Е. В. Характеристика оборудования для формования и разделки теста / Е. В. Арабей, В. Н. Балабанов // Вестник современных исследований. – 2017. – № 5–1 (8). – С. 120–123.
3. Калачев, М. В. Классификация тестоделителей. Тестоделители зарубежных марок / М. В. Калачев, В. М. Хроменков, Ю. В. Зуева // Хлебопечение России. – 2007. – № 6. – С. 22–23. – Рез. англ.
4. Бурмкулов, Ф. Х. Ремонт тестоделительных устройств вакуумного типа методом электроискровой наплавки / Ф. Х. Бурмкулов, В. И. Иванов, А. В. Молодых [и др.] // Хлебопечение России. – 2004. – № 2. – С. 34–36.
5. Громцев, А. С. Исследования точности деления теста, замена методики определения точности тестоделительных машин / А. С. Громцев // Процессы и аппараты пищевых производств. – 2009. – № 1. – С. 40–43. – URL: http://processes.ihbt.ifmo.ru/ru/article/7267/issledovaniya_tochnosti_deleniya_testa_zamena_metodiki_opredeleniya_tochnosti_testodelitelnyh_mashin.htm (дата обращения: 07.08.2020).
6. Макаров, Е. А. Актуальный ассортимент или возможности бесстрессового тестоделения (АГРО-3) / Е. А. Макаров // Хлебопродукты. – 2009. – № 5. – С. 28–29. – URL: <https://khlebprod.ru/old/text.php?text=2382&heads=1> (дата обращения: 07.08.2020).

7. **Иванов, В. И.** Оценка точности и стабильности объемного деления теста / В. И. Иванов, А. В. Молодых // Хлебопечение России. – 2006. – № 3. – С. 33–35.
8. **Бурмукулов, Ф. Х.** Погрешность дозирования и утечка теста в тестоделителях вакуумного типа / Ф. Х. Бурмукулов, В. И. Иванов, А. В. Молодых [и др.] // Хлебопечение России. – 2004. – № 6. – С. 34–37.
9. **Алексеев, Г. В.** Экспериментальное уточнение условий повышения точности дозирования жидкостей // Г. В. Алексеев, А. С. Громцев, А. Г. Лей // Техника машиностроения. – 2016. – Т. 23, № 3 (99). – С. 57–63. – Рез. англ.
10. **Андреева, Е. В.** Определение рациональных параметров рабочих органов тестоделительных машин / Е. В. Андреева // Инженерно-техническое обеспечение АПК. – 2007. – № 1. – С. 41.
11. **Гайдай, Г. С.** Вплив агротехніки вирощування та післязбирального фракціонування на борошномельні і хлібопекарські властивості пшениці / Г. С. Гайдай, І. В. Гайдай, Л. Л. Новак // Науковий огляд. – 2014. – Т. 3, № 2. – С. 137–145. – URL: <https://naukajournal.org/index.php/naukajournal/article/view/142> (дата обращения: 07.08.2020). – Рез. англ.
12. **Волошенко, С. В.** Эффективная технология ферментной гидратации растительных масел / С. В. Волошенко, Ф. Ф. Гладкий // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 4, № 6 (58). – С. 4–6. – URL: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/5582> (дата обращения: 07.08.2020). – Рез. англ.
13. **Пальчиков, А. Н.** Разработка тестоделителя с уточненным отмериванием дозы / А. Н. Пальчиков, В. И. Копилец // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: процессы и аппараты пищевых производств. – 2015. – № 1. – С. 203–208. – URL: http://processes.ihtb.ifmo.ru/ru/article/11541/razrabotka_testodelitelya_s_utochnennym_otmerivaniem_dozy_.htm (дата обращения: 07.08.2020). – Рез. англ.
14. **Шеламова, С. А.** Влияние ферментированного растительного масла на адгезионные свойства теста / С. А. Шеламова, Н. М. Дерканосова, Ю. А. Тырсин [и др.] // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. – 2013. – № 2 (19). – С. 37–41. – URL: http://oreluniver.ru/public/file/archive/2_2013.pdf (дата обращения: 07.08.2020). – Рез. англ.
15. **Анисимова, Л. В.** Реологические свойства теста из смеси пшеничной и люпиновой муки / Л. В. Анисимова, Е. С. Серебrenникова, В. Е. Бондаренко [и др.] // Ползуновский вестник. – 2018. – № 4. – С. 40–44. – URL: http://elib.altstu.ru/journals/Files/pv2018_04/pdf/040Anisimova.pdf (дата обращения: 07.08.2020). – Рез. англ.
16. **Васечкин, М. А.** Влияние пневмообдува на реологические свойства мучного теста / М. А. Васечкин, О. А. Носов, Ю. С. Витко // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2010. – № 6. – С. 52–53.
17. **Бегеулов, М. Ш.** Реологические свойства теста / М. Ш. Бегеулов // Хлебопродукты. – 2003. – № 2. – С. 18–19. – URL: <https://khlebprod.ru/old/digest1.php?nid=0203> (дата обращения: 07.08.2020). – Рез. англ.
18. **Ионов, П. А.** Разработка стенда для оценки технического состояния объемных гидроприводов с гидравлическим нагружающим устройством / П. А. Ионов, П. В. Сенин, С. В. Пьянзов [и др.]. – DOI 10.15507/2658-4123.029.201904.529-545 // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 4. – С. 529–545. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/86-19-4/735-10-15507-0236-2910-029-201904-4> (дата обращения: 07.08.2020). – Рез. англ.
19. **Mikhailov, V. V.** Electrosark Alloying of Titanium and Its Alloys: the Physical, Technological, and Practical Aspects. Part I. The Peculiarities of the Mass Transfer and the Structural and Phase Transformations in the Surface Layers and Their Wear and Heat Resistance / V. V. Mikhailov, A. E. Gitlevich, A. D. Verkhoturov [et al.]. – DOI 10.3103/S1068375513050074 // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2013. – Vol. 49, Issue 5. – Pp. 373–395. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375513050074> (дата обращения: 07.08.2020). – Рез. англ.
20. **Wei-fu, W.** Fabrication of Stainless Steel Microstructure Surface by Electro-Sark Deposition / W. Wei-fu. – DOI 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.05.026 // Surface Technology. – 2017. – Vol. 46, Issue. 5. – Pp. 159–164. – URL: <https://www.cnki.net/kcms/doi/10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.05.026.html> (дата обращения: 07.08.2020). – Рез. англ.



21. **Gordienko, P. S.** Electrophysical Model of the Erosion of Electrodes under the Energy Pulse Effect / P. S. Gordienko, A. D. Verkhoturov, V. A. Dostovalov [et al.]. – DOI 10.3103/S1068375511030045 // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2011. – Vol. 47, Issue 3. – Pp. 206–216. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103%2FS1068375511030045> (дата обращения: 07.08.2020).

22. **Георгиевская, Е. В.** Обеспечение надежности и безопасности эксплуатации гидроагрегатов за пределами проектного срока службы / Е. В. Георгиевская // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – Т. 19, № 7–8. – С. 33–42. – URL: <https://www.energyret.ru/jour/article/view/411> (дата обращения: 07.08.2020). – Рез. англ.

23. **Мартынова, Е. Г.** Результаты микрометрических исследований деталей тестовых машин вакуумного типа / Е. Г. Мартынова, С. А. Величко, А. В. Мартынов. – DOI 10.23947/1992-5980-2019-19-3-231-241 // Вестник ДГТУ. – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 231–241. – URL: <https://www.vestnik-donstu.ru/jour/article/view/1530> (дата обращения: 07.08.2020). – Рез. англ.

Поступила 09.03.2020; принята к публикации 10.05.2020; опубликована онлайн 30.09.2020

Об авторах:

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

Мартынова Елена Геннадьевна, аспирант кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), Researcher ID: C-5023-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6870-0498>, el.mart2012@yandex.ru

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

Заявленный вклад соавторов:

С. А. Величко – анализ результатов; Е. Г. Мартынова – экспериментальные исследования, обзор и анализ литературы; В. И. Иванов – формулировка выводов, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Makhmadshoev O.Kh., Mikheev A.V. Dough Mixing Equipment. *Aktualnye voprosy sovershenstvovaniya tekhnologii proizvodstva i pererabotki produktsii selskogo khozyaystva* = Actual Issues of Improvement of Agricultural Production and Processing Technology. 2018; (20):594-596. (In Russ.)
2. Arabey E.V., Balabanov V.N. Characteristics of Equipment for Forming and Cutting Dough. *Vestnik sovremennykh issledovaniy* = Journal of Modern Research. 2017; (5-1):120-123. (In Russ.)
3. Kalachev M.V., Khromeev V.M., Zueva Yu.V. Classification of Dough Divider. Dough Divider of Foreign Brands. *Khlebopechenie Rossii* = Baking of Russia. 2007; (6):22-23. (In Russ.)
4. Burumkulov F.Kh., Ivanov V.I., Molodykh A.V., et al. Repair of Vacuum-Type Dough Dividers by Electrospark Cladding Method. *Khlebopechenie Rossii* = Baking of Russia. 2004; (2):34-36. (In Russ.)
5. Gromtsev A.S. Test Division Accuracy Studies, Replacement of the Method for Determining the Accuracy of Dough Dividing Machines. *Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv* = Processes and

Food Production Equipment. 2009; (1):40-43. Available at: http://processes.ihbt.ifmo.ru/ru/article/7267/issledovaniya_tochnosti_deleniya_testa_zamena_metodiki_opredeleniya_tochnosti_testodelitelnyh_mashin.htm (accessed 07.08.2020). (In Russ.)

6. Makarov Ye.A. Current Assortment or Stress-Free Dough Dividing Options (AGRO-3). *Khleboprodukty* = Bakery Products. 2009; (5):28-29. Available at: <https://khlebprod.ru/old/text.php?text=2382&heads=1> (accessed 07.08.2020). (In Russ.)

7. Ivanov V.I., Molodykh A.V. Evaluation of the Accuracy and Stability of the Volume Division of Dough. *Khlebopechenie Rossii* = Baking of Russia. 2006; (3):33-35. (In Russ.)

8. Burumkulov F.Kh., Ivanov V.I., Molodykh A.V., et al. Dosing Error and Dough Leakage in Vacuum Type Dough Dividers. *Khlebopechenie Rossii* = Baking of Russia. 2004; (6):34-37. (In Russ.)

9. Alexeev G.V., Gromcev A.S., Leu A.G. Experimental Specification of Conditions for Improving the Accuracy of Liquid Dosing. *Tekhnika mashinostroeniya* = Engineering Technology. 2016; 23(3):57-63. (In Russ.)

10. Andreeva Ye.V. Determination of Rational Parameters of Working Elements of Dough Dividing Machines. *Inzhenerno-tehnicheskoe obespechenie APK* = Engineering and Technical Support of Agrarian and Industrial Complex. 2007; (1):41. (In Russ.)

11. Hayday G.S., Hayday I.V., Novak L.L. The Impact of Growing and Postharvest Fractionation Agrotechnic on Flour Milling and Baking Properties of Wheat. *Naukoviy oglyad* = Scientific Review. 2014; 3(2):137-145. Available at: <https://naukajournal.org/index.php/naukajournal/article/view/142> (accessed 07.08.2020). (In Ukr.)

12. Voloshenko S.V., Gladkiy F.F. The Effective Enzyme Technology of Oils Degumming. *Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* = Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2012; 4(6):4-6. Available at: <http://journals.urau.ru/eejet/article/view/5582> (accessed 07.08.2020). (In Russ.)

13. Palchikov A.N., Kopilets V.I. Development of a Dough Divider with Accurate Dose Measurement. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya: protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv* = Scientific journal NRU ITMO. Series: Processes and Food Production Equipment. 2015; (1):203-208. Available at: http://processes.ihbt.ifmo.ru/ru/article/11541/razrabotka_testodelitelya_s_utochnennym_otmerivaniem_dozy_.htm (accessed 07.08.2020). (In Russ.)

14. Shelamova S.A., Derkanosova N.M., Tyrsin Yu.A., et al. Influence of the Fermented Vegetable Oil on Adhesive Properties of Dough. *Tekhnologiya i tovarovedenie innovatsionnykh pishchevykh produktov* = Technology and the Study of Merchandise of Innovative Foodstuffs. 2013; (2):37-41. Available at: http://oreluniver.ru/public/file/archive/2_2013.pdf (accessed 07.08.2020). (In Russ.)

15. Anisimova L.V., Serebrennikova Ye.S., Bondarenko V.Ye., et al. Rheological Properties of Dough Made of a Mixture of Wheat and Lupine Flour. *Polzunovskiy vestnik* = Polzunov's Bulletin. 2018; (4):40-44. Available at: http://elib.altstu.ru/journals/Files/pv2018_04/pdf/040Anisimova.pdf (accessed 07.08.2020). (In Russ.)

16. Vasechkin M.A., Nosov O.A., Vitko Yu.S. The Influence of Pneumatic Blowing on the Rheological Properties of the Flour Dough. *Khranenie i pererabotka sel'hozsyrya* = Storage and Processing of Farm Products. 2010; (6):52-53. (In Russ.)

17. Begeulov M.Sh. Dough Rheological Properties. *Khleboprodukty* = Bakery Products. 2003; (2):18-19. Available at: <https://khlebprod.ru/old/digest1.php?nid=0203> (accessed 07.08.2020). (In Russ.)

18. Ionov P.A., Senin P.V., Pyanzov S.V., et al. Developing a Stand for Evaluating Technical Condition of Volumetric Hydraulic Drives with a Hydraulic Loading Device. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(4):529-545. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.529-545>

19. Mikhailov V.V., Gitlevich A.E., Verkhoturov A.D., et al. Electrosplark Alloying of Titanium and Its Alloys: the Physical, Technological, and Practical Aspects. Part I. The Peculiarities of the Mass Transfer and the Structural and Phase Transformations in the Surface Layers and Their Wear and Heat Resistance. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2013; 49(5):373-395. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375513050074>



20. Wei-fu W. Fabrication of Stainless Steel Microstructure Surface by Electro-Spark Deposition. *Surface Technology*. 2017; 46(5):159-164. (In Chin.) DOI: <https://doi.org/10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.05.026>

21. Gordienko P.S., Verkhoturov A.D., Dostovalov V.A., et al. Electrophysical Model of the Erosion of Electrodes under the Energy Pulse Effect. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2011; 47(3):206-216. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375511030045>

22. Georgievskaya E.V. The Reliability and Operation Safety of Hydraulic Units beyond Design Lifetime. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* = Power Engineering: Research, Equipment, Technology. 2017; 19(7-8):33-42. Available at: <https://www.energyret.ru/jour/article/view/411> (accessed 07.08.2020). (In Russ.)

23. Martynova E.G., Velichko S.A., Martynov A.V. Micrometric Research Results of Vacuum Dough Divider Components. *Vestnik DGTU* = Don State Technical University Bulletin. 2019; 19(3):231-241. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-3-231-241>

Received 09.03.2020; revised 10.05.2020; published online 30.09.2020

About the authors:

Sergey A. Velichko, Senior Lecturer of Technical Service Machines Chair of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Researcher ID: G-9021-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6254-5733>, velichko2005@yandex.ru

Elena G. Martynova, Postgraduate Student of Technical Service Machines Chair of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Researcher ID: C-5023-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6870-0498>, el.mart2012@yandex.ru

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

Contribution of the authors:

S. A. Velichko – analyzing of the results; E. G. Martynova – experimental research, literature review and analysis; V. I. Ivanov – formulation of conclusions, writing the draft.

All authors have read and approved the final manuscript.

МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING

УДК 629.3.01:004.94

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202003.464-479



Проектирование электромобиля-трайка на базе параметрических CAD/CAE-моделей

М. В. Чугунов*, И. Н. Полунина, А. М. Пьянзин
ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)

*m.v.chugunov@mail.ru

Введение. Национальные технологические инициативы, направленные на разработку и внедрение в инженерную практику средств High-Tech и основанные на концепции «Индустрия 4.0», требуют соответствующих технических решений для всех этапов жизненного цикла изделия от проектирования до утилизации. Реализация концепции предполагает формирование технологических групп и рынков по разным направлениям, в частности Auto.Net. При этом стадия проектирования изделия является базовой и должна быть реализована в форме, обеспечивающей весь жизненный цикл изделия на принципах этой концепции.

Материалы и методы. В статье представлена методика и результаты проектирования электромобиля-трайка в среде интегрированных CAD/CAE-систем. Процесс проектирования представляет собой разработку цифровых параметрических моделей разного типа и уровня по принципу сверху-вниз и снизу-вверх. Параметрические свойства моделей обеспечивают возможности эффективной многовариантной разработки проектных решений, включая конструирование, анализ, оптимизацию. Проектные решения разработаны в среде CAD/CAE/CAM/PDM/PLM SolidWorks (Motion, Simulation).

Результаты исследования. Результатами исследования являются рациональные траектории проектирования конструкций рассматриваемого класса в среде SolidWorks, а также проектное решение электромобиля-трайка в виде системы интегрированных параметрических моделей, включая 3D-модели деталей и сборок, модели теоретической механики, конечно-элементные модели для решения задач механики деформируемого твердого тела в виде линейной и нелинейной статики, линейной и нелинейной динамики. Для наглядности приводятся видеоролики, иллюстрирующие полученные результаты.

Обсуждение и заключение. В исследовании представлена траектория проектирования электромобиля-трайка, основанная на корректной постановке задач проектирования и предусматривающая рациональный выбор средств, инструментов и технологий из штатного функционала SolidWorks. Траектория проектирования обеспечивает как эффективное решение задач проектирования, так и оценку адекватности полученных результатов. В части возможной перспективы этой работы следует указать решение оптимизационных задач по различным критериям эффективности проекта, разработку интегрированной (цифровой и натурной) модели электромобиля-трайка, в цифровой части отвечающей требованиям, предъявляемым к цифровым двойникам. При этом двунаправленные ассоциативные связи между виртуальной и натурной составляющими интегрированной модели позволяют решить ряд дополни-

© Чугунов М. В., Полунина И. Н., Пьянзин А. М., 2020



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



тельных задач: контроль точности цифровых моделей, наделение цифровой модели синергетическими свойствами, планирование траектории движения и беспилотное управление на принципах IoT (интернета вещей).

Ключевые слова: электромобиль, CAD, CAE, динамика и прочность, моделирование транспортных средств, МКЭ, цифровой двойник для электромобиля

Для цитирования: Чугунов, М. В. Проектирование электромобиля-трайка на базе параметрических CAD/CAE-моделей / М. В. Чугунов, И. Н. Полунина, А. М. Пьянзин. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202003.464-479 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 3. – С. 464–479.

E-Tricycle Vehicle Design Based on Parametric CAD/CAE Models

M. V. Chugunov*, I. N. Polunina, A. M. Pjanzin

National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

**m.v.chugunov@mail.ru*

Introduction. National Technology Initiatives (STI), designed to develop and implement High-Tech tools into engineering practice and based on the Industry 4.0 concept, require appropriate technical solutions for all phases of the product lifecycle from design to disposal. Implementation of the concept involves the formation of technological groups and markets in different directions in particular one of the emerging markets of STI is Auto.Net. At the same time, the product design stage is basic and should be implemented in a form ensuring the entire life cycle of the product on the principles of this concept.

Materials and Methods. The article presents the methodology and results of designing an electric vehicle-tricycle in the integrated CAD/CAE systems. The design process is the development of digital parametric models of different types and levels on a top-down and bottom-up basis. The parametric properties of models provide the ability to develop design solutions efficiently, including design, analysis and optimization.

The design solutions are developed in the CAD/CAE/CAM/PDM/PLM SolidWorks (Motion, Simulation) software.

Results. The results of the study are rational design paths for the structures of the class under consideration in the SolidWorks software, as well as design solution of the electric tricycle-vehicle in the form of a system of integrated parametric models, including 3D models of parts and assemblies, models of solid-state mechanics, finite-element models for solving problems of mechanics of the deformed solid body in the form of linear and non-linear statics, linear dynamics, parametric optimization. Videos of the results are provided for illustrative purposes.

Discussion and Conclusion. In the research, the design trajectory of the electric vehicle-tricycle based on correct formulation for the design problems and providing the rational choice of means, tools, and technologies from basic SolidWorks functionality is presented. The trajectory provides both an efficient solution to design problems and an assessment of the adequacy of the results obtained. In terms of the possible perspective of this work, it is necessary to specify the solution of optimization tasks according to various criteria of project efficiency and the development of an integrated (cyber-physical) model of electric vehicle-tricycle, which meets the requirements of digital twins. At the same time, bidirectional associative links between virtual and physical components of the integrated model will solve a number of additional problems: control of the accuracy of digital models, giving the digital model synergistic properties, planning of the trajectory and unmanned control on the principles of IoT (Internet of Things).

Keywords: electric vehicle, CAD, CAE, dynamics and strength, vehicle modeling, FEM, digital twin for car

For citation: Chugunov M.V., Polunina I.N., Pjanzin A.M. E-Tricycle Vehicle Design Based on Parametric CAD/CAE Models. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(3):464-479. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.464-479>

Введение

Национальные технологические инициативы (НТИ), основанные на концепции «Индустрия 4.0», предусматривают существенное расширение технологических сред по составу, совершенствование их структуры, повышение эффективности методов конструкторской и технологической подготовки производства¹ [1]. При этом этап проектирования производственного процесса является базовым, включает в себя разработку интегрированных моделей проектируемого объекта разного типа и должен быть реализован в форме, обеспечивающей весь жизненный цикл изделия на принципах концепции [2].

Современные методы и средства проектирования (в частности CAD/CAE), по существу, представляют собой технологии Hi-Tech и отличаются высокой эффективностью. Они изменили содержание не только проектно-конструкторской, но и исследовательской деятельности прикладного характера. В этих условиях решение инженерных задач для широкого спектра технических систем сводится к корректной постановке задачи, рациональному выбору средств, инструментов и технологий ее решения, обоснованной оценке и интерпретации полученных результатов. Математические и программно-алгоритмические модели разрабатываются, как правило, в виде приложений к уже существующим системам в тех случаях, когда штатный функционал этих систем не позволяет решить поставленную задачу в полном объеме.

Поскольку тяжелые CAD/CAE-системы обладают весьма широким, разнообразным функционалом и развитым интерфейсом, то актуальной является

проблема формирования рациональной (оптимальной) траектории проектирования, которая состоит в обоснованном выборе типа используемых моделей, а также инструментов и методов для их разработки и анализа. Эта траектория всегда специфична как для объекта, так и для среды проектирования.

В данной работе рассматривается задача формирования траектории проектирования для электромотоцикла-трейка в среде SolidWorks (Motion Simulation). В качестве основного инструмента используется параметризация разрабатываемых моделей как на уровне CAD-, так и на уровне CAE-сред. Таким образом, результатом проектирования является цифровая интегрированная параметрическая модель конструкции. Необходимо уточнить смысл используемых нами понятий (параметризация и интегрированность моделей), которые в литературе часто трактуются неоднозначно. Параметрические модели обладают двумя основными свойствами: зависимость модели от набора переменных, варьируемых в заданном диапазоне; независимость сформированных в процессе проектирования взаимосвязей (отношений) от значения переменных. Интегрированность модели состоит в реализации двунаправленных ассоциативных связей между составляющими ее моделями разного типа и уровня.

Обзор литературы

Преимущества параметрического проектирования проявляют себя в двух основных аспектах: повышение творческого потенциала конструктора при вариантном проектировании; упрощение постановки и решения задачи параметрической оптимизации, если все или

¹ Шваб К. Четвертая промышленная революция. М.: Эксмо, 2016. 208 с.

часть параметров модели рассматриваются в качестве управляемых.

Как правило, в литературе даются различные техники и подходы к параметризации именно в этих двух аспектах².

При разработке интегрированных моделей параметризация имеет свои специфические особенности. Так, в интегрированных CAD/CAE-средах параметризация конечно-элементной модели предполагает ассоциативные связи между глобальными переменными и конечно-элементной сеткой. Вопросы подобного рода подробно рассмотрены в ряде работ³ [3]. Следует отметить также, что каждый конкретный вариант параметризации тесно связан с типом модели твердого тела (объемное тело, оболочка, стержневая система и т. д.) и с постановкой задачи в целом. Так, для автомобильной техники вопросы параметризации рассмотрены в следующих аспектах: из условий безопасности водителя, для проектирования несущих систем и кузова⁴ [4].

Среди задач анализа конструкции следует прежде всего выделить задачи многотельной механики, рассматривающей системы тел (подрессоренных и неподрессоренных масс), связанных между собой при помощи упругих и диссипативных элементов. В математической части решение задачи сводит-

ся к системам дифференциальных и алгебраических уравнений⁵.

Для реальных конструкций такие модели включают в себя несколько десятков (или более) твердых тел, что существенно усложняет как аналитический вывод уравнений движения, так и их решение.

Технологии проектирования и анализа проектных решений в среде современных CAD/CAE-систем не предполагают непосредственное формирование пользователем математических моделей, однако корректная постановка задачи невозможна без глубокого знания и понимания базовых положений механики твердого тела⁶.

Технические особенности самой конструкции и технологические аспекты ее анализа в той или иной среде проявляют себя в необходимости интегрировать разные программные среды. Так, решение задачи многотельной механики реализовано в интегрированных средах EULER и CAE Fidesys [5].

Чаще всего в литературе приводятся результаты решения частных задач для анализа состояния и поведения элементов конструкции автомобиля. В таких случаях весьма важной проблемой является выбор и реализация средств интеграции программных систем разного типа.

В одной из работ выполнено моделирование на основе Matlab/Simulink

² K. K. Choi, N.-H. Kim. Introduction to Structural Design. In: Structural Sensitivity Analysis and Optimization 1 // Mechanical Engineering Series. New York: Springer, 2005. Pp. 3–36. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/0-387-27169-4_1 (дата обращения: 07.08.2020); Duddeck F., Zimmer H. Modular Car Body Design and Optimization by an Implicit Parameterization Technique via SFE CONCEPT // Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress. 2013. Pp. 413–424. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-33835-9_39 (дата обращения: 07.08.2020).

³ The Parametrical Design and Optimization of Body Frame Based on Crashworthiness and Lightweight / Y. Men [et al.] // Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress. 2013. Pp. 349–360. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-33835-9_33 (дата обращения: 07.08.2020); Methods for the Design and Development / H. Anacker [et al.] // Design Methodology for Intelligent Technical Systems. Heidelberg: Springer, 2014. Pp. 183–500. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-45435-6_5 (дата обращения: 07.08.2020).

⁴ The Parametrical Design and Optimization...

⁵ Тарасик В. П. Теория движения автомобиля: учебник для вузов. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 478 с.

⁶ Developments of Multibody System Dynamics: Computer Simulations and Experiments / Y. Wan.-Suk [et al.] // Multibody System Dynamics. 2007. Vol. 18. Pp. 35–38. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11044-007-9062-6> (дата обращения: 07.08.2020).

и Universal Mechanism для взаимодействия шины с опорной поверхностью и модель антиблокировочной системы тормозов (АБС) в целом [6]. Задача анализа эксплуатационной нагруженности рамы автомобиля решена в другой работе, при этом последовательность нагружения формируется в системе FRUND, а анализ напряженно-деформированного состояния – в системах SolidWorks Simulation и Ansys [7]. Представлен обзор программных средств, поддерживающих интеграцию в виде Standalone и AddIn приложений [8]. Для инженера второй вариант является предпочтительней, поскольку непосредственно позволяет решать задачу проектирования во взаимосвязи с другими этапами жизненного цикла изделия, используя единый программный и пользовательский интерфейс CAD/CAM/CAE/CAPP/PDM/PLM.

Выполнен сравнительный анализ динамических характеристик автомобиля на базе Truck-Sim и ADAMS на разных сценариях поведения, рассматриваются вопросы прочности для шаровой опоры передней подвески автомобиля, в частности выполнен конечно-элементный анализ пальца шаровой опоры [9; 10]. Подробно рассмотрены вопросы моделирования и анализа кинематических пар (шарнирных соединений), актуальных для систем автомобильных подвесок и конструкции автомобиля в целом, конструктивные и кинематические схемы, а также исследованы возможные модели для подвесок [11–14]. Выполнен анализ несущих систем автомобиля [15; 16].

Представлены концептуальные аспекты интеграции инструментов и объектов 3D-моделирования с программными средами решения задач динамического анализа, реализованными в виде объектно-ориентированной библиотеки DAMOS-C [17]. Такой подход позволяет внедрить собственные математические модели в CAE-среды на уровне исходных текстов.

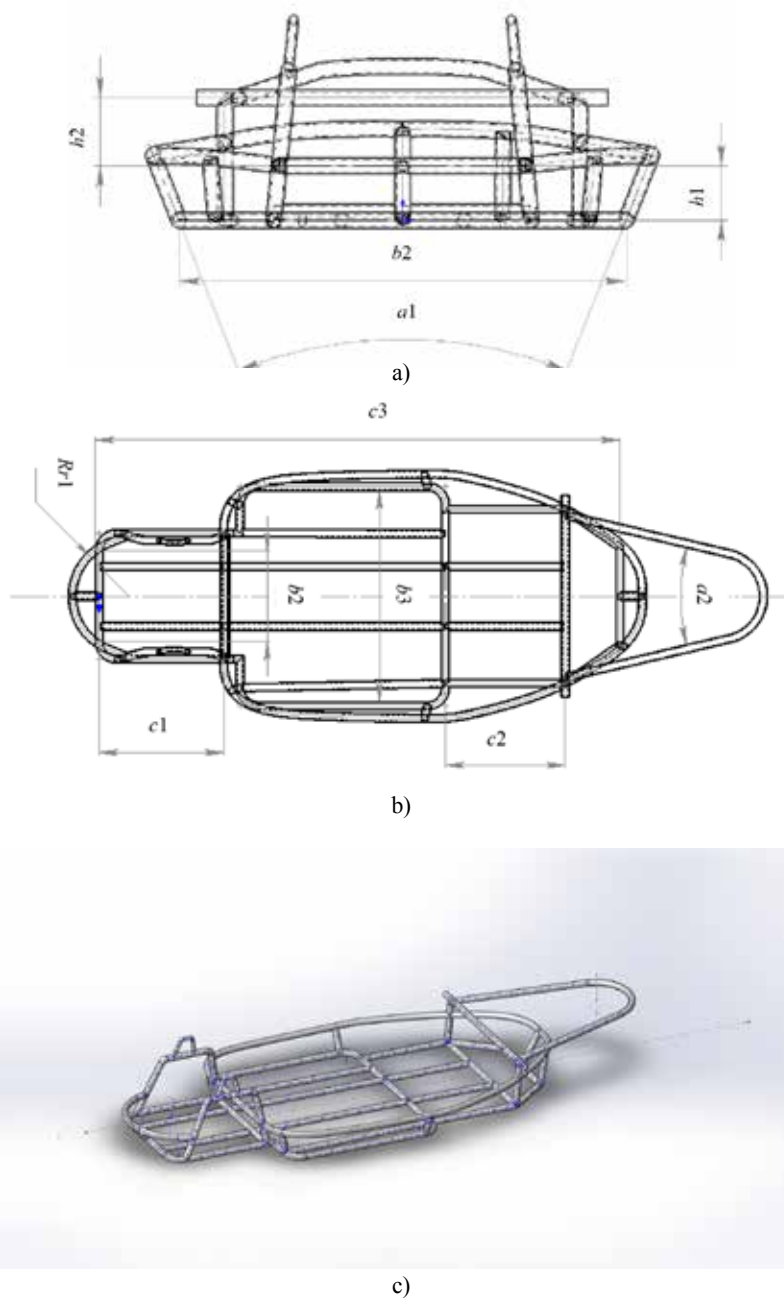
Задачи моделирования автомобиля, включая все его системы в их взаимосвязи и в одной интегрированной среде, в литературе встречаются, как правило, в упрощенном виде [18]. Исключением является работа С. Алексеева и коллег, в которой построена модель для анализа состояния и поведения BIW-системы (body in white) автомобиля, соответствующая требованиям, предъявляемым к цифровому двойнику [19].

Материалы и методы

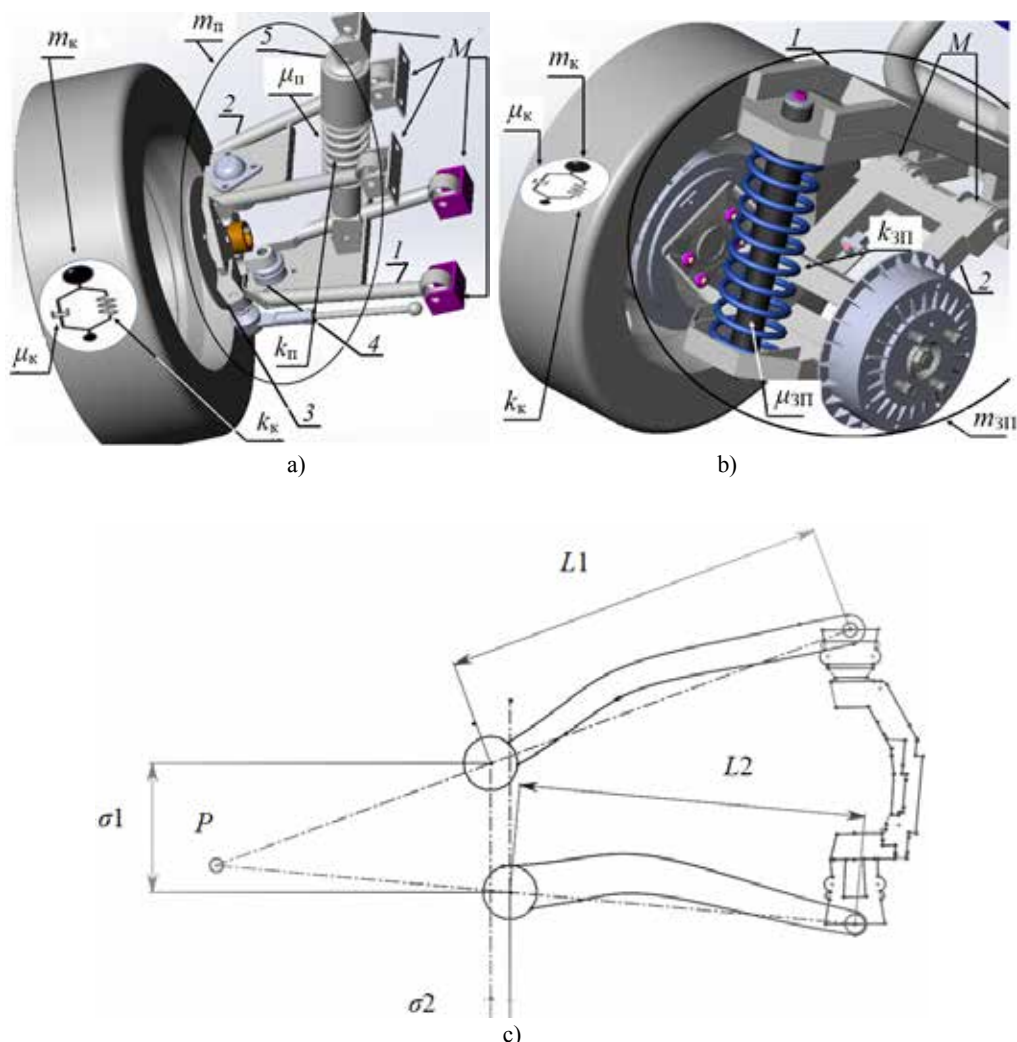
Электромобиль-трайк включает в себя следующие основные системы: несущую раму, передние и заднюю подвески с мотор-колесами, систему рулевого управления, систему трансформации, кузов.

На рисунке 1 показана 3D-модель и чертеж рамы с размерами, связанными со значениями соответствующих глобальных переменных ($b_i, c_i, h_i, a_k, k=1,2, i=1,3, j=1,2, R_{r1}$). Модель построена на основе трехмерного эскиза, а твердотельные элементы представляют собой трубы с кольцевым поперечным сечением (в терминологии SolidWorks – «сварные конструкции»). Такой вариант проектирования представляется в данном случае более рациональным, по сравнению с возможной альтернативной процедурой «по траектории», за счет многовариантности обработки соединений труб.

На рисунке 2а показана 3D-модель базового варианта двухрычажной передней подвески, совмещенная с элементами динамической схемы конструкции. Конструкция сборки включает в себя следующие основные детали: рычаг верхний 1, рычаг нижний 2, поворотный кулак 3, шаровой шарнир 4, амортизатор 5. Здесь m_k, m_n – массы; μ_k, μ_n – коэффициенты демпфирования; k_k, k_n – коэффициенты жесткости колеса и подвески соответственно; M – масса электромобиля за исключением указанных систем и деталей. Аналогичным образом динамическую схему и конструкцию задней



Р и с. 1. Несущая рама
F i g. 1. Chassis frame



Р и с. 2. а) передняя подвеска; б) задняя подвеска; в) мгновенный центр поворота
F i g. 2. a) front suspension; b) rear suspension; c) instantaneous center of rotation

подвески иллюстрирует рисунок 2б. На этом рисунке индексы «зп» для параметров массы, упругости и диссипации соответствуют задней подвеске.

Конструкция рычагов подвески была модифицирована нами так, чтобы обеспечить возможность варьи-

ровать и контролировать положение мгновенного центра поворота подвески (рис. 2с), а также для наиболее рационального создания конечно-элементной сетки [13].

Видеоролики иллюстрируют параметрические свойства этих моделей⁷.

⁷ Видеоролик № 1 [Электронный ресурс]. URL: https://drive.google.com/file/d/1ESeFg2tvZBdMCB7H4n_kxcDsFRf0wVm/view?usp=sharing (дата обращения: 07.08.2020); Видеоролик № 2 [Электронный ресурс]. URL: https://drive.google.com/file/d/1H1RGtTdx9kdqHi9Pyb4OeYNb_k0kFiDr/view?usp=sharing (дата обращения: 07.08.2020).

3D-модель конструкции в целом реализована как многоуровневая сборка, фотореалистическое изображение которой сформировано средствами SolidWorks PhotoView и приведено на рисунке 3.

В среде SolidWorks Motion реализовано решение задачи анализа динамических характеристик электромобиля, преодолевающего препятствие в виде лежащего полицейского при заданной скорости движения, результат моделирования проиллюстрирован видеороликом⁸. Колебания электромобиля в вертикальном направлении, которые можно наблюдать в этом ролике, связаны с включением силы тяжести в начальный момент движения.

Важными особенностями постановки данной задачи в терминах механики деформируемого твердого тела являются следующие.

1. Для анализа сопряжений в сборке используется модель твердого тела. Возникающие при этом деформации считаются пренебрежимо малыми и не учитываются. Подобным образом без учета локальных деформаций и диссипативных эффектов моделируются все сопряжения типа «концентричность».

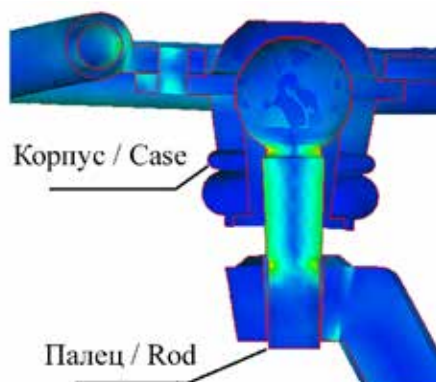
2. Контактные взаимодействия колеса с дорожным покрытием, а также пальца с корпусом в шаровом шарнире (рис. 4) носят сложный характер, требуют исключить возможность взаимного проникновения тел. В среде SolidWorks Motion силы контактного взаимодействия такого типа определяются приближенно посредством задания интегральных значений параметров жесткости и диссипации, а также численной оценки величин взаимного проникновения тел в процессе интегрирования уравнений движения.



Р и с. 3. Фотореалистическое изображение электромобиля (SolidWorks PhotoView)

F i g. 3. Photo realistic view for e-car (SolidWorks PhotoView)

⁸ Видеоролик № 3 [Электронный ресурс]. URL: <https://drive.google.com/file/d/1TVC7LJTLXyLNiyqPy08SyK1WJOuexJBM/view?usp=sharing> (дата обращения: 07.08.2020).

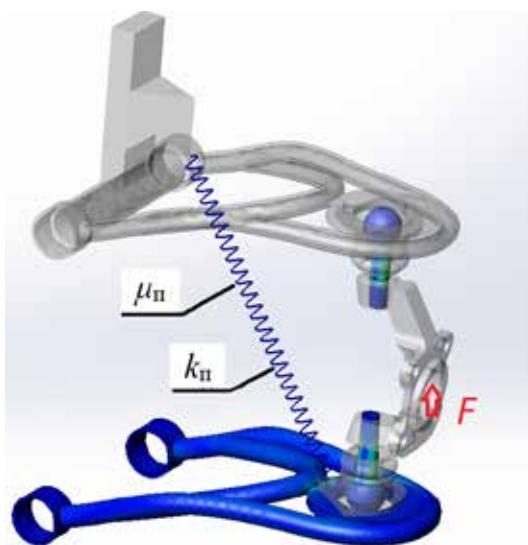


Р и с. 4. Контактная задача для пальца шарового шарнира
F i g. 4. Contact problem for ball joint rod

3. «Точное» решение задачи предусматривает анализ сложного контактного взаимодействия твердых тел на микроуровне, учет больших перемещений, обусловленных наличием элементов малой жесткости (пружин), диссипации энергии. То есть в общем случае задача должна быть решена как фи-

зически и геометрически нелинейная задача динамики для деформируемого твердого тела.

На рисунке 5 представлены результаты решения нелинейной задачи анализа статической прочности для передней подвески в напряжениях по Мизесу. В качестве внешнего воздействия



Р и с. 5. Карта напряжений по Мизесу для статического анализа передней подвески в нелинейной постановке

F i g. 5. Von Mises stress map for front suspension system

рассматривается вертикальная сила F , распределенная по цилиндрической поверхности центрального отверстия, vyplненного под вал колеса.

На рисунке 5 показаны наиболее напряженные детали: нижний рычаг и палец шаровой опоры для наиболее опасного положения. Видеоролик иллюстрирует развитие напряженно-деформированного состояния конструкции при постепенном возрастании силы от нуля до заданной⁹. Задача представляет интерес именно как инструмент «точного» определения картины качественного распределения и концентрации напряжений.

Следует отметить следующие обстоятельства: выявленные концентраторы и картина распределения напряжений (рис. 5) соответствуют результатам других работ, определение точных значений напряжений требует решения нелинейной динамической задачи, еще более трудоемкой [8; 10–12]. В практике инженерных расчетов принято в таких случаях ограничиваться решением линеаризованных динамических задач.

SolidWorks Motion позволяет решить линеаризованную динамическую задачу для твердых тел в терминах механики деформируемого твердого тела в следующих двух вариантах.

1. Осуществить экспорт в конечно-элементный процессор (SolidWorks Simulation) внешних по отношению к детали сил, заданных как функции времени на интервале в контексте Motion. Такой подход имеет ряд неоспоримых преимуществ: удобство и простота использования интерфейса Motion; возможность наблюдать изменение динамических напряжений и деформированного состояния детали во времени непосредственно в процессе анимации движения сборки в окне SolidWorks Motion.

Недостатками данного подхода является то, что экспорт сил можно осуществить только для отдельной детали, находящейся на самом верхнем уровне сборки, а также ограниченные возможности формирования конечно-элементной сетки.

2. Второй вариант предусматривает стандартное формирование задачи конечно-элементного анализа с использованием полного спектра функционала и интерфейса Simulation непосредственно после экспорта сил взаимодействия из Motion в Simulation.

Приведем результаты анализа динамики и прочности электротрайка для задач в двух указанных постановках. Рисунок 6 иллюстрирует распределение напряжений по Мизесу для деталей передней подвески в процессе преодоления препятствия в наиболее опасном состоянии. Приведенные карты напряжений положены на шкалу времени и отображаются непосредственно в окне Motion.

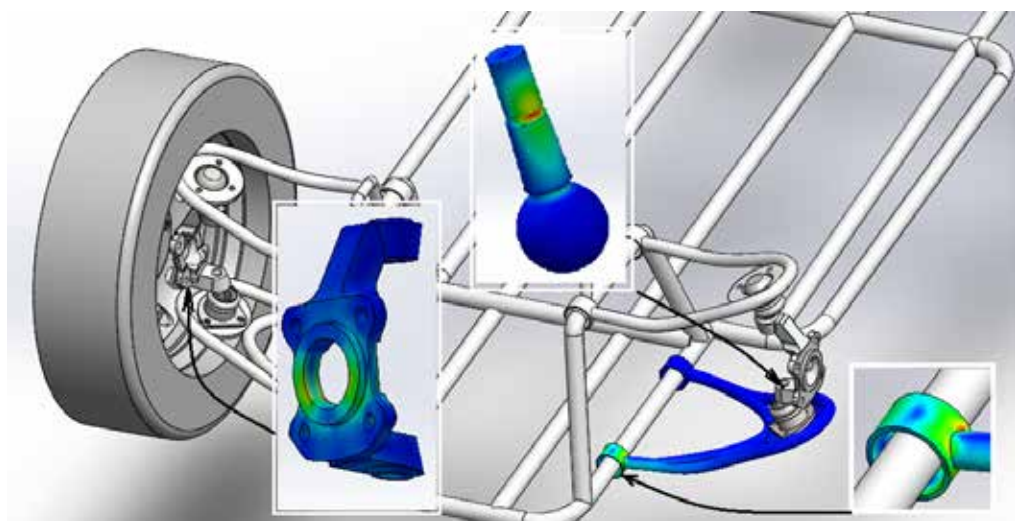
Аналогичные результаты (рис. 7) получены для нижнего рычага задней подвески.

Для создания конечно-элементной сетки верхнего рычага задней подвески и несущей рамы штатного функционала, доступного в Motion, оказалось недостаточно. Для рамы потребовалось использование инструментов управления сеткой, причем наиболее экономичный вариант реализуется для оболочечной модели. Результат в виде карты динамических напряжений по Мизесу для наиболее опасного состояния показан на рисунке 8.

Результаты исследования

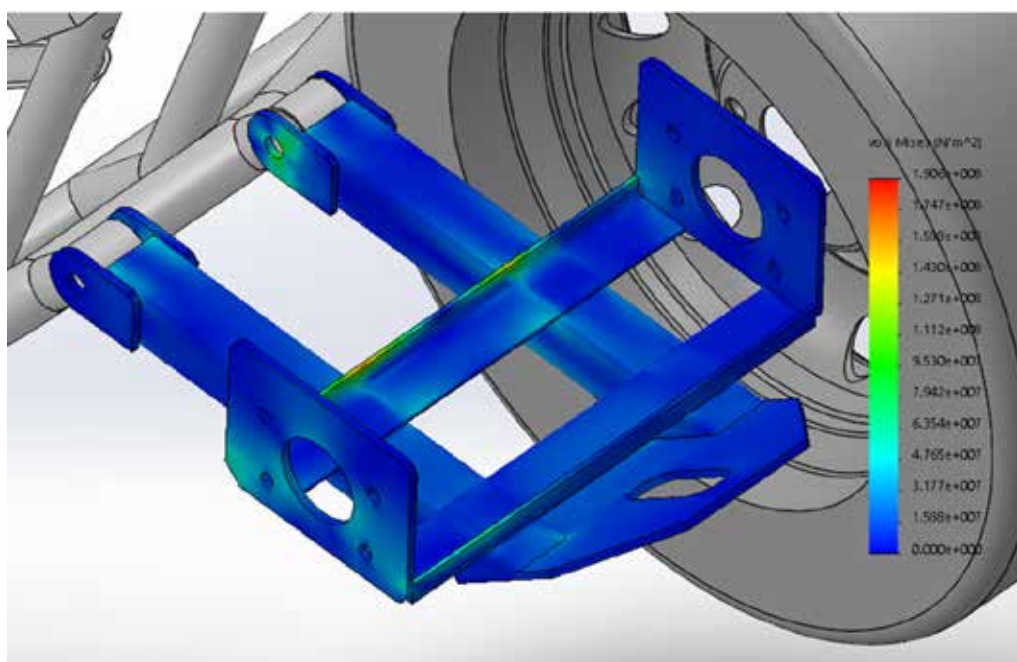
Разработанные CAD/CAE-модели были использованы в качестве объектов и инструментов вариантного проектирования. При этом преследовалась следующая цель: снизить материалоемкость конструкции при удовлетворении

⁹ Видеоролик № 3 [Электронный ресурс]. URL: <https://drive.google.com/file/d/1nzer-sruqOq9X-CFwQ9ZyIINcZym3zz1Z/view?usp=sharing> (дата обращения: 07.08.2020).



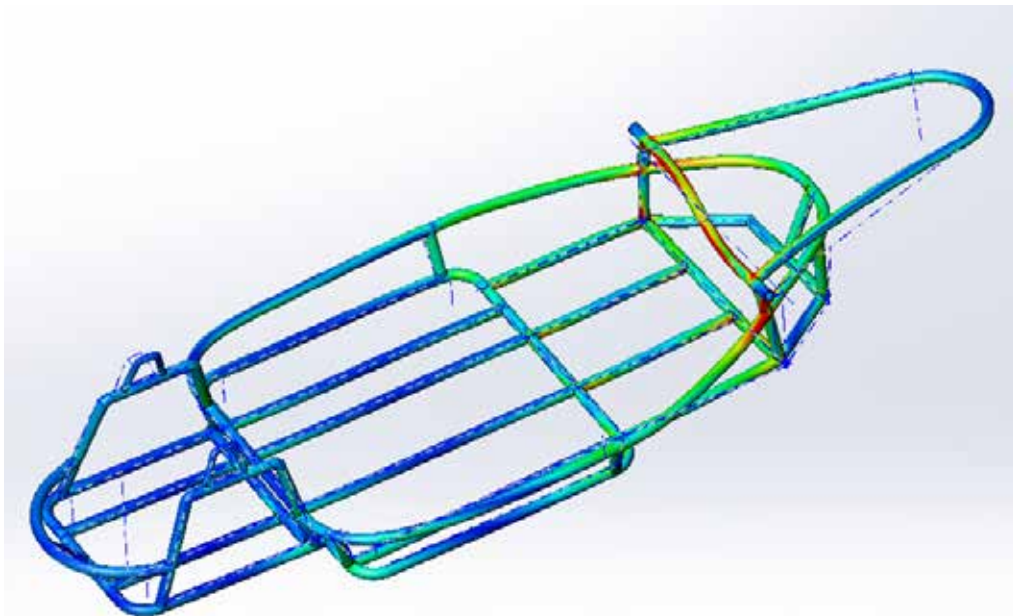
Р и с. 6. Карта динамических напряжений по Мизесу для конечно-элементного анализа деталей передней подвески в среде Motion

F i g. 6. Von Mises dynamics stress map for FEM analysis of the front suspension system parts by Motion software



Р и с. 7. Карта динамических напряжений по Мизесу для конечно-элементного анализа деталей нижнего рычага задней подвески в среде Motion

F i g. 7. Von Mises dynamics stress map for FEM analysis of the down arm for the rear suspension system part by Motion software



Р и с. 8. Карта динамических напряжений по Мизесу для конечно-элементного анализа несущей рамы в среде Simulation

F i g. 8. Von Mises dynamics stress map for FEM analysis of the chassis frame by Simulation software

условий прочности по динамическим напряжениям.

Исходная масса рассматриваемой части конструкции электромобиля (несущей рамы и подвесок) составляла 91 кг. В процессе вариантного проектирования (было рассмотрено 15 вариантов) масса конструкции была снижена на 12,5 %.

Ниже приведены результирующие значения глобальных переменных модели:

$$\begin{aligned} b_1 &= 700 \text{ мм}, b_2 = 420 \text{ мм}, b_3 = 600 \text{ мм}; \\ a_1 &= 43^\circ, a_2 = 26^\circ; \\ c_1 &= 400 \text{ мм}, c_2 = 400 \text{ мм}, c_3 = 1800 \text{ мм}; \\ h_1 &= 90 \text{ мм}, h_2 = 110 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Физико-механические параметры материала соответствуют малоуглеродистой стали. Снаряженная масса

электромобиля 400 кг. Скорость преодоления препятствия при виртуальных испытаниях 5 км/ч.

Максимальные динамические напряжения по Мизесу: в нижнем рычаге передней подвески $\sigma_{\text{ни}} = 190$ МПа; в пальце шарового шарнира $\sigma_{\text{п}} = 155$ МПа; в нижнем рычаге задней подвески $\sigma_{\text{зи}} = 200$ МПа; в несущей раме $\sigma_{\text{р}} = 220$ МПа.

Обсуждение и заключение

Максимальные напряжения в несущей раме близки к пределу текучести, но носят при этом выраженный локальный характер. Варьирование переменных модели влечет за собой плохо предсказуемое перемещение концентратора напряжений в объеме конструкции. Необходимо провести дополнительное исследование с целью установить возможную сингулярность решения в напряжениях для конеч-

но-элементной модели рамы. В целом конструкция удовлетворяет условиям прочности по напряжениям.

В качестве перспектив работы следует указать: решение задачи параметрической оптимизации по массе

в строгой постановке; разработку интегрированной киберфизической модели для электромобиля, обеспечивающей решение задач анализа состояния и поведения конструкции, планирования траектории и управления движением.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Боровков, А. И.** Центр компетенций Национальной технологической инициативы «Новые производственные технологии» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого / А. И. Боровков, О. И. Рождественский, Ю. А. Рябов [и др.] // Инновации. – 2019. – № 11 (253). – С. 73–88. – URL: <https://maginnov.ru/ru/zhurnal/arhiv/2019/innovacii-n11-2019/centr-kompetencij-nacionalnoj-tehnologicheskoy-iniciativy-novye-proizvodstvennye-tehnologii-sankt-peterburgskogo-politehnicheskogo-universiteta-petra-velikogo> (дата обращения: 07.08.2020). – Рез. англ.
2. **Левенцов, В. А.** Аспекты концепции «Индустрия 4.0» в части проектирования производственных процессов / В. А. Левенцов, А. Е. Радаев, Н. Н. Николаевский // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. – 2017. – Т. 10, № 1. – С. 19–31. – URL: <https://institutiones.com/industry/2981-aspekty-koncepcii-industriya-4-0.html> (дата обращения: 07.08.2020). – Рез. англ.
3. **Agarwal, D.** A CAD Based Framework for Optimizing Performance While Ensuring Assembly Fit / D. Agarwal, T. T. Robinson, C. G. Armstrong // ICSEE 2018, IMIOT 2018. Communications in Computer and Information Science. – Singapore : Springer, 2018. – Vol. 923. – Pp. 73–83. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-981-13-2396-6_7 (дата обращения: 07.08.2020).
4. **Jung, M.** Integrated Framework for Vehicle Interior Design Using Digital Human Model / M. Jung, H. Cho, T. Roh [et al.]. – DOI 10.1007/S11390-009-9287-3 // Journal of Computer Science and Technology. – 2009. – Vol. 24. – Pp. 1149–1161. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11390-009-9287-3> (дата обращения: 07.08.2020).
5. **Бойков, В. Г.** Моделирование движения механической системы, состоящей из деформируемых упругих тел, путем интеграции двух пакетов: EULER и Fidesys / В. Г. Бойков, И. В. Гаганов, Ф. Р. Файзуллин [и др.] // Чебышевский сборник. – 2017. – Т. 18, № 3. – С. 131–153. – URL: <https://www.chebsbornik.ru/jour/article/view/352/317> (дата обращения: 07.08.2020). – Рез. англ.
6. **Горелов, В. А.** Исследование движения автомобиля в программном комплексе автоматизированного моделирования динамики систем тел / В. А. Горелов, А. И. Комиссаров, Б. Б. Косицын // Журнал автомобильных инженеров. – 2016. – № 1 (96). – С. 18–23. – URL: <http://www.aae-press.ru/f/96/18.pdf> (дата обращения: 07.08.2020). – Рез. англ.
7. **Савкин, А. Н.** Анализ эксплуатационной нагруженности рамы грузового автомобиля большой грузоподъемности / А. Н. Савкин, А. С. Горобцов, А. В. Андроник [и др.] // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия: наземные транспортные системы. – 2015. – Т. 11, № 5 (165). – С. 25–29. – URL: http://www.vstu.ru/files/vstu_periodical/4793/upload/no_5165_-2015.pdf (дата обращения: 07.08.2020). – Рез. англ.
8. **Kravets, A.** Simulation and Visualization Software for Vehicle Dynamics Analysis Using Multibody System Approach / A. Kravets, M. Shcherbakov, M. Kultsova [et al.] // Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. Communications in Computer and Information Science. – Cham : Springer, 2015. – Vol. 535. – Pp. 378–390. – URL: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-23766-4_30.pdf (дата обращения: 07.08.2020).
9. **Hasagasioglu, S.** Vehicle Dynamics Analysis of a Heavy-Duty Commercial Vehicle by Using Multibody Simulation Methods / S. Hasagasioglu, K. Kilicaslan, O. Atabay [et al.]. – DOI 10.1007/s00170-011-3588-8 // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2012. – Vol. 60. – Pp. 825–839. – URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00170-011-3588-8.pdf> (дата обращения: 07.08.2020).



10. **Burcham, M. N.** Characterization and Failure Analysis of an Automotive Ball Joint / M. N. Burcham, R. Escobar, C. O. Yenusah [et al.]. – DOI 10.1007/s11668-017-0240-4 // Journal of Failure Analysis and Prevention. – 2017. – Vol. 17. – Pp. 262–274. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11668-017-0240-4#citeas> (дата обращения: 07.08.2020).
11. **Ambrosio, J.** Improved Bushing Models for General Multibody Systems and Vehicle Dynamics / J. Ambrosio, P. Verissimo. – DOI 10.1007/s11044-009-9161-7 // Multibody System Dynamics. – 2009. – Vol. 22. – Pp. 341–365. – URL <https://link.springer.com/article/10.1007/s11044-009-9161-7> (дата обращения: 07.08.2020).
12. **Vesali, F.** Dynamics of Universal Joints, Its Failures and Some Propositions for Practically Improving Its Performance and Life Expectancy / F. Vesali, M. A. Rezvani, M. Kashfi. – DOI 10.1007/s12206-012-0622-1 // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2012. – Vol. 26, Issue 8. – Pp. 2439–2449. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-012-0622-1> (дата обращения: 07.08.2020).
13. **Barton, D. C.** Suspension Systems and Components / D. C. Barton, J. D. Fieldhouse. – DOI 10.1007/978-3-319-72437-9_3 // Automotive Chassis Engineering. – Cham : Springer, 2018. – Pp. 111–124. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-72437-9_3 (дата обращения: 07.08.2020).
14. **Borisenko, V.** K&C Suspension Parameters Stability by Production Tolerances / V. Borisenko, A. Kiselev, L. Leoro [et al.]. – DOI 10.1051/e3sconf/201914007007 // E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 140. – 6 p. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/66/e3sconf_eece18_07007/e3sconf_eece18_07007.html (дата обращения: 07.08.2020).
15. **Jinturkar, A.** Weight Reduction of FSAE Vehicle Using TRIZ Principle / A. Jinturkar, R. Channa, R. Mistry [et al.] // ICORD 2017: Research into Design for Communities, Vol. 1. – Singapore : Springer, 2017. – Pp. 861–870. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-3518-0_74 (дата обращения: 07.08.2020).
16. **Чугунов, М. В.** Анализ статической прочности и жесткости несущих элементов конструкции электромобиля BravoEgo / М. В. Чугунов, В. Н. Кечемайкин, М. В. Панин [и др.] // Наукосведение. – 2016. – Т. 8, № 3. – 22 с. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/134TVN316.pdf> (дата обращения: 07.08.2020). – Рез. англ.
17. **Daberkow, A.** An Integrated Approach for Computer Aided Design in Multibody System Dynamics / A. Daberkow, E. Kreuzer. – DOI 10.1007/s003660050011 // Engineering with Computers. – 1999. – Vol. 15. – Pp. 155–170. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s003660050011> (дата обращения: 07.08.2020).
18. **Bradley, J.** A Modelling Strategy for Vehicle Dynamics Using Pro/ENGINEER / J. Bradley, G. D. Tansley, J. Dominy. – DOI 10.1007/s12283-009-0017-4 // Sports Engineering. – 2009. – Vol. 11. – Pp. 119–129. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12283-009-0017-4> (дата обращения: 07.08.2020).
19. **Alekseev, S.** NVH Analysis of Offroad Vehicle Frame. Evaluation of Mutual Influence of Body-Frame System Components / S. Alekseev, A. Tarasov, A. Borovkov [et al.] // Materials Physics and Mechanics. – 2017. – Vol. 34, no. 1. – Pp. 70–75.

Поступила 07.03.2020; принята к публикации 20.05.2020; опубликована онлайн 30.09.2020

Об авторах:

Чугунов Михаил Владимирович, заведующий кафедрой конструкторско-технологической информатики Рузаевского института машиностроения ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, доцент, Researcher ID: H-7452-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5318-5684>, m.v.chugunov@mail.ru

Полунина Ирина Николаевна, доцент кафедры конструкторско-технологической информатики Рузаевского института машиностроения ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат педагогических наук, Researcher ID: H-7473-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1093-8401>, my_pk@mail.ru

Пьянзин Антон Михайлович, студент 3 курса Рузаевского института машиностроения ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), a.m.pjanzin@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

М. В. Чугунов – разработка методологии исследования и построение моделей электромобилей; И. Н. Полунина – разработка методологии исследования и построение моделей электромобилей, численный анализ; А. М. Пьянзин – численный анализ.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Borovkov A.I., Rozhdestvenskiy O.I., Ryabov Yu.A., et al. National Technology Initiative Center for Advanced Manufacturing Technologies of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. *Innovatsii = Innovations*. 2019; (11):73-88. Available at: <https://maginnov.ru/ru/zhurnal/arhiv/2019/innovacii-n11-2019/centr-kompeten-cij-nacionalnoj-tehnologicheskoy-iniciativy-novye-proizvodstvennye-tehnologii-sankt-peterburgskogo-politehnicheskogo-universiteta-petra-velikogo> (accessed 07.08.2020). (In Russ.)
2. Leventsov V.A., Radaev A.E., Nikolaevskiy N.N. The Aspects of the “Industry 4.0” Concept within Production Process Design. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Ekonomicheskie nauki = St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*. 2017; 10(1):19-31. Available at: <https://institutiones.com/industry/2981-aspekty-koncepcii-industriya-4-0.html> (accessed 07.08.2020). (In Russ.)
3. Agarwal D., Robinson T.T., Armstrong C.G. A CAD Based Framework for Optimizing Performance While Ensuring Assembly Fit. In: ICSEE 2018, IMIOT 2018. Communications in Computer and Information Science. Singapore: Springer; 2018. 923:73-83. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-2396-6_7 (accessed 07.08.2020). (In Eng.)
4. Jung M., Cho H., Roh T., et al. Integrated Framework for Vehicle Interior Design Using Digital Human Model. *Journal of Computer Science and Technology*. 2009; 24:1149-1161. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/S11390-009-9287-3>
5. Boikov V.G., Gaganov I.V., Fayzullin F.R. Modeling the Motion of a Mechanical System Consisting of Deformable Elastic Bodies, by Integrating Two Packages: EULER and FIDESYS. *Chebyshevskiy sbornik = Chebyshevskii Sbornik*. 2017; 18(3):131-153. Available at: <https://www.chebsbornik.ru/jour/article/view/352/317> (accessed 07.08.2020). (In Russ.)
6. Gorelov V.A., Komissarov A.I., Kositsyn B.B. Passenger Car Motion Modeling in a Multibody Dynamics Simulation Software. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov = Automotive Engineers' Journal*. 2016; (1):18-23. Available at: <http://www.aae-press.ru/f/96/18.pdf> (accessed 07.08.2020). (In Russ.)
7. Savkin A.N., Gorobtsov A.S., Andronik A.V., et al. Operating Load Analysis of Heavy Duty Truck Frame. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: nazemnye transportnye sistemy = Volgograd State Technical University News. Series: Ground Transport Systems*. 2015; 11(5):25-29. Available at: http://www.vstu.ru/files/vstu_periodical/4793/upload/no_5165_-_2015.pdf (accessed 07.08.2020). (In Russ.)
8. Kravets A., Shcherbakov M., Kultsova M., et al. Simulation and Visualization Software for Vehicle Dynamics Analysis Using Multibody System Approach. In: Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. Communications in Computer and Information Science. Cham: Springer; 2015. 535:378-390. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-23766-4_30 (accessed 07.08.2020). (In Russ.)
9. Hasagasioglu S., Kilicaslan K., Atabay O., et al. Vehicle Dynamics Analysis of a Heavy-Duty Commercial Vehicle by Using Multibody Simulation Methods. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012; 60:825-839. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3588-8>
10. Burcham M.N., Escobar R., Yenusah C.O., et al. Characterization and Failure Analysis of an Automotive Ball Joint. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2017; 17:262-274. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11668-017-0240-4>



11. Ambrosio J., Verissimo P. Improved Bushing Models for General Multibody Systems and Vehicle Dynamics. *Multibody System Dynamics*. 2009; 22:341-365. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11044-009-9161-7>
12. Vesali F., Rezvani M.A., Kashfi M. Dynamics of Universal Joints, Its Failures and Some Propositions for Practically Improving Its Performance and Life Expectancy. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2012; 26(8):2439-2449. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-012-0622-1>
13. Barton D.C., Fieldhouse J.D. Suspension Systems and Components. In: *Automotive Chassis Engineering*. Cham: Springer; 2018. Pp. 111-124. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-72437-9_3
14. Borisenko V., Kiselev A., Leoro L., et al. K&C Suspension Parameters Stability by Production Tolerances. *E3S Web of Conferences*. 2019; 140. 6 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/201914007007>
15. Jinturkar A., Channa R., Mistry R., et al. Weight Reduction of FSAE Vehicle Using TRIZ Principle. In: *ICoRD 2017: Research into Design for Communities*, Vol. 1. Singapore: Springer; 2017. Pp. 861-870. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-981-10-3518-0_74 (accessed 07.08.2020). (In Eng.)
16. Chugunov M.V., Kechemaykin V.N., Panin M.V., et al. Static Strength and Stiffness Analysis for Bearing Structure Elements of Electro Car BravoEgo. *Naukovedenie = Sociology of Science*. 2016; 8(3). 22 p. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/134TVN316.pdf> (accessed 07.08.2020). (In Russ.)
17. Daberkow A., Kreuzer E. An Integrated Approach for Computer Aided Design in Multibody System Dynamics. *Engineering with Computers*. 1999; 15:155-170. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s003660050011>
18. Bradley J., Tansley G.D., Dominy J. A Modelling Strategy for Vehicle Dynamics Using Pro/ENGINEER. *Sports Engineering*. 2009; 11:119-129. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s12283-009-0017-4>
19. Alekseev S., Tarasov A., Borovkov A., et al. NVH Analysis of Offroad Vehicle Frame. Evaluation of Mutual Influence of Body-Frame System Components. *Materials Physics and Mechanics*. 2017; 34(1):70-75. (In Eng.)

Received 07.03.2020; revised 20.05.2020; published online 30.09.2020

About the authors:

Mikhail V. Chugunov, Head of Chair of Design and Technology Informatics of Ruzaevka Institute of Mechanical Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Researcher ID: H-7452-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5318-5684>, m.v.chugunov@mail.ru

Irina N. Polunina, Associate Professor of Chair of Design and Technology Informatics of Ruzaevka Institute of Mechanical Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Pedagogy), Researcher ID: H-7473-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1093-8401>, my_pk@mail.ru

Anton M. Pjanzin, Student of Ruzaevka Institute of Mechanical Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), a.m.pyanzin@mail.ru

Contribution of the authors:

M. V. Chugunov – research methodology development and model building for electric vehicles; I. N. Polunina – development of research methodology and model building for electric vehicles, numerical analysis; A. M. Pjanzin – numerical analysis.

All authors have read and approved the final manuscript.



Повышение эффективности солнечных электростанций

Д. С. Стребков¹, Ю. Х. Шогенов^{2*}, Н. Ю. Бобовников¹

¹ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»
(г. Москва, Россия)

²ФГБУ «Российская академия наук» (г. Москва, Россия)

*yh1961s@yandex.ru

Введение. Актуальной научной проблемой является повышение эффективности использования солнечной энергии в солнечных электростанциях. Цель работы – исследование методов повышения эффективности солнечных электростанций.

Материалы и методы. Рассмотрены солнечные электростанции на основе модулей с двухсторонней рабочей поверхностью. Отражение солнечного излучения от земной поверхности обеспечивает увеличение производства электрической энергии на 20 % по сравнению с модулями, имеющими рабочую поверхность с одной стороны. Возможно повышение эффективности использования солнечной энергии путем увеличения годового производства электрической энергии за счет создания равных условий для использования солнечной энергии фронтальной и тыльной поверхностями двухсторонних солнечных модулей.

Результаты исследования. В статье представлена солнечная электростанция с зеркальными отражателями на горизонтальной поверхности с вертикальным расположением двухсторонних солнечных модулей; солнечная электростанция с отклонением двухсторонних солнечных модулей от вертикального положения; солнечная электростанция с зеркальными отражателями на южном склоне холма с углом β наклона склона к горизонту. Приведены формулы расчета размеров отражателей солнечной энергии в меридиональном направлении, ширины отражателей солнечной энергии, угла наклона солнечных модулей к горизонтальной поверхности. Представлены результаты компьютерного моделирования параметров солнечной электростанции, работающей в окрестностях г. Луксора (Египет).

Обсуждение и заключение. Показано, что производство электроэнергии в пределах мощности в 1 кВт принимает пиковое значение для вертикально ориентированных двухсторонних солнечных модулей с горизонтальными отражателями солнечного света при коэффициенте использования установленной мощности 0,45. Когда солнечное излучение становится параллельным плоскости вертикально расположенных модулей, наблюдается снижение выхода электроэнергии. Предложенная конструкция позволяет выравнивать и увеличивать выход электроэнергии в период максимума солнечной радиации. Вертикально ориентированные модули надежны и удобны в эксплуатации при максимальной экономии пространства между модулями.

Ключевые слова: солнечная энергия, солнечный модуль, отражатели солнечной энергии, электроэнергия, солнечное излучение, отражатели солнечного излучения, коэффициент использования установленной мощности

Для цитирования: Стребков, Д. С. Повышение эффективности солнечных электростанций / Д. С. Стребков, Ю. Х. Шогенов, Н. Ю. Бобовников. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202003.480-497 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 3. – С. 480–497.

© Стребков Д. С., Шогенов Ю. Х., Бобовников Н. Ю., 2020



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

Improving the Efficiency of Solar Power Plants

D. S. Strebkov^a, Yu. Kh. Shogenov^{b*}, N. Yu. Bobovnikov^a

^a*Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russia)*

^b*Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)*

*yh1961s@yandex.ru

Introduction. An urgent scientific problem is to increase the efficiency of using solar energy in solar power plants (SES). The purpose of the article is to study methods for increasing the efficiency of solar power plants.

Materials and Methods. Solar power plants based on modules with a two-sided working surface are considered. Most modern solar power plants use solar modules. The reflection of solar radiation from the earth's surface provides an increase in the production of electrical energy by 20% compared with modules with a working surface on one side. It is possible to increase the efficiency of using solar energy by increasing the annual production of electric energy through the creation of equal conditions for the use of solar energy by the front and back surfaces of bilateral solar modules.

Results. The article presents a solar power plant on a horizontal surface with a vertical arrangement of bilateral solar modules, a solar power station with a deviation of bilateral solar modules from a vertical position, and a solar power plant on the southern slope of the hill with an angle β of the slope to the horizon. The formulas for calculating the sizes of the solar energy reflectors in the meridian direction, the width of the solar energy reflectors, and the angle of inclination of the solar modules to the horizontal surface are given. The results of computer simulation of the parameters of a solar power plant operating in the vicinity of Luxor (Egypt) are presented.

Discussion and Conclusion. It is shown that the power generation within the power range of 1 kW takes a peak value for vertically oriented two-sided solar modules with horizontal reflectors of sunlight at the installed capacity utilization factor of 0.45. At the same time, when the solar radiation becomes parallel to the plane of vertical solar modules, there is a decrease in the output of electricity. The proposed design allows equalizing and increasing the output of electricity during the maximum period of solar radiation. Vertically oriented modules are reliable and easy to use while saving space between modules.

Keywords: solar energy, solar module, solar energy reflectors, electricity, solar radiation, solar reflectors, load factor

For citation: Strebkov D.S., Shogenov Yu.Kh., Bobovnikov N.Yu. Improving the Efficiency of Solar Power Plants. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(3):480-497. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.480-497>

Введение

Современные солнечные электростанции содержат двухсторонние солнечные фотоэлектрические модули (СМ), установленные с ориентацией на юг в северном полушарии в несколько рядов на опорах над поверхностью земли, под углом к горизонту. СМ состоят из скоммутированных солнечных элементов из кремния с двухсторонней

рабочей поверхностью, герметизированных с двух сторон защитным покрытием из стекла, и имеют коэффициент полезного действия (КПД) 22 % при освещении с фронтальной стороны и 19 % при освещении с тыльной стороны¹ [1; 2]. Отражение солнечного излучения от земной поверхности обеспечивает увеличение производства электрической энергии на 20 % по

¹ Стребков Д. С. Основы солнечной энергетики: учебное пособие для вузов. Организация Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры (ЮНЕСКО). М.: ФНАЦ ВИМ, 2019. 323 с.; Jochen S. The European Industry Association Solar Power Europe Presents an Optimistic View of the Future in its "Global Market Outlook 2018" // Photon Int. 2018. Pp. 8–13.

сравнению с модулями, имеющими рабочую поверхность с одной стороны² [3; 4]. Цель исследования – повышение эффективности использования солнечной энергии солнечными электростанциями.

Обзор литературы

Новые технологии играют главную роль в повышении эффективности использования солнечных электростанций. Рассмотрим наиболее важные достижения в этой области.

Национальная лаборатория возобновляемой энергетики США сообщила о рекордном значении КПД солнечных элементов на основе гетероструктур (47 %) при концентрированном солнечном излучении³.

Солнечные элементы на основе кремния, которые занимают более 90 % рынка, имеют максимальный КПД в лабораторных условиях 26,7 % при освещении неконцентрированным солнечным излучением. Производство солнечных элементов на основе монокристаллического кремния составляет 30,2 %, на основе мульткристаллического кремния – 60,8 %, тонкопленочной технологии – 4,5 %⁴.

Создание солнечных модулей с двухсторонней рабочей поверхностью позволяет увеличить производство электроэнергии на 20 % за счет использования отраженного от Земли солнечного излучения тыльной поверхностью солнечного модуля. Двухсторонние солнечные модули прозрачны для инфракрасной части солнечного спектра за краем полосы поглощения

(1,15 мкм для кремния). Это приводит к снижению рабочей температуры солнечного модуля и к повышению КПД. Российские ученые впервые в мире испытали двухсторонние солнечные модули в 1970 г. на межпланетной станции Венера-7⁵.

Высоковольтные солнечные батареи с напряжением 10–20 В/см² рабочей поверхности позволяют снизить потери на коммутацию и потери при неравномерном освещении солнечных батарей, а также обеспечить питание высоковольтной аппаратуры и передачу энергии по высоковольтным линиям электропередач без промежуточных трансформаторов и преобразователей. В 1975 г. в России были проведены стендовые испытания плазменного ионного двигателя от солнечной батареи напряжением 32 кВ⁶.

Использование солнечных модулей с концентраторами солнечного излучения увеличивает эффективность солнечных электростанций. Можно сформулировать закономерность: для фотопреобразователей с линейной зависимостью тока от освещенности при одинаковой энергии поступающего излучения за определенный промежуток времени фотопреобразователи импульсного излучения при определенной скважности произведут больше электроэнергии, чем при постоянном освещении. Это было неоднократно подтверждено исследованиями солнечных элементов на основе гетероструктур и высоковольтных солнечных элементов с вертикальными *p-n*-переходами⁷.

² REN21. Renewables 2017. Global Status Report [Электронный ресурс]. URL: [https://www.ren21.net/gsr-2017/#:~:text=The 2017 Edition of the,dioxide \(CO2\) emissions. \(дата обращения: 10.08.2020\).](https://www.ren21.net/gsr-2017/#:~:text=The 2017 Edition of the,dioxide (CO2) emissions. (дата обращения: 10.08.2020).)

³ NREL Six-Junction Solar Cell Sets Two World Records for Efficiency // National Renewable Energy Laboratory (NREL). 13.04.2020. URL: <https://www.nrel.gov/news/press/2020/nrel-six-junction-solar-cell-sets-two-world-records-for-efficiency.html> (дата обращения: 10.08.2020).

⁴ Photovoltaics Report [Электронный ресурс] // Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf> (дата обращения: 10.08.2020).

⁵ Стребков Д. С. Матричные солнечные элементы. 2-е изд. М.: Изд-во ГНУ ВИЭСХ, 2010. Т. 1. 120 с.

⁶ Стребков Д. С. Матричные солнечные элементы. 2-е изд. М.: Изд-во ГНУ ВИЭСХ, 2010. Т. 2. 268 с.

⁷ Стребков Д. С. Матричные солнечные элементы. 2-е изд. М.: Изд-во ГНУ ВИЭСХ, 2010. Т. 3. 348 с.; NREL Six-Junction Solar Cell Sets Two...

Использование вертикально ориентированных двухсторонних солнечных модулей позволяет 95 % Земли использовать для сельскохозяйственных нужд, при этом увеличивается производство энергии за счет снижения попадания пыли и снега на вертикально ориентированные панели. Эффективным способом снижения затрат на землю при строительстве солнечных электростанций (СЭС) является расположение солнечных модулей на крышах и фасадах зданий, а также на водной поверхности⁸.

Использование солнечных теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) с гибридными солнечными модулями для получения электрической энергии и теплоты увеличивает эффективность использования солнечной энергии с 20 % до 55 %⁹.

Технология герметизации солнечных модулей с помощью силиконовых гелей увеличивает срок службы в два раза с 20–25 лет до 40–50 лет, при этом за срок службы в два раза увеличивается производство электроэнергии по сравнению с модулями, герметизированными с помощью этиленвинилацетата (EVA). Модули с силиконовым гелем работоспособны в диапазоне температур от –60 °С до +110 °С, недоступном для модулей с EVA [5].

Одной из причин низкого коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) является неработоспособность СЭС в ночное время и при наличии облаков. Увеличение КИУМ возможно за счет использования следящих за Солнцем устройств и выбора места расположения СЭС с высокими

уровнями солнечной радиации. Если для Германии КИУМ составляет 0,15, то в Египте он может быть в 2 раза выше. В данной работе будет показано, что КИУМ СЭС в Египте может достигать рекордного значения 0,45 без применения следящих устройств.

Важнейшей задачей повышения эффективности использования СЭС является создание аккумулирующих устройств. Разрабатываются новые типы химических аккумуляторов и гравитационных накопителей энергии¹⁰. Совершенствуются каталитические методы получения водорода от СЭС с последующей подачей водорода в трубопроводную систему и хранилище природного газа¹¹. Радикальным решением проблемы круглосуточного и круглогодичного использования СЭС без аккумулирующих устройств является предложенная российскими учеными глобальная солнечная энергосистема из трех электростанций мощностью 2,5 ТВт, площадью 200×200 км каждая, установленных в пустынях Австралии, Африки и Латинской Америки и соединенных с национальными энергосистемами с помощью резонансных однопроводных высокочастотных линий. Годовое производство электрической энергии глобальной солнечной энергосистемой составляет 25 000 ТВт·ч, что эквивалентно существующему мировому энергопотреблению¹².

В немецком Институте солнечных энергетических систем имени Фраунгофера (Germany's Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE) разработа-

⁸ Floating Solar and Fishery Chalks Another Success in China with 120 MW Plant // Saur Energy – International. 22.04.2020. URL: <https://www.saurenergy.com/solar-energy-news/floating-solar-and-fishery-chalks-another-success-in-china-with-120-mw-plant> (дата обращения: 10.08.2020).

⁹ Hybrid Solar Panel [Электронный ресурс] // DanSolar. URL: <http://dansolar.dk/en/hybrid-solar-panel/> (дата обращения: 10.08.2020).

¹⁰ Bellini E. Storing Wind and Solar with New Gravity-Based System // PV Magazine. 11.05.2020. URL: <https://www.pv-magazine.com/2020/05/11/storing-wind-and-solar-with-new-gravity-based-system/> (дата обращения: 10.08.2020).

¹¹ SGH2 Building Largest Green Hydrogen Production Facility in California; Gasification of Waste into H2 // Green Car Congress. 21.05.2020. URL: <https://www.greencarcongress.com/2020/05/20200521-sgh2.html> (дата обращения: 10.08.2020).

¹² Стребков Д. С. Основы солнечной энергетики...

ны новые способы внедрения датчиков механического напряжения и температуры в поверхность солнечных элементов (СЭ) фотоэлектрического модуля. Сведения, собранные сенсорами, позволяют следить за степенью разрушения, деградации поверхности СЭ во времени и получать информацию о коэффициенте полезного действия модуля в зависимости от его температуры. Группа исследователей отметила, что новые устройства можно размещать без проблем на двух сторонах СЭ. Принцип действия датчиков напряженности основан на пьезорезистивном эффекте: сенсор реагирует на механическое напряжение, изменяя свое электрическое сопротивление. Приборы успешно работали в диапазоне температур от -35°C до $+85^{\circ}\text{C}$. Исследователи сообщили, что устройства проверены при испытаниях в ходе 145 температурных циклов [6].

В Германии объявлено о наименьшей цене для солнечной электроэнергии, которая составила 0,0355 евро за кВт·ч (0,038315 долларов США). Эта цена была получена при проведении тендера по фотоэлектрическим проектам мощностью от 750 кВт до 10 МВт. Общая мощность генерации резервирована в размере 100,6 МВт. Bundesnetzagentur объявило о реализации 18 солнечных проектов общей мощностью генерации 100,6 МВт. В Баварии осуществлены 13 из 18 проектов по солнечной энергетике с общей мощностью 75 МВт. Это говорит о быстром развитии солнечной энергетики в Германии¹³.

Правительство Германии осенью 2019 г. утвердило «Программу по защите климата» (Klimaschutzprogramm 2030), основные положения которой были зафиксированы в «Климатическом пакете». Еще раз подтверждено, что к 2030 г. доля возобновляемых источников энергии в потреблении электроэнергии в стране должна достичь 65 %¹⁴.

Объединенные Арабские Эмираты в Дубае открыли новый центр исследований и разработок на базе Солнечного парка имени Мохаммеда ибн Рашид аль-Мактума. В частности новая организация занимается исследованиями по влиянию климатических условий пустыни на работу солнечных модулей и других компонентов СЭС. Центру включает в себя лабораторию, исследующую электрические характеристики, лабораторию механических характеристик, лабораторию материалов, лабораторию имитации Солнца, лабораторию для исследования ускоренных испытаний СЭС¹⁵.

Китайская компания LONGi Green Energy Technology Co присоединилась к мировой инициативе RE100, которая объединяет 500 крупнейших организаций мира, таких как Apple, Google, Facebook, Coca-Cola, Microsoft, Philips и Goldman Sachs. Члены инициативы обязуются перевести свои производственные мощности на электроснабжение от возобновляемых источников, например Солнца. LONGi Green Energy Technology Co активно развивает производство солнечных электростанций, в настоящее время построены СЭС мощностью свыше 2 ГВт¹⁶.

¹³ **Diermann R.** German PV Tender Delivers Record Low Solar Power Price of €0.0355/kWh // PV Magazine. 19.02.2020. URL: <https://www.pv-magazine.com/2020/02/19/german-pv-tender-delivers-record-low-solar-power-price-of-e0-0355-kwh> (дата обращения: 10.08.2020).

¹⁴ **Appunn K., Eriksen F., Wettengel J.** Germany's Greenhouse Gas Emissions and Energy Transition Targets // Clean Energy Wire CLEW. 03.06.2020. URL: <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-greenhouse-gas-emissions-and-climate-targets> (дата обращения: 10.08.2020).

¹⁵ **Warrier R.** PICTURES: Dubai Ruler Opens R&D Centre at MBR Solar Park // Construction Week. 10.03.2020. URL: <https://www.constructionweekonline.com/projects-and-tenders/263557-pictures-dubai-ruler-opens-rd-centre-at-mbr-solar-park> (дата обращения: 10.08.2020).

¹⁶ **LONGi** Joins the Global Initiative RE100; Commits to 100 % Renewable Power across Its Entire Global Operations by 2028 // PR Newswire. 13.03.2020. URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/longi-joins-the-global-initiative-re100-commits-to-100-renewable-power-across-its-entire-global-operations-by-2028-301022822.html> (дата обращения: 10.08.2020).

Научно-технический центр (НТЦ) тонкопленочных технологий в энергетике России утверждает, что его исследователям удалось создать коммерчески выгодные структуры АЗВ5 на кремниевой подложке. Ученые сообщают, что получили верхний слой СЭ, интегрированный на кремниевое основание, при увеличении фотоактивных слоев увеличится эффективность СЭ, так как каждый новый слой будет более полно поглощать свою часть солнечного спектра¹⁷.

Компания «Хевел» впервые в России построила Бурзянскую СЭС с промышленными накопителями электроэнергии. Мощность СЭС 10 МВт, система накопления электроэнергии имеет мощность 8 МВт. Станция может работать автономно и параллельно с сетью электроснабжения. Бурзянская СЭС способна в течение 6 часов снабжать автономно электроэнергией больницы, школы, детские сады и другие социальные объекты Бурзянского района Республики Башкортостан. В СЭС используются аккумуляторные ячейки «Лиотех» емкостью 300 кВт·ч¹⁸.

Начало развития солнечных электростанций в России связывают с введением в эксплуатацию Кош-Агачской СЭС в 2014 г. Мощность электростанции 5 МВт. Солнечная энергетика до 2014 г. не превышала 2, 3 МВт в России. После учета крымских СЭС мощность СЭС в России увеличилась на 227,4 МВт в 2014 г. и на 179,7 ГВт в 2015 г. К концу 2019 г. общая мощность СЭС в РФ достигла 1 418 МВт.

Доля СЭС в установленной мощности электростанций Единой Энергетической Системы России достигла 0,55 %¹⁹.

В России пользуется популярностью китайский производитель Sunny Energy, выпускающий солнечные модули серии Exmork. Монокристаллические модели стоят от 5 500 руб. до 10 000 руб., Поликристаллические модели представлены следующими моделями «Exmork ФСМ-100П» от 4 000 руб., «Exmork ФСМ-250П» от 10 000 руб.

Немецкий производитель в России представлен компанией AXITEC: солнечные модули «AC-270P/156-60S» от 19 000 руб. до 24 000 руб. Южнокорейская компания SUNWAYS выпускает модули «ФСМ» стоимостью от 3 600 руб. до 16 000 руб.

Отечественный производитель представлен следующим оборудованием для получения электроэнергии от альтернативных источников. Компания «Телеком-СТВ» производит модели «ТСМ-14» по цене от 3 500 руб. до 23 000 руб. Компания «Хевел» производит модели HEVEL HVL по цене от 3 500 руб. до 5 000 руб. «Рязанский завод металлокерамических приборов» делает два типа солнечных модулей: «RZMP 130-T» по цене от 14 000 руб. и «RZMP 220-T» по цене от 19 000 руб.

Китайская фирма Trina Solar Co., Ltd объявила о выпуске новой серии CM в 415 Вт максимальной мощности²⁰.

Кроме того, Trina Solar Co., Ltd представила двухсторонние солнечные модули Duomax V с двойным остекле-

¹⁷ Чердниченко А. В Петербурге готовят к выпуску солнечные батареи нового поколения // Санкт-Петербургские ведомости. 11.03.2020. URL: <https://spbvedomosti.ru/news/financy/v-peterburge-gotovyat-k-vypusku-solnechnye-batarei-novogo-pokoleniya/> (дата обращения: 10.08.2020).

¹⁸ Самую мощную в России солнечную электростанцию с накопителем энергии запустили в Башкирии // ТАСС. 26.02.2020. URL: <https://tass.ru/ekonomika/7838587> (дата обращения: 10.08.2020).

¹⁹ Развитие солнечной энергетики в России с 2014 по 2019 год [Электронный ресурс] // Сделано у нас. URL: <https://sdelanounas.ru/blogs/130007> (дата обращения: 10.08.2020).

²⁰ Solar T. Trina Solar: Four New Series of Modules Launched, Unleashes a New Era of Mass-Produced High-Output Modules // PV Magazine. 22.03.2019. URL: <https://www.pv-magazine.com/press-releases/trina-solar-four-new-series-of-modules-launched-unleashes-a-new-era-of-mass-produced-high-output-modules> (дата обращения: 10.08.2020).

нением и Tallmax V. Они основаны на 210-миллиметровых монокристаллических СЭ, созданных по технологии PERC. Новые СМ с выходной мощностью более чем 500 Вт имеют эффективность более 21 %. Предварительные оценки для крупных наземных СЭС, установленных в китайской провинции Хэйлунцзян, позволяют утверждать, что замена 410 Вт двухсторонних модулей с двойным остеклением на 500 Вт (солнечные модули Duomax V) уменьшит прочие расходы (BoS) на 6–8 % и приведенную стоимость электроэнергии (LCoE) на 3–4 %. Компания планирует достигнуть массового производства в третьем квартале с размерами производства выше 5 ГВт. Trina Solar Co., Ltd подписала соглашения о стратегическом объединении с POWERCHINA Jiangxi Electric Power Construction, China Energy Engineering Investment's Heilongjiang branch, Shouguang Power Investment Haobang New Energy, SEPCOIII Electric Power Construction и другими компаниями с целью развертывания производства новых солнечных модулей²¹.

Польша в начале 2019 г. имела СЭС мощностью 300 МВт, но к концу декабря вышла на показатели, превышающие 1 ГВт. За один год было введено в эксплуатацию СЭС мощностью 800 МВт. Польское правительство поддерживает коммерческое и промышленное использование солнечных энергоустановок, строительство СЭС²².

Крупнейшая плавучая СЭС в Европе была введена в эксплуатацию на территории южной Франции, ознаменовав новый рубеж в развитии солнечной

энергетики. Проект O'MEGA1 – это солнечная электростанция мощностью 17 МВт, расположенная в Пьоленке, вблизи городов Оранж и Авиньон. Станция способна обеспечить электроэнергией 4 733 дома и снизить выбросы CO₂ в атмосферу на 1 096 тонн. Отмечается, что это небольшая величина, по сравнению с морскими ветряными электростанциями мощностью 1 500 МВт в Nywind (Шотландия), которые обеспечивают электроэнергией 1 миллион домов. Но подобные проекты, возможно, начнут появляться в большем количестве в ближайшее время. Потенциал плавучих СЭС для Франции оценивается в размере 20 ГВт мощности²³.

Возобновляемая энергетика в 2019 г. получила 176 ГВт мощности, что несколько меньше количества мощности 179 ГВт, введенного за 2018 г. Однако это составляет 72 % от всей энергетической мощности, введенной в прошлом году согласно данным Международного агентства возобновляемой энергии. Наибольший рост наблюдался в Азии, где мощности на основе возобновляемой энергии составили 54 % от всех, введенных в эксплуатацию. 70 % от всей введенной в эксплуатацию мощности энергоустановок в 2019 г. используют возобновляемые виды энергии; это характерно для всех регионов мира, за исключением Африки и Ближнего Востока, где ввод мощностей на основе возобновляемых видов энергии составил 52 % и 26 % соответственно. Солнечная энергетика в 2019 г. увеличилась на 98 ГВт, 60 % СЭС установлено в Азии. Солнечная и ветровая энергетика составляют более полови-

²¹ Trina Solar Launches 500W+ Ultra-High-Power New Modules, Setting New Benchmark for Era of PV 5.0 // PR Newswire. 27.02.2020. URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/trina-solar-launches-500w-ultra-high-power-new-modules-setting-new-benchmark-for-era-of-pv-5-0--301012412.html> (дата обращения: 10.08.2020).

²² Bellini E. Poland Tops 1,3 GW of PV Capacity // PV Magazine. 14.01.2020. URL: <https://www.pv-magazine.com/2020/01/14/poland-tops-1-3-gw-of-pv-capacity> (дата обращения: 10.08.2020).

²³ Simon F. Europe's Largest Floating Solar Plant Opens in France // EURACTIV. 18.10.2019. URL: <https://www.euractiv.com/section/energy/news/europes-largest-floating-solar-plant-opens-in-france> (дата обращения: 10.08.2020).

ны всей мощности электростанций, использующих возобновляемые виды энергии в мире, соответственно 623 ГВт и 586 ГВт. Гидроэнергетика, биоэнергетика, геотермальная и морская энергетика продемонстрировали скромное годовое увеличение в 12 ГВт, 6 ГВт, 700 МВт и 500 МВт соответственно. Отмечается, что Азия продолжает лидировать на рынке солнечной энергетики, увеличив мощности на 56 ГВт. Другими лидерами по расширению использования солнечной энергетики являются США, Австралия, Испания, Украина и Германия²⁴.

Вблизи южного египетского города Асуана расположена СЭС Бенбан одного из крупнейших солнечных парков в мире, оцениваемого в 2,1 миллиарда долларов. Установленная на настоящий момент электрическая мощность СЭС Египта составляет 50 ГВт, доля возобновляемой энергетики должна составить 20 % к 2022 г. и 42 % к 2035 г. Отмечается, что СЭС нуждается в чистящих машинах и правильном техническом обслуживании, для которого не требуется большое количество рабочих²⁵.

Всемирный банк опубликовал доклад, в котором содержатся сведения о том, что 13 % населения нашей планеты не имеют доступа к электричеству. В документе отмечается поразительно быстрый рост доступа к электрической энергии в густонаселенных странах.

В Индии в 1990 г. доступ к электричеству имели 43 % всех ее жителей, в то время как к 2016 г. – 85 %. Отмечается, что только 8,8 % населения республики Чад пользовались электричеством в 2016 г.²⁶

19 января 2020 г. в Катаре состоялась церемония подписания соглашения о строительстве фотоэлектрической солнечной электростанции мощностью 800 МВт (КИУМ = 31), объем инвестиций в которую оценивается в 467 млн долларов. Французская компания Electricite de France's и китайская фирма Jinko Solar выиграли тендер на строительство СЭС Al Dhafra Solar PV мощностью 2 ГВт, которая с 2022 г. будет поставлять электроэнергию по рекордно низкой цене 1 доллар 35 центов за киловатт-час²⁷.

Правительство Алжира приняло решение присоединиться к немецкому проекту Desertec. Это проект ряда немецких лидирующих компаний с целью создания громадной сети ветровых и солнечных электростанций в Северной Африке и на Ближнем Востоке в течение сорока лет, которая будет обеспечивать электроэнергией Европу на 15 % от ее общего электропотребления²⁸.

Ежегодный мировой саммит в Абу-Даби, посвященный будущему энергетики, запланирован на 18–21 января 2021 г. В саммите примут участие 800 фирм, 33 500 посетителей из 170 стран мира²⁹.

²⁴ Renewables Account for Almost Three Quarters of New Capacity in 2019 // International Renewable Energy Agency. 06.04.2020. URL: <https://www.irena.org/newsroom/pressreleases/2020/Apr/Renewables-Account-for-Almost-Three-Quarters-of-New-Capacity-in-2019> (дата обращения: 10.08.2020).

²⁵ Lewis A. Giant Solar Park in the Desert Jump Starts Egypt's Renewables Push // Reuters. 17.12.2019. URL: <https://www.reuters.com/article/us-egypt-solar/giant-solar-park-in-the-desert-jump-starts-egypts-renewables-push-idUSKBN1YL1WS> (дата обращения: 10.08.2020).

²⁶ Ritchie H., Roser M. Access to Energy // Our World in Data. URL: <https://ourworldindata.org/energy-access> (дата обращения: 10.08.2020).

²⁷ Mathis W. Abu Dhabi in Talks With EDF, Jinko to Install Huge Solar Farm // Bloomberg Green. 28.04.2020. URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-04-28/abu-dhabi-moves-ahead-with-giant-solar-park-after-getting-bids> (дата обращения: 10.08.2020).

²⁸ Magoum I. ALGERIA: Towards an Agreement with Germany to Join Desertec Project [Электронный ресурс] // AFRIK 21. 15.04.2020. URL: <https://www.afrik21.africa/en/algeria-towards-an-agreement-with-germany-to-join-desertec-project> (дата обращения: 10.08.2020).

²⁹ The World's Leading Business Event for Future Energy and Sustainability [Электронный ресурс]. URL: <https://www.worldfutureenergysummit.com> (дата обращения: 10.08.2020).

Украинские компании, работающие на рынке производства солнечных электростанций, – «Солнечный ветер» (Solar Wind) и «Sun Power». Монокристаллические модули имеют следующие цены: «ALTEK ALM» – от 350 \$ до 260 \$. Поликристаллические модули «KDM-050P-36» имеют стоимость от 50 \$ до 200 \$³⁰.

Международное Энергетическое Агентство (МЭА) ожидает снижение мирового потребления энергии, которое будет самым масштабным со времен Второй мировой войны. Более 4,2 млрд человек во всем мире находятся в различных формах изоляции для замедления распространения коронавируса. Агентство прогнозирует снижение спроса на энергию в течение года на 6 %. Рост источников энергии в этом году будет только в сфере возобновляемой энергетики. Производство электроэнергии на энергоустановках, основанных на возобновляемых источниках энергии, выросло на 3 % в первом квартале и составило почти 28 % поставок электроэнергии по сравнению с 26 % годом ранее. В течение года МЭА ожидает, что производство электроэнергии вырастет на 5 %, а общее использование возобновляемой энергии в мире увеличится на 1 %³¹. Прогнозируется, что мировой спрос на уголь снизится на 8 % в 2020 г.³²

В другой работе показано, что перспективы развития фотоэлектрического метода преобразования солнечной энергии связаны с созданием двухсторонних солнечных модулей, а также солнечных модулей с использованием

полисилоксановых герметиков, высоковольтных кремниевых солнечных модулей напряжением 1 000 В, оптико-концентрирующих систем на основе линейных жалюзийных гелиостатов и прочее [7]. Рассмотрены результаты реализации программы «Один миллион солнечных крыш» и создания глобальной солнечной энергосистемы с годовым производством электроэнергии 24 000 ТВт·ч. Представлены примеры использования солнечных фотоэлектрических электростанций (СФЭС) для автономного электроснабжения жилых домов и сельскохозяйственных объектов. Определены условия, при которых СФЭС могут конкурировать с традиционной энергетикой, использующей ископаемое топливо.

Показана динамика роста установленной мощности СЭС. Приведены необходимые формулы для расчета стоимости установленной мощности, стоимости электрической энергии. Рассмотрено влияние срока службы на технико-экономические параметры СЭС [8].

Приведены примеры автономного энергоснабжения жилых домов отдаленных животноводческих комплексов Кабардино-Балкарской Республики и условия, при которых СЭС могут конкурировать с СГЭС и ТЭЦ [9].

Представлены результаты исследований высоковольтных солнечных модулей для преобразования концентрированной солнечной радиации. Рассмотрены их электрические и оптические характеристики [10]. Высоковольтные солнечные модули выполнены на основе матричных кремниевых

³⁰ Стоимость солнечных батарей [Электронный ресурс] // ALTER220.RU. URL: <https://alter220.ru/solnce/stoimost-solnechnyh-batarej.html> (дата обращения: 10.08.2020).

³¹ Stevens P. Energy Demand, Hit by Coronavirus Crisis, Is Set to See Record Drop This Year, IEA Says // CNBCC LLC. 30.04.2020. URL: <https://www.cnbc.com/2020/04/30/energy-demand-set-to-fall-the-most-on-record-this-year-amid-coronavirus-pandemic-iea-says.html> (дата обращения: 10.08.2020).

³² Global Energy Demand to Plunge This Year as a Result of the Biggest Shock Since the Second World War // International Energy Agency. 30.04.2020. URL: <https://www.iea.org/news/global-energy-demand-to-plunge-this-year-as-a-result-of-the-biggest-shock-since-the-second-world-war> (дата обращения: 10.08.2020).

солнечных элементов с вертикальными *p-n*-переходами, имеют рабочее напряжение 840 В и КПД 25 %. Высоковольтные солнечные модули могут быть использованы для создания солнечных электростанций с выходным рабочим напряжением 110–500 кВ, которые могут быть подключены к линиям электропередачи постоянного тока без повышающих трансформаторов и преобразователей переменного тока в постоянный.

Показано, что использование современных устройств слежения за положением Солнца увеличивает производство электрической энергии на 20–25 % [11].

Министр энергетики Израиля Ю. Штайниц сообщил, что целевой показатель использования возобновляемых источников энергии в Израиле в 2030 г. возрастет с 17 % до 30 % за счет солнечной энергии, а инвестиции в экологически чистую энергию возрастут на 23 млрд долларов³³.

Материалы и методы

Одной из проблем повышения эффективности употребления солнечной энергии двухсторонними СМ является недостаточное использование солнечной энергии тыльной рабочей поверхностью модулей. Следствием этого является недостаточное увеличение годовой производительности СЭС³⁴ [1; 2].

Повышение эффективности использования солнечной энергии приводит к увеличению годового производства электрической энергии за счет создания равных условий для использования солнечной энергии фронтальной и тыльной поверхностью двухсторонних СМ. В результате увеличивается электрическая мощность СЭ и годовое производство электрической энергии³⁵. Этого можно добиться путем вертикальной установки в несколько рядов на опорах над по-

верхностью Земли двухсторонних СМ в солнечной электростанции, которые ориентированы рабочей поверхностью на восток и запад и установлены на горизонтальной поверхности в экваториальной области от 30° ю.ш. до 30° с.ш. в меридиональном направлении [12]. При этом между рядами двухсторонних СМ в этом направлении установлены дополнительные опоры, которые, как и основные опоры, имеют две группы отражателей солнечной энергии с коэффициентом отражения 0,80–0,95, двугранный угол между ними $\gamma = 120\text{--}180^\circ$. Размеры отражателей солнечного излучения равны расстоянию между опорами, расположенными по углам. Расстояние между рядами двухсторонних солнечных модулей и их высота h связаны соотношением:

$$\frac{l}{h} = \frac{1,5}{5},$$

где l – расстояние между рядами двухсторонних модулей, м; h – высота двухсторонних модулей, м.

Длина L отражателей солнечной энергии в меридиональном направлении определяется соотношением:

$$L = H + \frac{l}{2}, \quad (2)$$

где H – общая длина одного ряда двухсторонних солнечных модулей, м.

Ширина D отражателей солнечной энергии определяется соотношением:

$$D = n \cdot l, \quad (3)$$

где n – число рядов двухсторонних солнечных модулей.

Солнечные модули устанавливаются вертикально или с отклонением их плоскости от вертикальной на 10–20°

³³ Bellini E. Israel Wants Another 15 GW of Solar by 2030 // PV Magazine. 03.06.2020. URL: <https://www.pv-magazine.com/2020/06/03/israel-wants-another-15-gw-of-solar-by-2030/> (дата обращения: 10.08.2020).

³⁴ Стребков Д. С. Основы солнечной энергетики...

³⁵ REN21. Renewables 2017.

в противоположных направлениях. Рефлекторы могут быть выполнены зеркальными или в виде диффузных отражателей.

СЭС на рисунке 1 расположена на горизонтальной поверхности 1 в экваториальной зоне от 30° ю.ш. до 30° с.ш. и содержит установленные в несколько рядов вертикально на опорах 2 двухсторонние СМ 3, у которых рабочие поверхности 4 и 5 ориентированы на восток и запад. Плоскости двухсторонних СМ 3 расположены в меридиональной плоскости 6 «север – юг». Между рядами двухсторонних СМ 3 в меридиональной плоскости 6 установлены дополнительные опоры 7, на которых размещены две группы зеркальных отражателей солнечной энергии 8 и 9 с двугранным углом γ между ними.

Отражатели солнечной энергии 8 и 9 закреплены по углам 10 на опорах 2 и 7. Расстояние между рядами двухсторонних СМ 3 и высота h двухсторонних СМ 3 связаны соотношением (1).

В СЭС на рисунке 2 плоскости двухсторонних СМ 11 и 12 в соседних рядах отклонены от вертикальной плоскости 13 в противоположные стороны на угол Θ .

На рисунках 1–3 длина отражателей солнечной энергии 8 и 9 в мери-

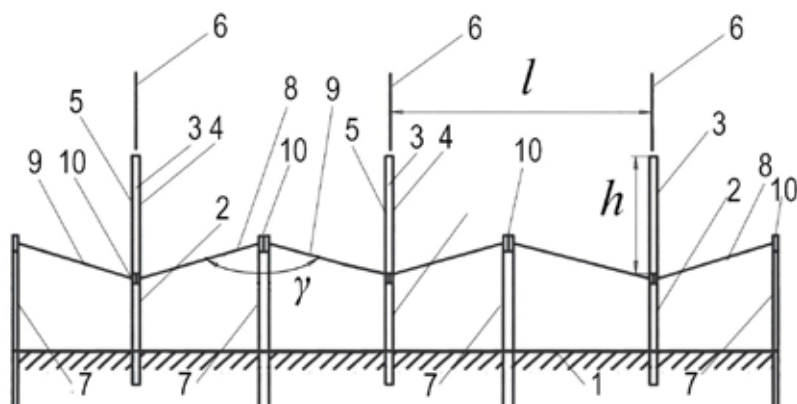
диональном направлении 6 превышает длину двухсторонних СМ 3 в мери-
диональном направлении на $D = \frac{l}{2}$.

С северной 14 и с южной сторон СЭС расстояние между торцом 16 модуля 3 и краем 17 отражателей солнечной энергии равно $\frac{l}{4}$.

Результаты исследования

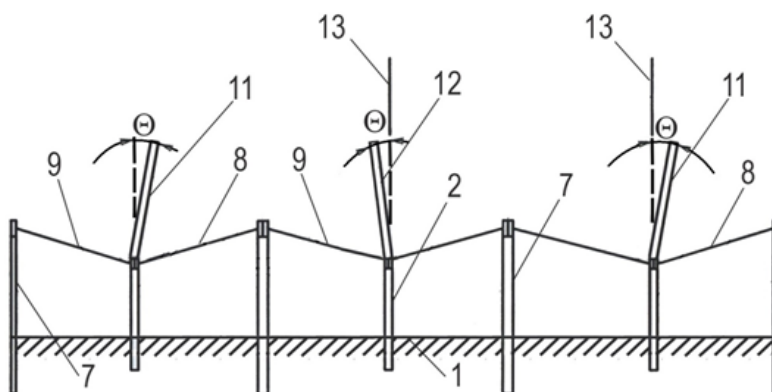
Увеличение площади отражателей солнечной энергии с северной и южной сторон СЭС позволяет отражать солнечную энергию на двухсторонние СМ 3 в течение года от зимнего солнцестояния 22 декабря до летнего солнцестояния 22 июня. На рисунках 1–3 отражатели солнечной энергии 8 и 9 размером $\frac{l}{2} \cdot L$ установлены также с восточной и западной сторон крайних рядов двухсторонних СМ 3 для обеспечения их двухстороннего освещения солнечным излучением от отражателей солнечной энергии.

Таким образом, общая длина L отражателей солнечной энергии 8 и 9 в меридиональном направлении «север – юг» определяется согласно формуле (2).



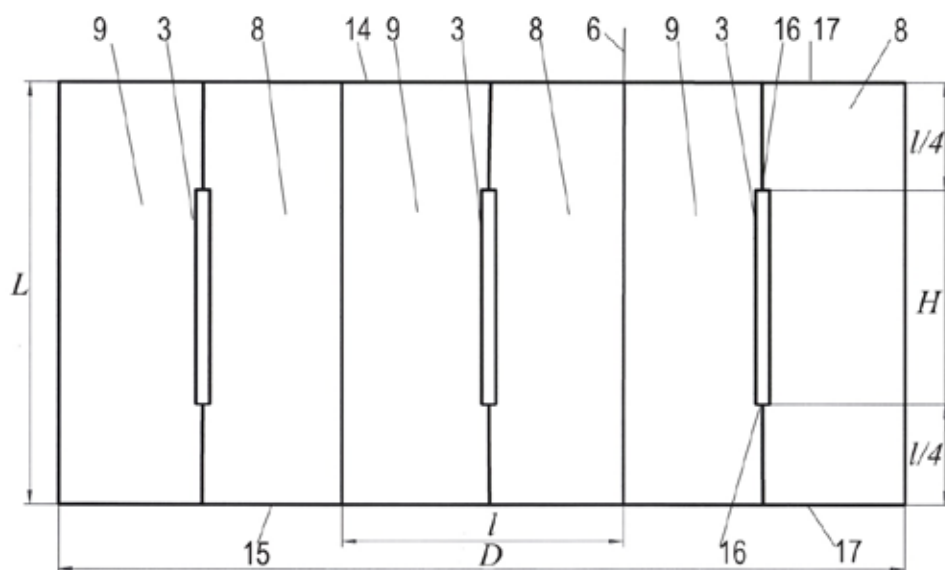
Р и с. 1. Солнечная электростанция на горизонтальной поверхности с вертикальным расположением двухсторонних солнечных модулей (поперечное сечение)

F i g. 1. A solar power plant on a horizontal surface with a vertical arrangement of two-sided solar modules (cross-section)



Р и с. 2. Солнечная электростанция с отклонением двухсторонних солнечных модулей от вертикального положения

F i g. 2. A solar power plant with a deviation of two-sided solar modules from the vertical position



Р и с. 3. Солнечная электростанция, вид в плане

F i g. 3. Solar power plant, in a plan view

Общая ширина D в широтном направлении «восток – запад» равна:

$$D = n \cdot l, \quad (5)$$

где l – расстояние между рядами двухсторонних модулей, м; n – число рядов двухсторонних солнечных модулей.

На рисунке 4 СЭС установлена в северном полушарии или на южном

склоне $l8$ холма под углом к горизонтальной поверхности:

$$\beta = \varphi - \Delta,$$

где φ – широта местности; Δ – отклонение $0-24^\circ$.

Двухсторонние СМ 3 установлены на склоне $l8$ холма на опорах 2 в меридиональной плоскости 6 в несколь-

ко рядов. Дополнительные опоры 7 установлены в меридиональной плоскости 6 на склоне 18 холма между рядами двухсторонних СМ 3. Отражатели солнечной энергии 8 и 9 установлены на опорах 2 и 7, как на рисунках 1–3.

В таблице 1 и на рисунке 5 представлены результаты компьютерного моделирования параметров СЭС, установленной в пустыне Сахара около г. Луксора (Египет), в зависимости от ориентации СМ с односторонней или двухсторонней рабочей поверхностью, рассчитанные с учетом метеорологических данных по солнечной радиации в г. Луксоре и альбедо пустыни Сахара $\alpha = 0,3$, а также с альбедо $\alpha = 0,9$ при использовании отражателей³⁶.

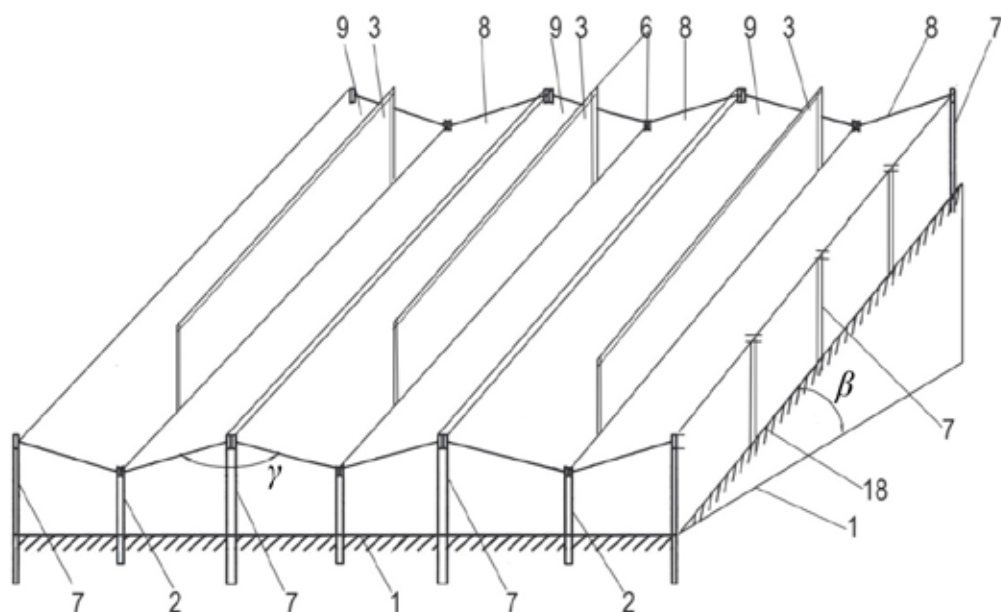
КПД преобразования солнечной энергии на тыльной поверхности двухстороннего СМ принимается равным

0,92 от КПД фронтальной поверхности. Коэффициент отражения (альбедо) отражателей солнечной энергии равен 0,9.

Обсуждение и заключение

Из таблицы 1 следует, что годовое производство электроэнергии в киловатт-часах СЭС пиковой мощностью 1 кВт имеет максимальное значение для вертикально ориентированных в меридиональном направлении двухсторонних СМ с горизонтальными отражателями солнечной энергии, а коэффициент использования установленной мощности КИУМ составит 0,45.

Экспериментальные исследования показали, что в полдень, когда солнечное излучение находится в меридиональной плоскости и солнечное излучение параллельно плоскости вертикально установленных двухсторонних солнечных модулей, имеет место снижение производства электроэнергии



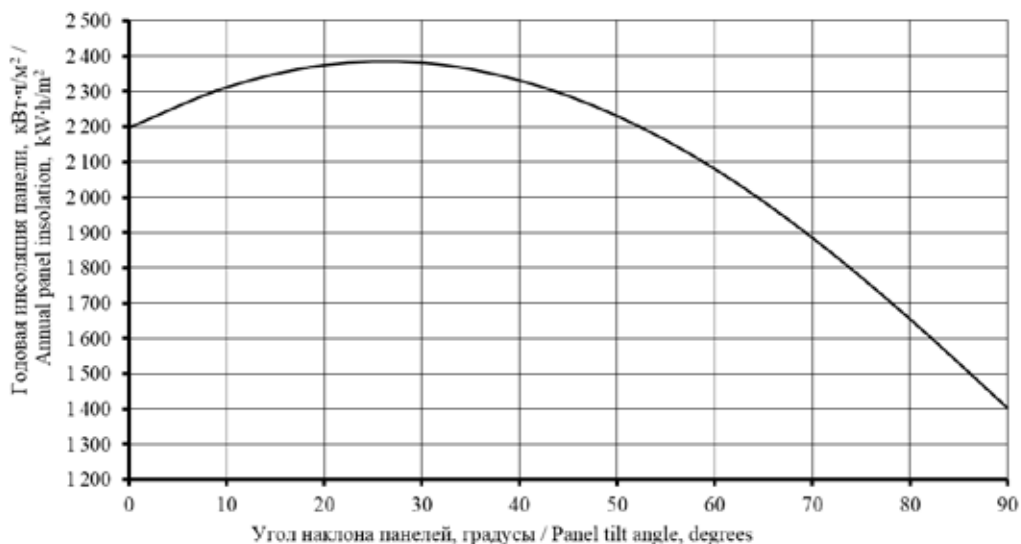
Р и с. 4. Солнечная электростанция на южном склоне холма с углом β наклона склона к горизонту

F i g. 4. Solar power plant on the southern slope of the hill with the slope angle β to the horizon

³⁶ Стребков Д. С. Основы солнечной энергетики...

Таблица 1
Table 1
Производство электроэнергии солнечной электростанции в пустыне Сахара (п. Луксор, Египет) (компьютерное моделирование), кВт·ч/кВт
Electricity generation of a solar power plant in the Sahara desert (Luxor, Egypt) (computer simulation), kW·h/kW

Ориентация панели/ Свойства / Panel orientation/Properties	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Горизонтальная поверхность / Horizontal surface	119,3	140,7	192,7	209,4	225,4	239,6	241,5	227,3	196,4	164,1	128,8	112,5	2197,7
Стационарные панели, ориентированные на юг / Fixed panels oriented to the south													
Вертикальная поверхность / Vertical surface	157,0	148,0	135,9	87,3	66,6	56,0	62,8	85,1	119,9	158,0	166,1	159,6	1402,4
Наклон 25° / Tilt 25°	164,4	179,9	218,8	210,2	206,9	209,8	218,2	222,8	215,3	202,9	176,7	160,1	2386,1
Двухсторонние вертикальные панели, фронтальная сторона на юг / Double-sided vertical panels, front side facing south													
Альбедо 28–32 % / Albedo 28–32%	184,7	176,3	172,8	132,7	135,7	139,2	136,3	137,7	156,9	192,8	194,2	185,6	1945,0
Альбедо 90 % / Albedo 90%	255,7	260,1	287,5	257,3	263,4	272,6	273,1	268,6	273,8	287,3	268,4	252,6	3220,5
Двухсторонние вертикальные панели, фронтальная сторона на восток/запад / Double-sided vertical panels, front side facing east/west													
Альбедо 28–32 % / Albedo 28–32%	156,3	178,7	235,6	246,8	266,2	280,2	282,6	269,8	237,5	209,3	170,1	149,0	2682,1
Альбедо 90 % / Albedo 90%	227,3	262,4	350,3	371,5	393,8	413,6	419,4	400,7	354,4	303,8	244,3	216,0	3957,5



Р и с. 5. Расчетные годовые суммы суммарной солнечной радиации на поверхности стационарных панелей южной ориентации в окрестностях Луксора (Египет)

Fig. 5. Estimated annual amounts of total solar radiation on the surface of stationary southern orientation panels in the vicinity of Luxor (Egypt)

в течение 1–2 часов. Для повышения производства электроэнергии в полдень и выравнивания графика производства электроэнергии, согласно рисунку 2, плоскости двухсторонних СМ отклонены от вертикального положения в соседних рядах в противоположные стороны на 10–20°, что позволяет увеличить производство электроэнергии в период максимального прихода солнечной радиации на поверхность земли. Вертикальное расположение СМ позволяет более эффективно использовать пространство между модулями для сельскохозяйственного производства, снизить попадание песка и снега на поверхности СЭС, уменьшить затраты на монтажные работы и эксплуатационные расходы.

Таким образом, рассмотрены основные направления повышения эффективности солнечных электростанций. Разработаны конструкции солнечной электростанции, в которых

достигнуто повышение эффективности преобразования солнечного излучения и энергопроизводительности на 50 % за счет вертикального расположения активных поверхностей солнечных модулей, их ориентации на восток – запад и увеличения альбеда подстилающей поверхности. Высокий КПД двухсторонних солнечных модулей более 20 % и КИУМ = 0,45 позволяет снизить стоимость электроэнергии и обеспечить надежное электроснабжение потребителей. Вертикальное расположение солнечных модулей позволяет эффективно использовать пространство между модулями для сельскохозяйственного производства, снизить попадание песка и снега на поверхности солнечной электростанции, уменьшить затраты на монтажные работы и эксплуатационные расходы. Дальнейшие исследования направлены на повышение эффективности преобразования солнечного излучения в электрическую энергию.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Strebkov, D. S.** Technical and Economic Indicators of Solar Power Plants / D. S. Strebkov, N. Yu. Bobovnikov. – DOI 10.3103/S0003701X18060142 // Applied Solar Energy. – 2018. – № 54. – Pp. 456–460. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S0003701X18060142> (дата обращения: 10.08.2020).
2. **Стребков, Д. С.** Солнечная энергетика: состояние и перспективы развития / Д. С. Стребков, А. Х. Шогенов, Ю. Х. Шогенов [и др.]. – DOI 10.33267/2072-9642-2019-3-43-48 // Техника и оборудование для села. – 2019. – № 3 (261). С. 43–48. – URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/content/mera-261-9> (дата обращения: 10.08.2020).
3. **Lidorenko, N. S.** New Models of Solar Cells and Prospects for Their Optimization / N. S. Lidorenko, V. M. Evdokimov, D. S. Strebkov [et al.] // Applied Solar Energy. – 1978. – Vol. 14, no. 3. – Pp. 1–12.
4. **Patent No. 3948682 USA.** Semiconductor Photoelectric Generator : No. 519697 : appl. 31.10.1974 : publ. 06.04.1976 / Strebkov D. S., Bordina N. M., Zadde V. V. [et al.]. – 11 p. – URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/8a/96/45/61d12828bc5304/US3948682.pdf> (дата обращения: 10.08.2020).
5. **Poulek, V.** Towards 50 Years Lifetime of PV Panels Laminated with Silicone Gel Technology / V. Poulek, D. S. Strebkov, I. S. Persic [et al.]. – DOI 10.1016/j.solener.2012.07.013 // Solar Energy. – 2012. – Vol. 86, Issue 10. – Pp. 3103–3108. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X12002642?via%3Dihub> (дата обращения: 10.08.2020).
6. **Beinert, A. J.** Silicon Solar Cell–Integrated Stress and Temperature Sensors for Photovoltaic Modules / A. J. Beinert, M. Imm, J. Benick [et al.]. – DOI 10.1002/pip.3263 // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2020. – Vol. 28, Issue 7. – Pp. 1–8. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pip.3263> (дата обращения: 10.08.2020).
7. **Strebkov, D. S.** Advanced Tendencies in Development of Photovoltaic Cells for Power Engineering / D. S. Strebkov. – DOI 10.1134/S0040601514110093 // Thermal Engineering. – 2015. – Vol. 62, Issue 1. – Pp. 7–13. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS0040601514110093> (дата обращения: 10.08.2020).
8. **Strebkov, D. S.** Technical and Economic Indicators of Solar Power Plants / D. S. Strebkov, N. Yu. Bobovnikov // Applied Solar Energy. – 2018. – Vol. 54, Issue 6. – Pp. 456–460. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103%2FS0003701X18060142> (дата обращения: 10.08.2020).
9. **Strebkov, D. S.** Solar Photovoltaic Plants / D. S. Strebkov, A. K. Shogenov. – DOI 10.1007/s10749-018-0914-4 // Power Technology and Engineering. – 2018. – Vol. 52, Issue 1. – Pp. 85–90. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10749-018-0914-4> (дата обращения: 10.08.2020).
10. **Strebkov, D. S.** Investigation of High-Voltage Silicon Solar Modules / D. S. Strebkov, O. V. Shepovalova, N. I. Bobovnikov. – DOI 10.1063/1.5117030 // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2123. – 9 p. – URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5117030> (дата обращения: 10.08.2020).
11. **Aziz, S.** On Improving the Efficiency of a Solar Panel Tracking System / S. Aziz, S. Hassan. – DOI 10.1016/j.promfg.2016.12.053 // Procedia Manufacturing. – 2017. – Vol. 7. – Pp. 218–224. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978916302165?via%3Dihub> (дата обращения: 10.08.2020).
12. **Патент № 2702311 Российская Федерация.** Солнечная электростанция : № 2018135851 : заявл. 24.10.2018 : опубл. 07.10.2019 / Стребков Д. С., Иродионов А. Е., Бобовников Н. Ю. ; патентообладатель ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

Поступила 15.05.2020; принята к публикации 18.06.2020; опубликована онлайн 30.09.2020

Об авторах:

Стребков Дмитрий Семенович, научный руководитель ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), академик РАН, доктор технических наук, профессор, Researcher ID: K-4157-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2572-801X>, Scopus ID: 7004652438, nauka-ds@mail.ru

Шогенов Юрий Хасанович, начальник Сектора растениеводства и процессов механизации Отделения сельскохозяйственных наук ФГБУ «Российская академия наук» (119334, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 32А), член-корреспондент РАН, доктор технических наук, Researcher ID: AAR-1140-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7588-0458>, Scopus ID: 6506035081, yh1961s@yandex.ru

Бобовников Николай Юрьевич, аспирант ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), Researcher ID: D-2515-2016, Scopus ID: 119936730, nikolaj.bobovnikov@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

Д. С. Стребков – формирование основной концепции, научное руководство, постановка цели и задачи исследования, доработка текста, корректировка выводов; Ю. Х. Шогенов – анализ результатов исследований, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов; Н. Ю. Бобовников – корректировка литературного анализа, доработка текста, корректировка выводов.

Благодарности: Авторы выражают благодарность кандидату технических наук А. Е. Иродионову за помощь в компьютерном моделировании параметров солнечной электростанции.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Strebkov D.S., Bobovnikov N.Yu. Technical and Economic Indicators of Solar Power Plants. *Applied Solar Energy*. 2018; (54):456-460. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S0003701X18060142>
2. Strebkov D.S., Shogenov A.Kh., Shogenov Yu.Kh., et al. Solar Energy: State and Development Prospects. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2019; (3):43-48. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-3-43-48>
3. Lidorenko N.S., Evdokimov V.M., Strebkov D.S., et al. New Models of Solar Cells and Prospects for Their Optimization. *Applied Solar Energy*. 1978; 14(3):1-12. (In Eng.)
4. Semiconductor Photoelectric Generator: Patent 3948682 USA. No. 519697; appl. 31.10.1974; publ. 06.04.1976. 11 p. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/8a/96/45/61d12828bc5304/US3948682.pdf> (accessed 10.08.2020). (In Eng.)
5. Poulek V., Strebkov D.S., Persic I.S., et al. Towards 50 Years Lifetime of PV Panels Laminated with Silicone Gel Technology. *Solar Energy*. 2012; 86(10):3103-3108. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.013>
6. Beinert A.J., Imm M., Benick J., et al. Silicon Solar Cell–Integrated Stress and Temperature Sensors for Photovoltaic Modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2020; 28(7):1-8. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1002/pip.3263>
7. Strebkov D.S. Advanced Tendencies in Development of Photovoltaic Cells for Power Engineering. *Thermal Engineering*. 2015; 62(1):7-13. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601514110093>
8. Strebkov D.S., Bobovnikov N.Yu. Technical and Economic Indicators of Solar Power Plants. *Applied Solar Energy*. 2018; 54(6):456-460. Available at: <https://link.springer.com/article/10.3103%2FS003701X18060142> (accessed 10.08.2020). (In Eng.)
9. Strebkov D.S., Shogenov A.K. Solar Photovoltaic Plants. *Power Technology and Engineering*. 2018; 52(1):85-90. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10749-018-0914-4>
10. Strebkov D.S., Shepvalova O.V., Bobovnikov N.I. Investigation of High-Voltage Silicon Solar Modules. *AIP Conference Proceedings*. 2019; 2123. 9 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5117030>
11. Aziz S., Hassan S. On Improving the Efficiency of a Solar Panel Tracking System. *Procedia Manufacturing*. 2017; 7:218-224. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.053>



12. Solar Power Plant: Patent 2702311 Russian Federation. No. 2018135851; appl. 24.10.2018; publ. 07.10.2019. (In Russ.)

Received 15.05.2020; revised 18.06.2020; published online 30.09.2020

About the authors:

Dmitriy S. Strebkov, Scientific Director of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Academician of RAS, D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: K-4157-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2572-801X>, Scopus ID: 7004652438, nauka-ds@mail.ru

Yuriy Kh. Shogenov, Chief of Crop Production and Mechanization Processes Sector of Department of Agricultural Sciences, Russian Academy of Sciences (32A Leninskiy Prospekt, Moscow 119334, Russia), Corresponding Member of RAS, D.Sc. (Engineering), Researcher ID: AAR-1140-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7588-0458>, Scopus ID: 6506035081, yh1961s@yandex.ru

Nikolay Yu. Bobovnikov, Postgraduate Student of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Researcher ID: D-2515-2016, Scopus ID: 119936730, nikolaj.bobovnikov@yandex.ru

Contribution of the authors:

D. S. Strebkov – development of the research concept, scientific guidance, formulation of the research goal and objective, editing the text, adjustment of the conclusions; Yu. Kh. Shogenov – analysis of research results, making calculations, writing the article, drawing conclusions; N. Yu. Bobovnikov – correction of literary analysis, finalizing the text, clarification of conclusions.

Acknowledgements: The authors thank A. E. Irodionov Ph.D. (Engineering) for his assistance in computer modeling parameters of the solar power plant.

All authors have read and approved the final manuscript.



Reliability-Based Topology Optimization Using Two Alternative Inverse Optimum Safety Factor Approaches: Application to Bridge Structures

G. Kharmanda^a, I. R. Antypas^{b*}, A. G. Dyachenko^b

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

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

**imad.antypas@mail.ru*

Introduction. The Deterministic Topology Optimization model provides a single solution for a given design space, while the Reliability-Based Topology Optimization model provides several reliability-based topology layouts with high-performance levels. The objective of this work is to develop two strategies that can provide the designer with two categories of resulting topologies.

Materials and Methods. Two alternative approaches based on the Inverse Optimum Safety Factor are developed: the first one is called the Objective-Based IOSF Approach and the second one is called Performance-Based IOSF Approach. When dealing with bridge structures, the uncertainty on the input parameters (boundary conditions, material properties, geometry, etc.) and also output parameters (compliance, etc.) should not be ignored. The sensitivity analysis is the fundamental idea of both developed approaches, identifies the role of each parameter on the structural performance. In addition, the optimization domain choice is important when eliminating material that should not affect the structure functioning.

Results. Two numerical examples on a 2D bridge structure are presented to demonstrate the efficiency of the developed approaches. When considering a certain reliability level, the Reliability-Based Topology Optimization leads to two different configurations relative to the Deterministic Topology Optimization one. When increasing the reliability levels, the quantity of materials decreases that leads to an increase in the number of holes in the structures.

Discussion and Conclusion. In addition to their simplified implementation, the developed alternative approaches can be considered as two generative tools to produce two different categories (families) of solutions where an alternative choice between two functions (objective/performance) is presented.

Keywords: topology optimization, reliability-based topologies, inverse optimum safety factors method, bridge structures, deterministic topology optimization

For citation: Kharmanda G., Antypas I.R., Dyachenko A.G. Reliability-Based Topology Optimization Using Two Alternative Inverse Optimum Safety Factor Approaches: Application to Bridge Structures. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(3):498-511. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.498-511>



Оптимизация топологии на основе надежности с использованием двух альтернативных подходов оптимального фактора безопасности: применение к мостовым конструкциям

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. Модель детерминированной оптимизации топологии способна привести к единому решению для пространства проектирования, а модель оптимизации топологии на основе надежности позволяет получить несколько макетов топологии на основе надежности с высокими уровнями производительности. Целью данной работы является разработка двух стратегий, которые могут предоставить исследователю две категории полученных топологий.

Материалы и методы. Разработаны два альтернативных подхода, базирующиеся на обратной оптимальной безопасности: первый именуется объективным подходом IOSF, а второй – подходом IOSF, основанным на характеристиках. При работе с мостовыми конструкциями не следует игнорировать неопределенность входных параметров (граничных условий, свойств материала, геометрии и т. д.), а также выходных параметров (соответствия и пр.). Анализ чувствительности, являющийся основной идеей разработанных подходов, показывает роль каждого параметра в производительности конструкции. Выбор области оптимизации важен для того, чтобы можно было исключить материал, не влияя на производительность конструкции.

Результаты исследования. Представлены два численных приложения на двухмерной мостовой структуре, показывающие эффективность разработанных подходов. После анализа уровня надежности можно сказать, что модель оптимизации топологии на основе надежности приводит к двум различным конфигурациям относительно детерминированной оптимизации топологии. При увеличении уровней надежности количество материалов уменьшается, что приводит к увеличению числа отверстий в конструкциях.

Обсуждение и заключение. В дополнение к упрощенной реализации разработанные альтернативные подходы можно рассматривать как два порождающих инструмента для создания разных категорий (семейств) решений, в которых представлен альтернативный выбор между двумя функциями (задача/производительность).

Ключевые слова: оптимизация детерминированной топологии, оптимизация топологии на основе надежности, обратный оптимальный коэффициент безопасности, мостовые конструкции, оптимизация детерминированной топологии

Для цитирования: Харманда, Г. Оптимизация топологии на основе надежности с использованием двух альтернативных подходов оптимального фактора безопасности: применение к мостовым конструкциям / Г. Харманда, И. Р. Антибас, А. Г. Дьяченко. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202003.498-511 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 3. – С. 498–511.

Introduction

Topology optimization tries to answer one of the first structural issues to fulfill the necessary technical specifications. So the topology problem consists of determining the structure's general characteristics, and the objective of topology optimi-

zation is to make that initial choice as automatically as possible [1]. Furthermore, in topology optimization, both macroscopic structures and microscopic materials can be found. In other words, not only the optimal spatial material distribution at the macroscopic structural scale is found,

but also the optimal local use of the cellular material at the microscopic scale [2].

Two major forms of topology optimization may be distinguished, in literature: deterministic form (DTO: Deterministic Topology Optimization) and probabilistic one (RBTO: Reliability-Based Topology Optimization). In the deterministic form, it can be generated a single configuration for a particular given parameter space [3]. While, when the probabilistic form is considered, several configurations can be obtained with different advantages. It helps the designer to select the best configuration to realize the technical specifications. The weight of the resulting configurations produced by the RBTO strategy is minimized when compared with the deterministic one. Additionally, the use of the RBTO strategy and for the same structural weight, the obtained structure is more reliable than the deterministic one [4]. The different RBTO developments can be classified according to two points of view: topology optimization and reliability analysis. The interested reader can find a detailed review in [5]. It has been established that the different developments from point of view “topology optimization” can be considered as an attractive point for topology designers since it leads to a number of reliability-based topologies with respect to the reliability index variation. It provides diverse layout structures, however, the different advances from the “reliability analysis” point of view yields to the same configurations with different densities that do not have any importance for the following design steps [6–9]. Thus, in the following section, a literature of the different advances from a point of view “topology optimization” is presented to focus on the advantage of the developed methods [10].

Literature Review

M. P. Bendsoe and N. Kikuchi were the first who integrated the homogenization approach into the optimal material distribution study [1]. The majority of topology optimization studies were based

on the deterministic assumption. To study the uncertainty effect in the topology optimization, G. Kharmanda and N. Olhoff were the first who incorporated reliability constraints into DTO studies [11]. The approach starts with a sensitivity evaluation of the objective function with respect to different parameters in order to identify the random variables that have a large influence on the objective function. This elaborated model provides the designer with several reliability-based structures however in the classical DTO, a single deterministic topology is produced. The value of the RBTO concept is to provide structures that should be more reliable than those generated using DTO. After that, the authors applied probabilistic neural networks for highly nonlinear or disjoint failure domain problems [12]. Next, developed a non-probabilistic RBTO approach for the detailed design stage of continuum structures, in which the unknown but bounded uncertainties that exist in material and external loads were simultaneously considered [13]. Recently Inverse Optimum Safety Factor (IOSF) strategy was proposed to deal with the modal studies where there are no external loads and the topology optimization integration into free vibrated structures may provide unworkable topologies [5]. The IOSF strategy implementation was limited to consider the parameterization only on the optimization domain.

In order to execute an RBTO problem, there are many Reliability-Based Design Optimization (RBDO) techniques that can be carried out. According to the application areas, some RBDO approaches have been used [4]. For example, the Optimum Safety Factor (OSF) approach as an efficient RBDO technique has been applied in a simple way considering two simple steps [4]. The first step is to use a single simplified optimization procedure in order to find the failure point; however, the next step is to use the OSF equations to evaluate the optimum solution. An Inverse Optimum Safety Factor (IOSF) approach was

developed to first determine the topology configuration by DTO procedure [5]. After that, the OSF equations are performed considering inverse signs of the derivatives in order to produce diverse RBTO layouts. The generation of the resulting topology layouts is carried out considering a given design space (geometry, loading, material properties, etc.). In this work, two alternative IOSF approaches are developed to produce two categories (families) of solutions that can open more possibilities for the designer to choose the best configuration which can be the most advantageous solution. Two numerical studied cases on a 2D bridge structure are detailed where the topology optimization problem is modeled in two different ways.

Materials and Methods

Deterministic topology optimization

In this work, the problem of topology optimization is described in two different ways. The first way is to reduce the structural compliance under a required ratio reduction of volume V_f^r . The problem of DTO model is then mathematically written by:

$$\begin{aligned} \min : & C(x) \\ \text{s.t.} : & \frac{V(x)}{V^0} \leq V_f^r, \end{aligned} \quad (1)$$

where $C(x)$ is the structural compliance where the densities of the used material in each element are considered as optimization variables. Their values should be in the interval $[0, 1]$. V^0 and $V(x)$ are the initial – and present (or current) structural volume values. However, the second way is to reduce the volume under a required ratio increase of compliance C_f^r [14–18]. The DTO problem is then mathematically formulated as follows:

$$\begin{aligned} \min : & V(x) \\ \text{s.t.} : & \frac{C(x)}{C^0} \leq 1 + C_f^r \end{aligned} \quad (2)$$

where $V(x)$ is the structural volume considering the material densities in each ele-

ment as optimization variables that belong to the interval $[0, 1]$. C^0 and $C(x)$ are the initial – and current structural compliance values [19–23]. Formulations 1 and 2 are fundamental forms and can be implemented with some topology optimization approaches such as SIMP (Solid Isotropic Microstructure with Penalty), homogenization approach and many recent methods have been recently developed to extend the topology optimization to some advanced area such as additive manufacturing [24–26].

Reliability Index

In order to generate the resulting topologies, a reliability index β is used with a normalized vector u . Figure 1 shows the transformation image between the random variables y in the physical space and the normalized vector u in the normalized space [27]. The general reliability index evaluation can be performed using the following optimization problem:

$$\begin{aligned} \beta &= \min d(u) \\ \text{s.t.} : & H(u) = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

where the distance $d(u)$ in the normalized space is given by:

$$d(u) = \sqrt{u_1^2 + \dots + u_n^2}. \quad (4)$$

The optimum value of β corresponds to the Most Probable failure Point (MPP) which is represented by the minimum distance between the origin of the normalized space and limit state curve as shown in Fig. 1. The reliability index assessment is carried out using FORM (First Order Reliability Method).

The reliability index values affect the conceptual design stage. The validation of this effect is studied by [28]. In general, the nuclear and spatial applications require very small values of failure probability, the failure probability has to be: $P_f \in [10^{-6} - 10^{-8}]$ which corresponds to a reliability index interval $\beta \in [4.75 - 5.6]$,

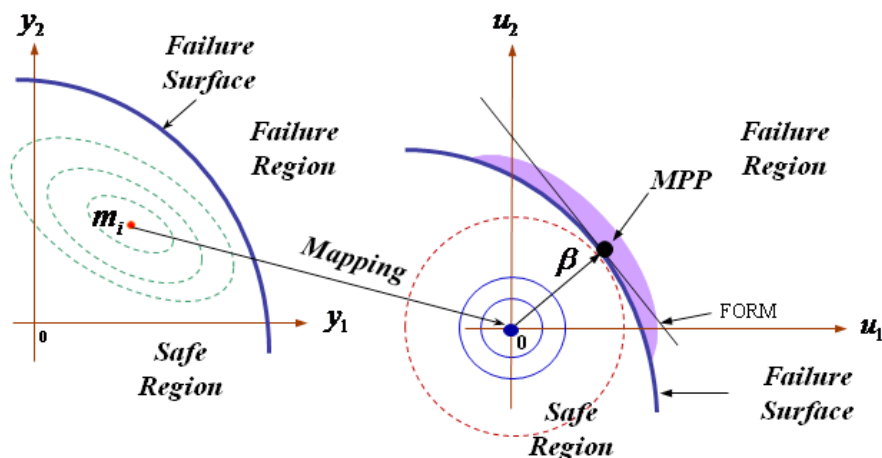


Fig. 1. Transformation image between the physical space and the normalized one

while in civil engineering, the failure probability has to be: $P_f \in [10^{-6} - 10^{-5}]$ which corresponds to a reliability index interval $\beta \in [3 - 4.25]$. For structural engineering applications, the used target reliability index is: $\beta = 3.8$. A detailed revision of target reliability indices can be found in [29].

RBTO by Objective-Based IOSF Approach

The previous OSF strategy can efficiently decrease the size of the RBDO problem using the sensitivities of the limit state function with respect to all the structure's parameters, especially when the sensitivity can be calculated analytically [30; 31]. The main idea of OSF strategy is to find the failure point and next the optimum solution using the OSF formulations. The problem of RBTO model is to reduce the structural compliance under a required ratio reduction of volume V_f^r and the reliability constraint. The RBTO problem is then mathematically formulated by:

$$\begin{aligned} \min : & C(x) \\ \text{s.t.} : & \beta \geq \beta_t \\ \text{and} : & \frac{V(x)}{V^0} \leq V_f^r, \end{aligned} \quad (5)$$

where β_t is the required reliability index to be respected. The failure is related to the compliance. In this case, the compliance is considered as an objective function. Thus, the sensitivity can be estimated considering the objective function as a failure criterion. This way, the optimum value of the normalized vector can be expressed by:

$$u_i^* = \pm \beta_t \sqrt{\frac{\left| \frac{\partial F}{\partial y_i} \right|}{\sum_{j=1}^n \left| \frac{\partial F}{\partial y_j} \right|}}. \quad (6)$$

According to the derivative sign of the objective function with respect to random variables y_i , we have:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial y_i} > 0 & \Leftrightarrow u_i^* > 0 \text{ and} \\ \frac{\partial F}{\partial y_i} < 0 & \Leftrightarrow u_i^* < 0. \end{aligned} \quad (7)$$

This approach takes into account both concepts of the OSF and failure criterion. When the failure criterion is treated as an

objective function, the Objective-Based IOSF Approach can be implemented, however when the failure criterion is treated as a performance function, the method can be called Performance-Based IOSF Approach, which is presented in the following section.

RBTO by Performance-Based IOSF Approach

The different developments of the OSF strategy for linear and nonlinear distribution laws are carried out considering the structural reliability philosophy. These developments fit with the fundamental idea of this proposed approach where the structural compliance is considered as a performance function (constraint function). Thus, the RBTO problem is to minimize the structural volume subject to the compliance constraint and the reliability one. The RBTO problem is then mathematically formulated by:

$$\begin{aligned} \min : & V(x) \\ \text{s.t.} : & \beta \geq \beta_t \\ \text{and} : & \frac{C(x)}{C^0} \leq 1 + C_f^T. \end{aligned} \quad (8)$$

The optimum value of the normalized vector can be written as follows:

$$u_i^* = \pm \beta_t \sqrt{\frac{\left| \frac{\partial G}{\partial y_i} \right|}{\sum_{j=1}^n \left| \frac{\partial G}{\partial y_j} \right|}}. \quad (9)$$

According to the derivative sign of the limit state function with respect to random variables y_i , we have:

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial y_i} > 0 & \Leftrightarrow u_i^* > 0 \text{ and} \\ \frac{\partial G}{\partial y_i} < 0 & \Leftrightarrow u_i^* < 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Here, the random variable vector is considered to be normally distributed, the safety factor can be formulated as follows:

$$S_{f_i} = 1 + \gamma_i \cdot u_i^*, \quad (11)$$

where the relationship between the mean m_i and standard-deviation σ_i is represented by the variance coefficient γ_i as follows:

$$\gamma_i = \sigma_i / m_i. \quad (12)$$

In both developed approaches, the starting point is considered as the failure point P_y^* and the determination of the reliability-based topology P_x^* is next carried out. The reliability-based topology P_x^* should be more reliable than the failure point P_y^* and should also verify a target reliability index β_t . This way the DTO procedure is used to determine the failure point P_y^* and the both developed approaches are then used to find the reliability-based topologies P_x^* .

Results

The topology optimization is applied here to a 2D bridge structure considering two studied cases: the first case is to minimize the structural compliance $C(x)$ subject the constraint of the volume reduction ratio V_f (1) and (5). However, the second case is to minimize the structural volume $V(x)$. Subject the constraint of the compliance increase ratio C_f (2) and (8). It is the objective to find the best distribution of material considering three studies: DTO, RBTO using Objective-Based IOSF approach, and RBTO using Performance-Based IOSF approach.

The initial domain is represented by a rectangle (200 × 50 m). As shown in Figure 2, two domain are considered: the lower domain is not considered to be optimized (200 × 7.5 m), while the upper domain is considered as optimized domain (200 × 42.5 m). The bridge is considered to be made of steel with a Young's modulus $E = 200\,000$ MPa and a Poisson's ratio $\nu = 0.3$. The material behavior is linear

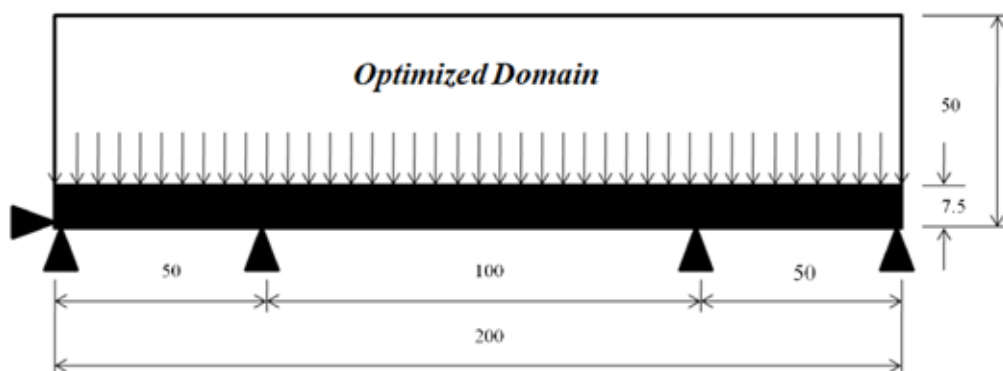


Fig. 2. Initial configuration of the studied 2D bridge structure

elastic isotropic. The applied distributed force is: $F = 1 \times 10^8$ N/m. The boundary conditions are illustrated in Figure 2. To perform the RBTO using Objective-Based and Performance-Based IOSF Approaches, the sensitivity evaluation is carried out on the starting point configuration and considering the central finite difference approach as an accurate tool for sensitivity analysis.

First category of solutions

The starting configuration is considered to be the failure point where the optimization problem is to minimize the structural compliance subject to the volume constraint for the DTO (1) and also the reliability constraints for the RBTO (5).

Figures 3a, 3b and 3c show the resulting 2D bridge topologies when considering the compliance as an objective function for DTO model (failure point P_y) and RBTO models when the reliability indices are: $\beta_t = 3$, and $\beta_t = 3.8$ using Objective-Based IOSF approach. The corresponding resulting compliances are shown in Table 1 for the initial configuration C^0 and the optimal one C^* . The used number of element for optimization is 1 360 nonlinear elements (PLANE82 with 8-nodes) and the Optimality Criteria (OC) method which implemented in ANSYS Software is used. The uncertainty is considered on the loading, the material properties and the volume reduction ratio (quantity of

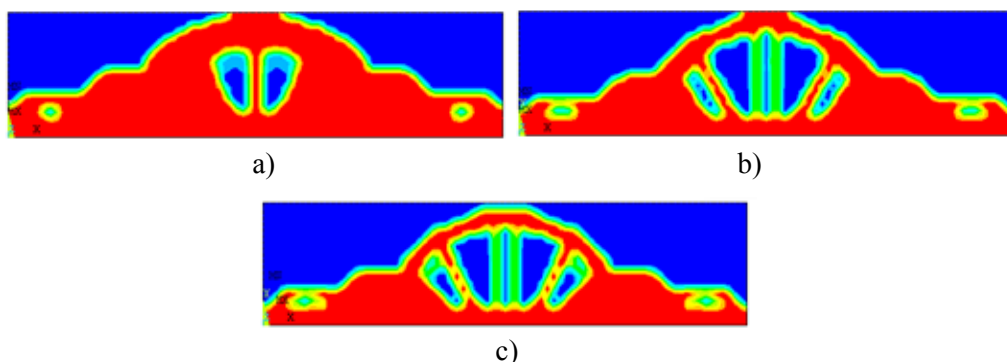


Fig. 3. Resulting 2D bridge topologies when considering the compliance as an objective function:
a) DTO configuration; b) RBTO configuration for $\beta_t = 3$;
c) RBTO configuration for $\beta_t = 3.8$ using Objective-Based IOSF approach

materials). The random variables are: E , ν , F and V_f . The standard deviations are assumed to be proportional to the starting values (P_y^*) presented in Table 1, i.e. $\sigma_i = \gamma_i m_i(12)$, where $\gamma_i = 0.1$.

Figure 4 shows the sensitivity magnitude values of the compliance with re-

spect to the four random variables where the compliance is treated as an objective function.

The input and output parameters are shown in Table 1 where the compliance as an objective function. In this table, the failure point P_y^* and the optimum solution

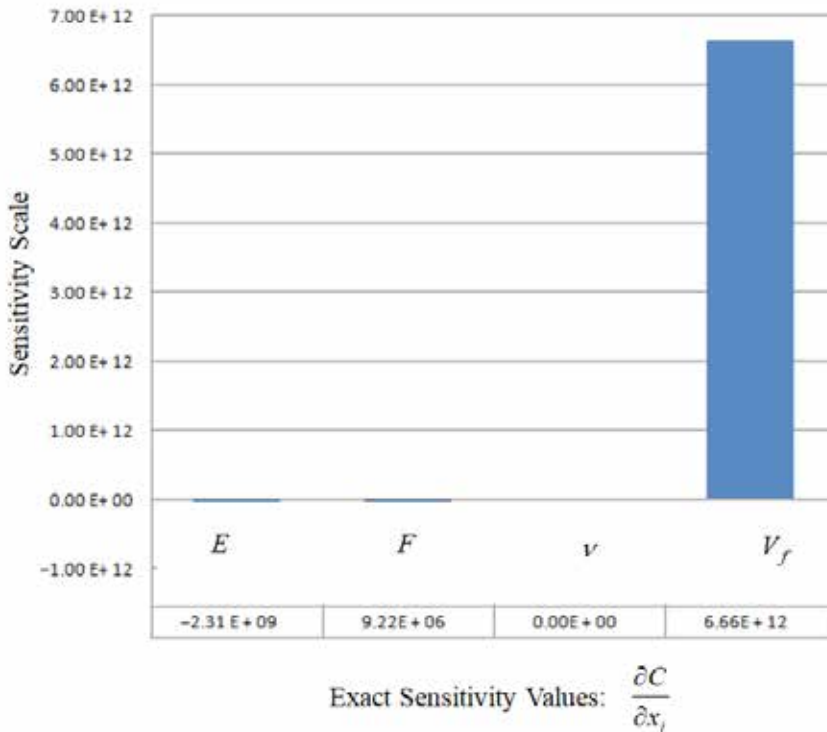


Fig. 4. Sensitivity magnitude values of the compliance as an objective function

Table 1

Different input and output parameters for the first category of solutions

Parameters	P_y^*	$\beta = 3$			$\beta = 3.8$		
		u_i	S_{f_i}	P_x^*	u_i	S_{f_i}	P_x^*
E	200 000	-0.05582	0.99442	198 883.64	-0.0707	0.99293	198 585.94
F	1×10^8	0.00353	1.00035	100 035 301	0.0045	1.00045	100 044 714
ν	0.3	0	1	0.3	0	1	0.3
V_f	50	2.99948	1.29995	64.997393	3.7993	1.37993	68.996698
C^0	12.066×10^{16}	19.722×10^{16}			22.968×10^{16}		
C^*	4.6095×10^{14}	5.9892×10^{14}			6.5099×10^{14}		
$V(x)$	4 250	2 975.22			2 635.28		

P_x^* for two chosen target reliability indices ($\beta = 3$ and $\beta = 3.8$) are presented. The normalized vector u_i is calculated using (6) and the corresponding safety factors S_{fi} are computed using (11).

Second category of solutions

The starting configuration is considered to be the failure point where the problem is to minimize the structural volume subject to the compliance constraint for the DTO (2) and also the reliability constraints for the RBTO (8). Figures 4a, 4b and 4c show the resulting 2D bridge topologies when considering the structural volume as an objective function for DTO model (failure point P_y^*) and RBTO models when the reliability indices are: $\beta_i = 3$, and $\beta_i = 3.8$ using Performance-Based IOSF Approach. The corresponding resulting volumes are shown in Table 1 for the initial configuration V^0 and the optimal one V^* . The used number of element for optimization is 1 360 nonlinear elements (PLANE82 with 8-nodes) and the Sequential Convex Programming (SCP) method which implemented in ANSYS Software is used. The uncertainty is considered on the material properties, the loading and the compliance increase ratio C_f . The random variables are: E , ν , F and C_f . The standard deviations are assumed to be proportional to the starting values (P_y^*) presented in Table 2, i.e. $\sigma_i = \gamma m_i$ (12) where $\gamma = 0.1$.

The sensitivity values of the compliance as a performance function with respect to the four random variables are shown in Figure 6.

The input and output parameters are shown in Table 2 where the compliance as a performance function. In this table, the failure point P_y^* and the design point P_x^* for two chosen target reliability indices ($\beta_i = 3$, and $\beta_i = 3.8$) are presented. The normalized vector u_i is calculated using (9) and the corresponding safety factors S_{fi} are computed using (11).

Discussion and Conclusion

According to our previous work, the Inverse Optimum Safety Factor (IOSF) method has been successfully used for free vibrated structures [5]. The used random parameters concerned the external geometrical boundaries. In this work, the uncertainty is applied to material properties, loading and response parameters. Two alternative IOSF approaches are developed to provide two categories of solutions. The resulting topology configurations, sensitivity values and output parameters are clearly different for the same given space. The influence of the input parameter is determined using sensitivity analysis being the basic tool of the OSF strategy. The starting point is represented by the failure point P_y^* , and from this point, the reliability level should be increased.

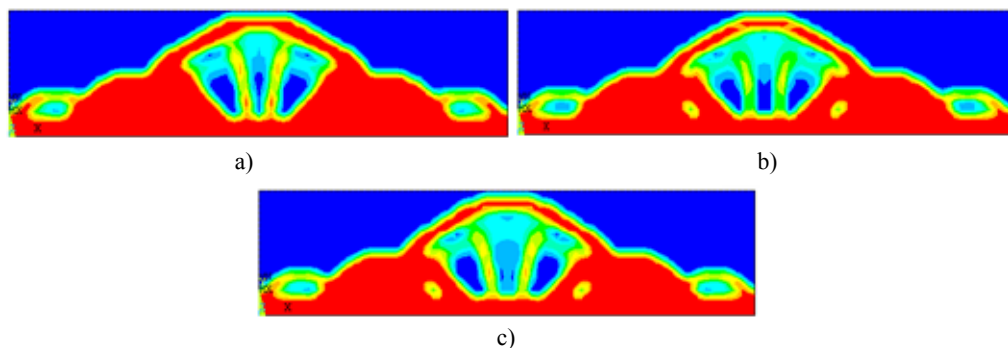


Fig. 5. Resulting 2D bridge topologies when considering the structural volume as an objective function: a) DTO configuration; b) RBTO configuration for $\beta_i = 3$; c) RBTO configuration for $\beta_i = 3.8$ using Performance-Based IOSF approach

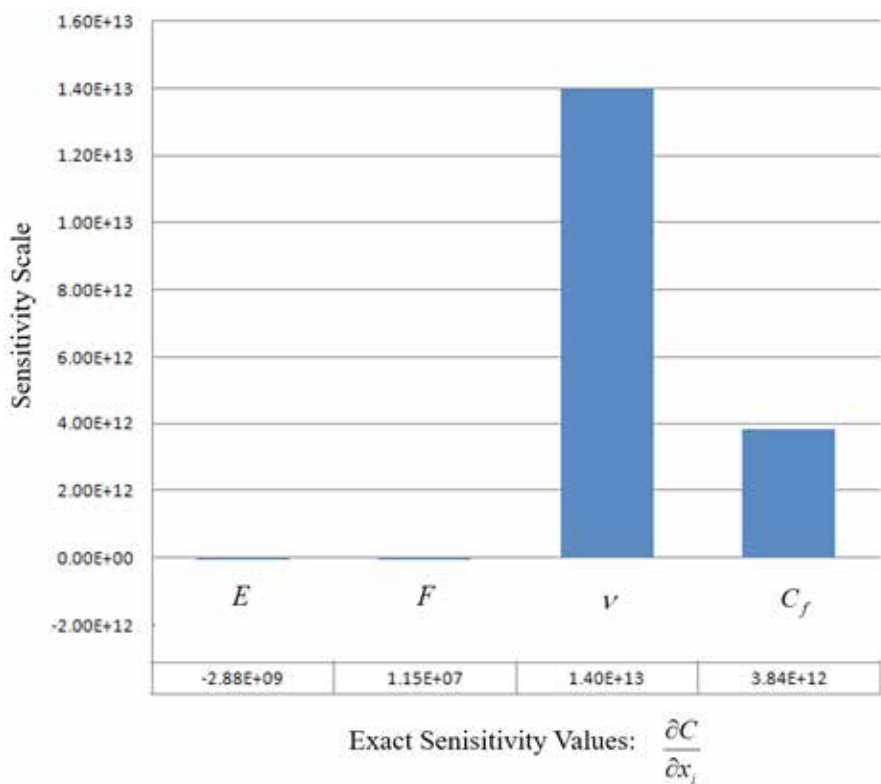


Fig. 6. Sensitivity magnitude values of the compliance as a performance function

Table 2

Different input and output parameters for the second category of solutions

Parameters	P_y^*	$\beta_t = 3$			$\beta_t = 3.8$		
		u_i	S_{f_i}	P_x^*	u_i	S_{f_i}	P_x^*
E	200 000	-0.03810	0.996190	199 238	-0.04826	0.995174	199 034.8
F	1×10^8	0.00241	1.000241	100 024 100	0.00306	1.000306	100 030 600
ν	0.3	2.65760	1.265760	0.379728	3.36629	1.336629	0.400989
C_f	50	1.39130	1.139130	56.9565	1.76231	1.176231	58.81157
I^0	8 500						
I^*	3 148.39	2 926.11			2 874.46		
$C(x)$	5.7483×10^{14}	6.2735×10^{14}			6.4130×10^{14}		

In the Objective-Based IOSF Approach, the compliance is considered as an objective function and its sensitivity is evaluated with respect to different parameters. It provides the first category of RBTO solutions when changing the reliability index values. It is noted that the volume fraction has the biggest role on the resulting compliance, while the Poisson's ratio has no influence on the resulting compliance (Fig. 4). The resulting RBTO configurations (Fig. 3b and 3c) can be modeled with a bigger number of holes in the structure. This result can be supported numerically by the decrease of the structural volume $V(x)$, when increasing the reliability index values (Table 1).

However, in the Performance-Based IOSF Approach, the compliance is considered as a performance function and its sensitivity is evaluated with respect to different parameters. It provides the second category of RBTO solutions when changing the reliability index values. It is noted that the Poisson's ratio has the biggest

role on the resulting compliance which is totally different when using the previous alternative approach (Fig. 6). The resulting RBTO configurations (Fig. 5b and 5c) can be also modeled with a bigger number of holes in the structure. This result can be supported numerically by the decrease of the optimal values of the structural volume V^* , when increasing the reliability index values (Table 2). It is noted also that when the reliability index equal to $\beta_t = 3.8$, the Poisson's ratio arrives to its limit ($\varepsilon \approx 0.4$) for the isotropy of the used material. This way it is not possible to increase the reliability index value when using the Performance-Based IOSF Approach.

As result, it is very important to use both alternative approaches when dealing with this kind of problems during the conceptual design stage in order to open more categories of solutions as layouts for the detailed design stage. Thus, RBTO using the developed approaches is able to generate two groups of solutions, providing the designer with a range of topologies.

REFERENCES

1. Bendsoe M.P., Kikuchi N. Generating Optimal Topologies in Optimal Design Using a Homogenization Method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1988; 71(2):197-224. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(88\)90086-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(88)90086-2)
2. Xia L. Multiscale Structural Topology Optimization. London: ISTE & Elsevier; 2016. 184 p. Available at: https://www.researchgate.net/publication/293427993_Multiscale_Structural_Topology_Optimization. (accessed 11.08.2020). (In Eng.)
3. Zhang W., Zhu J., Gao T. Topology Optimization in Engineering Structure Design. London: ISTE & Elsevier; 2016. 294 p. Available at: <https://www.sciencedirect.com/book/9781785482243/topology-optimization-in-engineering-structure-design> (accessed 11.08.2020). (In Eng.)
4. Kharmanda G., El-Hami A. Biomechanics: Optimization, Uncertainties and Reliability (Reliability of Multiphysical Systems Set). 1st ed. London: ISTE & Wiley; 2017. 254 p. Available at: <https://www.amazon.com/Biomechanics-Optimization-Uncertainties-Reliability-Multiphysical/dp/1786300257> (accessed 11.08.2020). (In Eng.)
5. 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. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.008-019>
6. Patel N.M., Renaud J.E., Agarwal H., et al. Reliability Based Topology Optimization Using the Hybrid Cellular Automaton Method. In: 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. 2005. 13 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2005-2134>



7. 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. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-015-1360-7>
8. Bae K., Wang S. Reliability-Based Topology Optimization. In: 9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. 2002. AIAA 2002-5542. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2002-5542>
9. Agarwal H. Reliability Based Design Optimization: Formulations and Methodologies. PhD thesis. South Bend: University of Notre Dame; 2004. 136 p. Available at: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2004PhDT.....148A> (accessed 11.08.2020). (In Eng.)
10. Eom Y.-S., Yoo K.-S., Park J.-Y., et al. Reliability-Based Topology Optimization Using a Standard Response Surface Method for Three-Dimensional Structures. *Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2011; 43(2):287-295. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-010-0569-8>
11. Kharmanda G., Olhoff N. Reliability-Based Topology Optimization. In: Report No. 110, Institute of Mechanical Engineering. Aalborg: Aalborg University; 2001. Available at: <http://www.forskningsdata-basen.dk/en/catalog/2389380317> (accessed 11.08.2020). (In Eng.)
12. Patel J., Choi S.K. Classification Approach for Reliability-Based Topology Optimization Using Probabilistic Neural Networks. *Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2012; 45(4):529-543. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-011-0711-2>
13. Wang L., Liu D., Yang Y., et al. 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. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.08.023>
14. Bendsoe M.P. Optimal Shape Design as a Material Distribution Problem. *Structural Optimization*. 1989; 1(4):193-202. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01650949>
15. Bendsoe M.P., Sigmund O. Material Interpolations in Topology Optimization. *Archive of Applied Mechanics*. 1999; 69(9-10):635-654. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s004190050248>
16. Rozvan G.I.N. Problem Classes, Solution Strategies and Unified Terminology of FE-Based Topology Optimization. In: Topology Optimization of Structures and Composite Continua; 2000. Pp. 19-35. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05086-6>
17. Bendsoe M.P., Sigmund O. Topology Optimization – Theory, Methods, and Applications. 2nd ed. Berlin: Heidelberg; 2003. 370 p.
18. Amir O. A Topology Optimization Procedure for Reinforced Concrete Structures. *Computers and Structures*. 2013; 114-115:46-58. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.10.011>
19. Andreassen E., Jensen J.S. Topology Optimization of Periodic Microstructures for Enhanced Dynamic Properties of Viscoelastic Composite Materials. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2014; 49:695-705. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-013-1018-2>
20. Alberdi R., Khandelwal K. Topology Optimization of Pressure Dependent Elastoplastic Energy Absorbing Structures with Material Damage Constraints. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2017; 133:42-61. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2017.05.004>
21. Groen J.P., Sigmund O. Homogenization-Based Topology Optimization for High-Resolution Manufacturable MicroStructures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2018; 113(8):1148-1163. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1002/nme.5575>
22. Nishi S., Terada K., Kato J., et al. Two Scale Topology Optimization for Composite Plates with In Plane Periodicity. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2018; 113(8):1164-1188. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1002/nme.5545>
23. Kato J., Yachi D., Kyoya T., et al. Micro-Macro Concurrent Topology Optimization for Nonlinear Solids with a Decoupling Multiscale Analysis. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2018; 113(8):1189-1213. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1002/nme.5571>

24. Andreassen E., Ferrari F., Sigmund O., et al. Frequency Response as a Surrogate Eigenvalue Problem in Topology Optimization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2018; 113(8):1214-1229. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1002/nme.5563>
25. Liu J., Gaynor A.T., Chen S., et al. Current and Future Trends in Topology Optimization for Additive Manufacturing. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2018; 57:2457-2483. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-018-1994-3>
26. Nishiwaki S., Terada K. Advanced Topology Optimization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2018; 113(8):1145-1147. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1002/nme.5703>
27. Hasofer A.M., Lind N.C. An Exact and Invariant First Order Reliability Format. *Journal of Engineering Mechanics*. 1974; 100:111-121. Available at: [https://www.scirp.org/\(S\(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1087045](https://www.scirp.org/(S(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1087045) (accessed 11.08.2020). (In Eng.)
28. Kharmanda G., Antypas I.R., Dyachenko A.G. The Effect of Reliability Index Values on Resulting Reliability-Based Topology Optimization Configurations: Numerical Validation by Shape Optimization. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):332-344. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.332-344>
29. Jeppsson J. Reliability-Based Assessment Procedures for Existing Concrete Structures. *Structural Engineering*. Lund: Lund University; 2003. 200 p. Available at: <https://portal.research.lu.se/portal/files/4798304/1693340.pdf> (accessed 11.08.2020). (In Eng.)
30. Sigmund O. A 99 Line Topology Optimization Code Written in MATLAB. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2001; 21:120-127. (In Eng.) DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s001580050176>
31. Sigmund O., Maute K. Topology Optimization Approaches. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2013; 48:1031-1055. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-013-0978-6>

Received 08.02.2020; revised 15.03.2020; published online 30.09.2020

Поступила 08.02.2020; принята к публикации 15.03.2020; опубликована онлайн 30.09.2020

About the authors:

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

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

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

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 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 manuscript.

*Об авторах:*

Харманда Гнас, исследователь Лаборатории механики Нормандии Национального института прикладных наук Руана (76801, Франция, г. Сент-Этьен-дю-Рувре, Авеню-дель-Университе, д. 685), доктор технических наук, Researcher ID: 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, Researcher ID: 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, Researcher ID: 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, сбор и анализ аналитических и практических материалов по теме исследования, критический анализ и доработка решения, компьютерная реализация решения задачи; И. Р. Антибас – постановка задачи, определение методологии исследования, сбор аналитических 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.

Информация для авторов и читателей

Научный журнал «Инженерные технологии и системы» публикует оригинальные научные исследования, способствующие развитию науки в области инженерных систем и технологий.

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

- 01.04.01 Приборы и методы экспериментальной физики
- 01.04.05 Оптика
- 01.04.13 Электрофизика, электрофизические установки
- 05.20.01 Технологии и средства механизации сельского хозяйства
- 05.20.02 Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве
- 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве

Не допускается направление в редакцию уже опубликованных статей или статей, отправленных на публикацию в другие журналы. **В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий опубликованная статья будет ретрагирована (отозвана из печати).** Мониторинг несанкционированного цитирования осуществляется с помощью систем «Антиплагиат» и CrossCheck.

Журнал приветствует статьи, имеющие потенциально высокий импакт-фактор и/или содержащие материал о значительных достижениях в указанных направлениях. Особое внимание следует уделить качеству перевода. Желательно, чтобы он был выполнен носителем английского языка.

При подготовке статьи к публикации в журнале «Инженерные технологии и системы» необходимо учесть следующие пункты.

1. Указать **УДК**.

2. **Заголовок статьи** должен кратко и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного исследования. *Приводится на русском и английском языках.*

3. **Аннотация** (200–250 слов) выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В ней должны быть четко обозначены следующие составные части:

- 1) Введение (Introduction);
- 2) Материалы и методы (Materials and Methods);
- 3) Результаты исследования (Results);
- 4) Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion).

Приводится на русском и английском языках.

4. **Ключевые слова** (5–10) являются поисковым образом научной статьи. В связи с этим они должны отражать основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования. *Приводятся на русском и английском языках.*

5. **Благодарности.** В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам. *Приводятся на русском и английском языках.*

6. **Основной текст** статьи излагается на русском или английском языках.

1) Введение – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

2) Обзор литературы. Необходимо описать основные (последние по времени) исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы; выделить нерешенные вопросы в пределах общей проблемы, которым посвящена статья.

3) Материалы и методы. В данном разделе описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, использованная аппаратура; даются подробные сведения об объекте исследования; указывается последовательность выполнения исследования и обосновывается выбор используемых методов (наблюдение, опрос, тестирование, эксперимент, лабораторный опыт и т. д.).

4) Результаты исследования. Это основной раздел, цель которого – при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно эти данные.

5) Обсуждение и заключение. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области.

7. **Список использованных источников** (оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.100–2018). Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 30–40 источников. Из них за последние 3 года – не менее 20, иностранных – не менее 15. Следует указать DOI или адрес доступа в сети Интернет. *Оформляется на русском и английском языках.*

8. **Об авторах.** Ф.И.О., организация(и), адрес организации(й) (требуется указать все места работы автора, в которых выполнялись исследования (постоянное место, место выполнения проекта и др.)), должность и ученое звание, ORCID, Researcher ID, электронная почта, телефон, почтовый адрес для отправки авторского экземпляра. *Приводится на русском и английском языках.*

9. **Заявленный вклад соавторов.** В конец рукописи необходимо включить примечания, в которых разъясняется фактический вклад каждого соавтора в выполненную работу. *Приводится на русском и английском языках.*

10. Техническое оформление.

1) Редакция принимает тексты, сохраненные в формате .doc, .docx, .rtf. Желательно использовать шрифт Times New Roman, кегль 14 и интервал 1,5 строки. Расстановка переносов вручную не допускается. Запрещается использовать двойные пробелы в тексте, а также выполнять отступы (красная строка), используя пробелы.

2) Формулы набираются сочетанием основного шрифта и шрифта Symbol (исключение для дробей, сумм, квадратного корня) в Microsoft Equation 3.0 (Редактор формул в Microsoft Word) или Math Type 6. Латинские знаки в формулах и обозначениях (как в тексте, так и на рисунках) набираются курсивом. Формулы нумеруются в круглых скобках. Нумеровать следует только те формулы и уравнения, на которые есть ссылка в последующем изложении.

3) Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

4) Рисунки могут быть представлены в растровом или векторном формате с разрешением не ниже 300 dpi. Они должны допускать редактирование текста и возможность изменения размеров. Все графические данные помещаются в текст статьи, а также высылаются дополнительно в виде отдельных файлов. Разнохарактерные иллюстрации необходимо приводить к единому стилю графического исполнения, соблюдая единообразие их оформления. Графики, схемы и диаграммы необходимо оформлять в Microsoft Excel.

При подаче статьи в редакцию автор соглашается с положениями прилагаемого лицензионного договора.

Важным этапом в процессе отбора статьи является рецензирование. В журнале «Инженерные технологии и системы» принято «двойное слепое» (рецензент и автор не знают имен друг друга) рецензирование статей. Рецензент на основании анализа статьи принимает решение о рекомендации ее к публикации или о ее отклонении. В случае несогласия автора статьи с замечаниями рецензента его мотивированное заявление рассматривается редакционной коллегией.

Политика редакционной коллегии журнала базируется на современных юридических требованиях в отношении клеветы, авторского права, законности и плагиата, поддерживает Кодекс этики научных публикаций, сформулированный Комитетом по этике научных публикаций, и строится с учетом этических норм работы редакторов и издателей, закрепленных в Кодексе поведения и руководящих принципах наилучшей практики для редактора журнала и Кодексе поведения для издателя журнала, разработанных Комитетом по публикационной этике.

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 systems and technologies.

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Technologies and Means of Agricultural Mechanization

Electrotechnologies and Electrical Equipment in Agriculture

Technologies and Maintenance Means in Agriculture

It is not allowed to submit papers that have already been published or sent for publication to other journals. **In the case of multiple submission of a manuscript, the published article will be retracted.** Monitoring of unauthorized citation is implemented by means of AntiPlagiat and CrossCheck systems.

The Journal gives preference to the articles with potentially high impact factor and/or containing materials about significant achievements in the specified areas of science. Special attention should be paid to the quality of the translation. Preferably it should be made by a native English speaker.

To submit an article in the journal Engineering Technologies and Systems you should know:

1. It is necessary to indicate the **Universal Decimal Classification** (UDC) code.

2. **The title of the article** should accurately reflect the content of the article, the subject matter and the results of the research conducted.

The title should be written in Russian and English.

3. **The abstract** (200–250 words) serves as an enhanced title of the article and briefly presents its content. The abstract consists of the following components:

1) Introduction;

2) Materials and Methods;

3) Results;

4) Discussion and Conclusion.

The abstract should be written in Russian and English.

4. Keywords (5–10) make the search profile of the scientific article. In this regard, they should reflect the main provisions, achievements, results and terminology of the scientific research.

Keywords should be written in Russian and English.

5. **Acknowledgements.** In this section the author may mention the people who helped them to prepare the article or the organizations that provided financial support. It is considered good style to express gratitude to anonymous reviewers.

Acknowledgements should be written in Russian and English.

6. **The main body** of the article should be written in Russian or in English.

1) Introduction. It contains formulation of the scientific problem, its relevance, connection with the most important tasks to be solved, the importance for the development of a particular area of science or practical activities.

2) Literature Review. It is necessary to describe the main (recent) pieces of research and publications relied upon by the author, modern views on the problem, difficulties in solving the problem as well as to highlight the unresolved issues within the general problem of the article.

3) Materials and Methods. This section describes the process of designing the experiment, the methods and equipment used; it gives detailed information about the subject and sequence of the research, justifies the choice of the methods used (observation, survey, testing, experiment, etc.).

4) Results. This is the main section, the purpose of which is to prove the working hypothesis (hypotheses) by analyzing, generalizing and explaining the data. The results should be brief, but they should provide sufficient information to evaluate the conclusions drawn. It should also be justified why the particular data were chosen for the analysis.

5) Discussion and Conclusion. In conclusion, the results of understanding the topic should be summarized; conclusions, generalizations and recommendations arising from the work should be made, their practical significance should be emphasized and the main directions for further research in the studied area should be determined.

7. **References** should be given in accordance with the requirements of the *GOST R 7.0.100–2018* standard. The original sources from scientific journals included in the global citation indices should be cited first of all. It is desirable to refer to 30–40 sources. Of these, at least 20 sources should be those published over the past 3 years and at least 15 foreign ones. DOI or the URL of the source should be indicated.

References should be written in Russian and English.

8. Information **about author(s)** includes: the author's first name and last name, the name of the institution and its address (it is required to specify all the institutions where the author works and where the research was conducted (permanent place of work, the place where the project was done, etc.). The author's position and academic title, ORCID, Researcher ID, e-mail, phone number, postal address for sending a personal copy of the Journal issue.

Information about the authors should be written in Russian and English.

9. **Contribution of the authors.** At the end of the manuscript, the authors should include notes that explain the actual contribution of each co-author to the work performed.

Contribution of the authors should be written in Russian and English.

10. **Manuscript Format Guidelines.**

1) The manuscript should be typed in the Microsoft Word text processing program for Windows (.doc, .docx, .rtf): sheet size – A4, Times New Roman font, font size – 14, line spacing – 1.5. Manual hyphenation is not allowed. It is forbidden to use double spaces in the text, as well as to indent (red line) using spaces.

2) Formulas are typed by combining the main font and the Symbol font (exception for fractions, sums, square root) in Microsoft Equation 3.0 (Formula Editor in Microsoft Word) or Math Type 6. Latin symbols in formulas and notation (both in the text and in the figures) typed in italics. Formulas are numbered in parentheses. Only those formulas and equations referenced in the following presentation should be numbered.

3) All titles, signatures and structural elements of graphs, tables, charts, etc., are to be provided in Russian and English.

4) Figures can be presented in raster or vector format with a resolution of at least 300 dpi. They should allow text editing and resizability. All graphic data are placed in the text of the article, as well as sent additionally as separate files. Diverse illustrations should be brought to a single style of graphic performance, while respecting the uniformity of their design. Graphs, charts and diagrams must be drawn up in Microsoft Excel.

When submitting an article to the Journal, the author agrees with the provisions of the attached license agreement.

As part of the submission, the journal will peer review your article before deciding whether to publish it. *Engineering Technologies and Systems* journal uses double-blind review, which means that both the reviewer and author identities are concealed from the reviewers, and vice versa. On the basis of the analysis of the article, the reviewer makes a decision whether to recommend the article for publication or reject it. If the author disagrees with the reviewer's comments, their reasoned statement shall be considered by the Editorial Board.

Editorial staff's policy is based on modern legal requirements concerning libel, copyright, legitimacy, plagiarism, ethical principles, kept in community of leading scientific issues publishers. Journal's editorial policy is based upon traditional ethical principles of Russian academic periodicals; it supports Academic Periodicals Ethical Codex, stated by Committee on Publication Ethics (Russia, Moscow) and it is formed in account of standards of ethics of editors' and publishers' work confirmed by Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors and Code of Conduct for Journal Publishers, developed by Committee on Publication Ethics.

Free reproduction of the Journal's materials for personal purposes and free use for information, scientific, educational and cultural purposes is allowed in accordance with articles 1273 and 1274 of Chapter 70, part 4 of the Civil Code of the Russian Federation. Other types of use are possible only after the conclusion of relevant written agreements with the right holder.

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 – *А. Д. Карпов*
Перевод *С. В. Голованова, Н. Н. Плеханковой*
Компьютерная верстка *Е. П. Гординой*
Информационная поддержка *Р. В. Карасева*

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Подписано в печать 10.09.2020 г. Дата выхода в свет 30.09.2020 г.

Формат $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 14,95.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 250 экз. Заказ № 1115. 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 *A. D. Karpov*
Translation *S. V. Golovanov, N. N. Plekhankova*
Desktop publishing *E. P. Gordina*
Informational support *R. V. Karasev*

Distributed in Russian Federation and foreign countries.

Signed to print 10.09.2020. Date of publishing 30.09.2020.

Sheet size $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Conventional printed sheets 14,95.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 250 copies. Order no. 1115. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)