

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202002 ISSN 2658-4123 (Print), 2658-6525 (Online)

Том 30, № 2. 2020

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

16+



Vol. 30, no. 2. 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 Means of Maintenance 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 Петр Васильевич – *заместитель главного редактора*, проректор по научной работе ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-3400-7780, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru (Саранск, Россия)

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

Аллахвердиев Сурхай Рагим оглы – академик Российской Академии Естествознания, профессор кафедры лесной индустрии 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)

Шишелова 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

Сенин П. В., Раков Н. В., Смольянов А. В., Макейкин А. М. Расчетно-теоретический анализ размерных цепей при восстановлении посадочного гнезда под бурт гильзы по глубине двигателей Д-245, Д-260.....	188
Гербер Ю. Б., Гаврилов А. В., Киян Н. С. Моделирование процесса тепловой обработки жидких продуктов в пластинчатом теплообменнике с использованием комплексной энергозамещающей установки.....	200
Шараби Н. Н., Дорошенко А. А., Бутовченко А. В. Моделирование истечения семян кунжута при колебательном дозировании семян устройством с использованием DEM.....	219

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Разворотнев А. С., Гавриченков Ю. Д. Технология мониторинга и управления воздушными потоками внутри металлического силоса при хранении зерна.....	232
Тетерина О. А., Тетерин В. С., Митрофанов С. В., Костенко М. Ю., Рембалович Г. К., Новиков Н. Н. Влияние аэрозольной обработки гуминовыми препаратами на посевные качества семян зерновых культур.....	254
Астахов М. В., Славкина Е. В. Повышение стойкости к ударным воздействиям композитных узлов сельхозмашин применением упруговязкопластичных жидкостей.....	268

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Калякулин С. Ю., Кузьмин В. В., Митин Э. В., Сульдин С. П., Тюрбеева Т. Б. Синтез структуры технологических процессов.....	287
Иванов А. И., Банных А. Г. Быстрая оценка энтропии длинных кодов с зависимыми разрядами на микроконтроллерах с малым потреблением и низкой разрядностью (обзор литературы по снижению размерности задачи).....	300
Аль-Бесул Х., Аль-Салаймех С., Аль-Халайбех А., Хаджиев Н. Разработка функциональной структуры и структуры управления для компьютеризированной системы управления под влиянием факторов непосредственного окружения.....	313
Информация для авторов и читателей (на рус. яз.).....	326
Информация для авторов и читателей (на англ. яз.).....	328

CONTENTS

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

Senin P. V., Rakov N. V., Smolyanov A. V., Makeykin A. M. Theoretical Analysis of Dimension Chains when Restoring the Landing Socket for Liner Sleeve Collar in the Depth of the Engines D-245 and D-260.....	188
Gerber Yu. B., Gavrilov A. V., Kiyani N. S. Modeling the Process of Heat Treatment of Liquid Products in a Plate Heat Exchanger Using an Integrated Energy-Substituting Installation...	200
Sharaby N. N., Doroshenko A. A., Butovchenko A. V. Simulation of Sesame Seeds Outflow in Oscillating Seed Metering Device Using DEM.....	219

TECHNOLOGIES AND MEANS OF AGRICULTURAL MECHANIZATION

Razvorotnev A. S., Gavrichenkov Yu. D. Technology for Monitoring and Control of Air Flows Inside Metal Silos during Grain Storage.....	232
Teterina O. A., Teterin V. S., Mitrofanov S. V., Kostenko M. Yu., Rembalovich G. K., Novikov N. N. The Effect of Humic Aerosol Treatment on Grain Seeds Quality.....	254
Astakhov M. V., Slavkina E. V. Improving the Shock Resistance of Agricultural Composite Units Using Visco-Elastic Fluids.....	268

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

Kalyakulin S. Yu., Kuzmin V. V., Mitin E. V., Suldin S. P., Tyurbieva T. B. Synthesis of the Structure of Technological Processes.....	287
Ivanov A. I., Bannykh A. G. Rapid Estimation of the Entropy of Long Codes with Dependent Bits on Low-Power, Low-Bit Microcontrollers (Review of Literature on Reducing the Dimension of a Problem).....	300
Al Besoul K., Al Salameh S., Al Halaybeh A., Hajiyeve N. Development of the Functional and Management Structure for the Computerized Management System under the Influence of Direct Environment Factors.....	313
Information for Authors and Readers of the Journal (in Russian)	326
Information for Authors and Readers of the Journal (in English)	328

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

УДК 621.43:620.178.16

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202002.188-199



Расчетно-теоретический анализ размерных цепей при восстановлении посадочного гнезда под бурт гильзы по глубине двигателей Д-245, Д-260

П. В. Сенин*, Н. В. Раков, А. В. Смольянов,
А. М. Макейкин

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

*vice-rector-innov@adm.mrsu.ru

Введение. До 23 % всех блоков цилиндров бывших в эксплуатации двигателей Д-245, Д-260 имеют износы гнезд под бурт гильзы по глубине и подлежат выбраковке. Поэтому основной задачей исследования являлось повышение долговечности блоков цилиндров вышепредставленных двигателей за счет обработки посадочных мест в ремонтный размер с последующей установкой регулировочных шайб.

Материалы и методы. В статье для решения поставленных задач использовался метод размерного анализа. На основании данных, представленных в технической документации, произведен расчет размерных цепей при движении поршня к нижней и верхней мертвым точкам.

Результаты исследования. Благодаря проведенным исследованиям размерных цепей было установлено, что при движении поршня к нижней и верхней мертвым точкам с зазорами в соединениях, соответствующих новым агрегатам, расстояние между днищем поршня и головкой блока может составлять от 0,488 до 1,592 мм, а с зазорами, соответствующими допустимым при эксплуатации, – от –0,035 до 1,15 мм. По результатам расчетов глубина гнезда под бурт гильзы в процессе расточки должна находиться в пределах $9,4^{+0,08}_{+0,04}$ мм, то есть в интервале 9,44...9,48 мм.

Обсуждение и заключение. В результате исследования размерным анализом установлено, что допустимая величина на фрезерование привалочной плоскости блока составляет 0,35 мм, а глубина обработки бурта гильзы при установке регулировочной шайбы толщиной 0,4 мм должна составлять от 9,45 до 9,47 мм.

Ключевые слова: блок цилиндров двигателей, поверхность под бурт гильзы, износ, размерный анализ, восстановление, глубина обработки, допуск

Для цитирования: Сенин, П. В. Расчетно-теоретический анализ размерных цепей при восстановлении посадочного гнезда под бурт гильзы по глубине двигателей Д-245, Д-260 / П. В. Сенин, Н. В. Раков, А. В. Смольянов [и др.]. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202002.188-199 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 2. – С. 188–199.

© Сенин П. В., Раков Н. В., Смольянов А. В., Макейкин 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.

Theoretical Analysis of Dimension Chains when Restoring the Landing Socket for Liner Sleeve Collar in the Depth of the Engines D-245 and D-260

P. V. Senin*, N. V. Rakov, A. V. Smolyanov, A. M. Makeykin
National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

*vice-rector-innov@adm.mrsu.ru

Introduction. Up to 23% of all cylinder blocks of used engines D-245 and D-260 have worn out sockets for the liner sleeve collar in-depth and shall be discarded. The aim of the study was to increase the durability of the cylinder blocks of the mentioned above engines by processing the sockets in the repair size with the subsequent installation of adjusting washers.

Materials and Methods. In the article, the method of dimensional analysis was used to solve the problems. Based on the data presented in the technical documentation, the dimension chains were calculated when the piston moves to the lower and upper dead center.

Results. The conducted studies of dimension chains found that when the piston moves to the lower and upper dead center with gaps in the joints corresponding to the new units, the distance between the bottom of the piston and the head of the unit can be from 0.488 to 1.592 mm, and with gaps corresponding to the permissible during operation – from –0.035 to 1.15 mm. According to the results of calculations, the depth of the socket under the liner collar in the boring process should be within $9.4^{+0.08}_{-0.04}$ mm, i.e. in the range of 9.44...9.48 mm.

Discussion and Conclusion. As a result of the study, the dimensional analysis found that the permissible value for milling the block stopping plane is 0.35 mm, and the depth of the liner collar when installing the adjusting washer with a thickness of 0.4 mm shall be from 9.45 to 9.47 mm.

Keywords: cylinder block head, surface for liner sleeve collar, wear, dimensional analysis, rehabilitation, treatment depth, tolerance

For citation: Senin P.V., Rakov N.V., Smolyanov A.V., et al. Theoretical Analysis of Dimension Chains when Restoring the Landing Socket for Liner Sleeve Collar in the Depth of the Engines D-245 and D-260. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(2):188-199. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.188-199>

Введение

В процессе эксплуатации двигателей Д-245, Д-260 нередко происходит завоздушивание системы охлаждения или отрыв бурта гильзы с характерным расположением трещины – разлом начинается от радиуса под буртом и идет примерно под углом 30° вверх. Причиной данных дефектов является износ гнезд (поверхностей) под гильзы по глубине. Возникновение износов обусловлено значительными нагрузками и колебательными движениями от протекания рабочего процесса в цилиндре. Вследствие чрезмерной перегрузки машины, неправильной настройки топливной аппаратуры, некачественного

топлива, циклических температурных нагрузок и перегревов гильза получает некоторую свободу движения, приводящую к возникновению износов на буртах гильзы и блока. Это влечет за собой, в самом легком проявлении, к локальным износам посадочного места под бурт гильзы и последующему завоздушиванию системы охлаждения или же в крайнем случае к износу значительной части посадочного места под бурт гильзы и к обрыву бурта гильзы.

Обзор литературы

Исследования ряда авторов, направленные на оценку технического состояния дизельных двигателей, применяемых в сельском хозяйстве, показывают,

что вероятность износа гнезда под бурт гильзы по глубине для блоков двигателей Д-245, Д-260 составляет до 23 % [1–4].

Анализ отечественных источников научно-технической литературы показал, что достоверной информации в виде технических рекомендаций по устранению данного дефекта нет¹ [5–7]. Производители грузовых автомобилей, такие как Scania, MAN, Volvo, DAF Trucks NV, предлагают производить расточку посадочных мест под гильзу в блоке цилиндров, для чего в качестве запасных частей поставляют гильзы с увеличенными буртами, а для регулировки выступания гильзы над плоскостью блока используют медные регулировочные кольца [8–11].

В связи с этим необходимо решить ряд технологических задач.

Первая задача заключается в обосновании глубины фрезерования коробленной привалочной плоскости блока цилиндров с целью наилучшего базирования инструмента при расточке гнезда под бурт гильзы по глубине.

В случае установки регулировочного кольца целью *второй задачи* будет являться обоснование номинального размера и допуска на глубину при расточке гнезда под бурт гильзы блоков двигателей Д-245, Д-260.

Для решения данных задач применяется расчетно-теоретический анализ размерных цепей, позволяющий определять допустимые значения величин замыкающих размеров [12–15].

Материалы и методы

Решение *первой задачи* сводится к расчету размерной цепи кривошипно-шатунного механизма двигателя Д-245, представленного на рисунке 1. В размерной цепи A_Δ замыкающим звеном

является расстояние между головкой цилиндров и днищем поршня при положении его в верхней мертвой точке.

Размерная цепь A_Δ имеет в качестве замыкающего звена величину A_Δ , которая определяется из уравнения²:

$$A_\Delta^H = A_1 + A_2 + A_3 - A_4 + A_5 - A_6 + A_7 + A_8 - A_9,$$

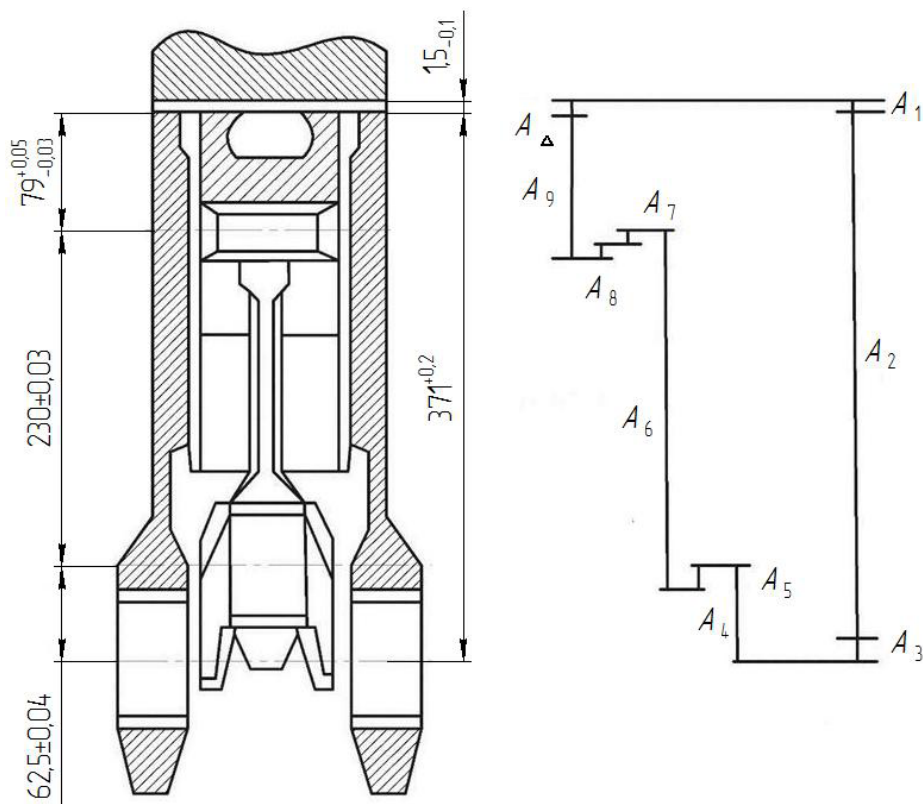
где $A_1...A_2$ – составляющие звенья (знак «–» указывает, что звенья уменьшающие; «+» – увеличивающие); A_1 – толщина прокладки, $A_1 = 1,5_{-0,1}^{+0,1}$ мм [5]; A_2 – расстояние от оси коренных опор в блоке до привалочной плоскости с головкой блока, по чертежу $A_2^H = 371_{-0,2}^{+0,2}$ мм, допустимый $A_2^D = 370,5$ мм; A_3 – зазор в сопряжении коленчатый вал – подшипник коренной, по чертежу $A_3^H = 0,126_{+0,072}^{+0,126}$ мм, допустимый $A_3^D = 0,130$ мм; A_4 – радиус кривошипа, $A_4 = 62,5 \pm 0,04$ мм; A_5 – зазор в сопряжении вкладыш шатуна – коленчатый вал, по чертежу $A_5^H = 0,115_{+0,067}^{+0,115}$ мм, допустимый $A_5^D = 0,120$ мм; A_6 – расстояние между осями отверстий верхней и нижней головок шатуна, $A_6 = 230 \pm 0,03$ мм; A_7 – зазор в сопряжении втулка шатуна – поршневой палец, по чертежу $A_7^H = 0,020_{+0,036}^{+0,020}$ мм, допустимая $A_7^D = 0,050$ мм; A_8 – зазор в сопряжении поршневой палец – бобышка поршня, $A_8 = 0,003_{+0,015}^{+0,003}$ мм; A_9 – расстояние от оси отверстия под палец до верхнего торца поршня, $A_9 = 79_{-0,03}^{+0,05}$ мм.

Номинальный размер замыкающего звена A_Δ определяется по выражению:

$$A_\Delta = \sum_{i=1}^{m-1-n} \bar{A}_i - \sum_{i=1}^n \bar{A}_i,$$

¹ Дизели Д-245.7Е2, Д-245.9Е2, Д-245.30Е2. Руководство по эксплуатации 245Е2-0000100 РЭ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.po-mmz.minsk.by/catalogue/engines/view/26/> (дата обращения: 03.04.2020).

² Там же.



Р и с. 1. Схема линейной размерной цепи кривошипно-шатунного механизма A_{Δ}
 F i g. 1. Scheme of linear dimension chain of crank-rod mechanism A_{Δ}

где m – число составляющих звеньев рабочей цепи; n – число уменьшающих звеньев; i – порядковый номер звена.

Верхнее ES и нижнее EI – отклонения замыкающего звена [12]:

$$ES_{\Delta H} = \sum_{i=1}^{m-1-n} \overline{ES}_i - \sum_{i=n}^n \overline{EI}_i, \quad (3)$$

$$EI_{\Delta H} = \sum_{i=1}^{m-1-n} \overline{EI}_i - \sum_{i=n}^n \overline{ES}_i, \quad (4)$$

где \overline{ES}_i и \overline{EI}_i – верхнее и нижнее отклонения i -го составляющего увеличивающего звена; \overline{ES}_i и \overline{EI}_i – верхнее и нижнее отклонения i -го составляющего уменьшающего звена.

Теоретически можно предположить, что в процессе работы кривошипно-шатунного механизма зазоры в сопряжениях попеременно принимают минимальные или максимальные значения. Так, при движении поршня к нижней мертвой точке величины зазоров принимают максимальные значения, а замыкающее звено A_{Δ} будет описываться выражением (1), при движении к верхней мертвой точке зазоры примут минимальные значения, а замыкающее звено A_{Δ} будет описываться выражением:

$$A_{\Delta}^B = A_1 + A_2 - A_3 - A_4 - A_5 - A_6 - A_7 - A_8 - A_9. \quad (5)$$

Рассмотрим размерную цепь кривошипно-шатунного механизма, представленную на рисунке 3, при движении поршня к нижней мертвой точке, а затем к верхней мертвой точке. В качестве составляющих звеньев примем зазоры в соответствии с заводскими предельными отклонениями (размеры по чертежу), а затем с допустимыми отклонениями при эксплуатации.

Для решения второй задачи была составлена схема линейной размерной цепи соединения блока цилиндров – гильза через регулировочную шайбу B_{Δ} . На рисунке 2 приведена схема исследуемого узла и его технологическая размерная цепь.

Компенсация растачиваемого слоя осуществляется регулировочными шайбами толщиной от 0,2 до 1,0 мм с шагом 0,1 мм. В расчетах в качестве примера используется шайба толщиной 0,4 мм. Величина глубины бурта гильзы для блоков двигателей Д-245, Д-260, установленная заводом изготовителем,

должна быть равна $B_2 = 9^{+0,07}_{-0,04}$ мм [5]. В технологической размерной цепи звенья B_1 и B_2 являются увеличивающими.

Контрольным параметром расточки служит величина выступания гильзы над поверхностью блока на величину 0,05...0,11 мм. Допускается расхождение выступания по цилиндрам на 0,04 мм. В процессе измерения гильза прижимается с усилием 10...15 Н·м.

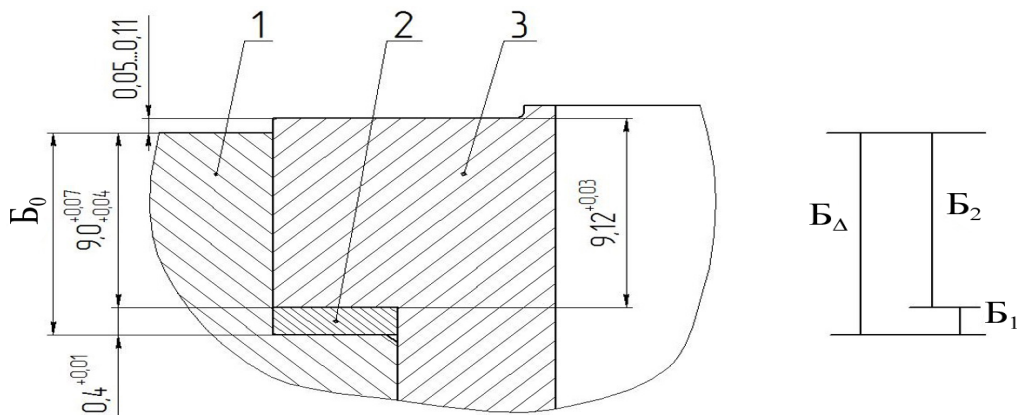
Для решения поставленной задачи прибегаем к решению размерной цепи методом обратной задачи.

Расчет производили в следующей последовательности [11; 16]:

1. Вычисление номинального размера замыкающего звена B_{Δ} :

$$B_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i B_i, \quad (6)$$

где $i = 1, 2, \dots, m$ – порядковый номер звена; ξ_i – передаточное отношение i -го звена размерной цепи; B_i – номинальный размер i -го звена размерной цепи.



Р и с. 2. Схема линейной размерной цепи соединения блока цилиндров – гильза через регулировочную шайбу B_{Δ} : 1 – блок цилиндров двигателя; 2 – компенсационная шайба; 3 – гильза цилиндров

Fig. 2. Scheme of linear dimension chain for connecting the cylinder block – liner sleeve through an adjusting washer B_{Δ} : 1 – engine block; 2 – compensation washer; 3 – cylinder liner sleeve

2. Определение координаты середины поля допуска Δ_0 замыкающего звена:

$$\Delta_0 = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta_{0_i}, \quad (7)$$

где Δ_{0_i} – координата середины допуска i -го звена размерной цепи равна:

$$\Delta_{0_i} = \frac{\Delta_{B_i} + \Delta_{H_i}}{2}, \quad (8)$$

где Δ_{B_i} и Δ_{H_i} – соответственно верхнее и нижнее предельные отклонения i -го звена размерной цепи.

3. Нахождение величины поля допуска T_0 замыкающего звена при расчете методом максимума-минимума:

$$T_0 = \sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i| T_i, \quad (9)$$

где T_i – допуск i -го звена размерной цепи, равный:

$$T_i = \Delta_{2_i} - \Delta_{H_i}. \quad (10)$$

4. Расчет предельных отклонений замыкающего звена:

$$\Delta_{2_\Delta} = \Delta_0 + \frac{T_0}{2}, \quad (11)$$

$$\Delta_{H_\Delta} = \Delta_0 - \frac{T_0}{2}. \quad (12)$$

Результаты исследования

Задача 1

Подставив числовые значения в формулу (2) или (5), найдем номинальный размер замыкающего звена A_Δ :

$$A_\Delta = 371 + 1,5 - 62,5 - 230 - 79 = 1 \text{ мм.}$$

Размерная цепь 1: размеры составляющих звеньев и зазоры соответствуют новым агрегатам, поршень движется к нижней мертвой точке, зазоры принимают максимальные значения. Схема размерной цепи представлена на рисунке 3.

В данном случае размерная цепь будет описываться уравнением (1), в этом случае звенья $A_1, A_2, A_3, A_5, A_7, A_8$ будут увеличивающимися, остальные – уменьшающимися.

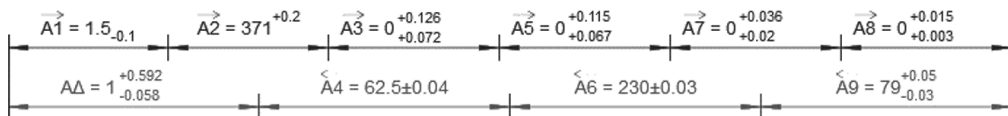
Определим верхнее $ES_{\Delta H}^H$ и нижнее $EI_{\Delta H}^H$ отклонения замыкающего звена, подставив числовые данные в формулы (3) и (4):

$$\begin{aligned} ES_{\Delta H}^H &= 0 + 0,2 + 0,126 - 0,04 + \\ &+ 0,115 - 0,03 + 0,036 + \\ &+ 0,015 - (-0,03) = +0,592 \text{ мм.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} EI_{\Delta H}^H &= -0,1 + 0 + 0,072 - (0,04) + \\ &+ 0,067 - (0,03) + 0,02 + 0,003 - \\ &- (0,05) = -0,058 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Таким образом, замыкающее звено при движении поршня к нижней мертвой точке с зазорами, соответствующими новым агрегатам, составит $A_{\Delta H}^H = 1^{+0,592}_{-0,058}$ мм, то есть зазор между днищем поршня и головкой блока должен находиться в интервале 0,942...1,592 мм.

Размерная цепь 2: размеры составляющих звеньев и зазоры соответствуют новым агрегатам, поршень движется к верхней мертвой точке, зазоры принимают минимальные значения.



Р и с. 3. Схема линейной размерной цепи A_Δ при движении поршня к нижней мертвой точке, зазоры соответствуют новым агрегатам

F i g. 3. Scheme of linear dimension chain A_Δ when the piston moves to the lower dead center, the gaps correspond to the new units

Схема размерной цепи представлена на рисунке 4.

При движении поршня к верхней мертвой точке размерная цепь будет описываться уравнением (5), в этом случае звенья A_1, A_2 будут увеличивающими, остальные – уменьшающими.

Подставив значения в формулы (3) и (4), определим верхнее $ES_{\Delta H}^B$ и нижнее $EI_{\Delta H}^B$ отклонения замыкающего звена при движении поршня вверх:

$$ES_{\Delta H}^B = 0 + 0,2 - 0,072 - 0,04 - 0,067 - 0,03 - 0,02 - 0,003 - (-0,03) = +0,138 \text{ мм},$$

$$EI_{\Delta H}^B = -0,1 + 0 - 0,126 - (0,04) - 0,115 - (0,03) - 0,036 - 0,015 - (0,05) = -0,512 \text{ мм}.$$

В данном случае замыкающее звено будет равно $ES_{\Delta H}^B = 1^{+0,138}_{-0,512}$ мм, то есть зазор между днищем поршня и головкой блока составит 0,488...1,138 мм.

Размерная цепь 3: размеры составляющих звеньев и зазоры соответствуют допустимым при эксплуатации ве-

личинам, поршень движется к нижней мертвой точке, зазоры принимают максимальные значения. Схема размерной цепи представлена на рисунке 5.

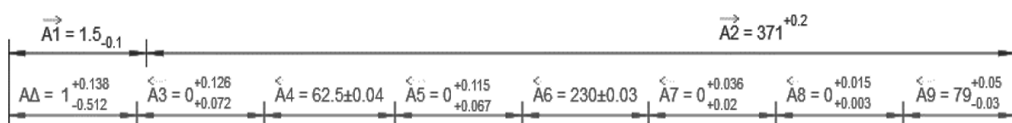
Тогда верхнее $ES_{\Delta H}^H$ и нижнее $EI_{\Delta H}^H$ отклонения замыкающего звена, согласно формулам (3) и (4), составят:

$$ES_{\Delta H}^H = 0 + 0,2 + 0,13 - 0,04 + 0,12 - 0,03 + 0,05 + 0,015 - (-0,03) = +0,615 \text{ мм},$$

$$EI_{\Delta H}^H = -0,1 + (-0,5) + 0,072 - (0,04) + 0,067 - (0,03) + 0,02 + 0,003 - (0,05) = -0,558 \text{ мм}.$$

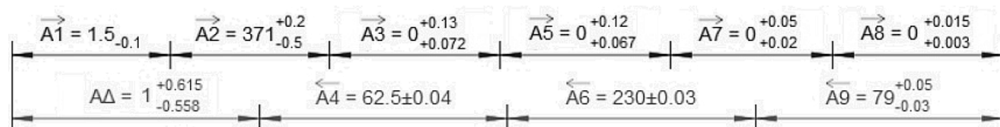
Величина замыкающего звена составит $A_{\Delta H}^H = 1^{+0,615}_{-0,558}$ мм, то есть зазор между днищем поршня и головкой блока будет принимать значения в интервале 0,442...1,615 мм.

Размерная цепь 4: размеры составляющих звеньев и зазоры соответствуют допустимым при эксплуатации величинам, поршень движется к верхней мертвой точке, зазоры принимают минимальные значения. Схема размерной цепи представлена на рисунке 6.



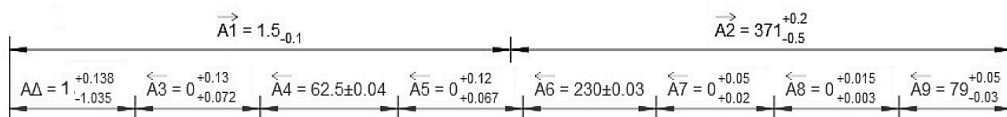
Р и с. 4. Схема линейной размерной цепи A_{Δ} при движении поршня к верхней мертвой точке, зазоры соответствуют новым агрегатам

F i g. 4. Scheme of linear dimension chain A_{Δ} when the piston moves to the upper dead center, the gaps correspond to the new units



Р и с. 5. Схема линейной размерной цепи A_{Δ} при движении поршня к нижней мертвой точке, размеры соответствуют допустимым при эксплуатации величинам

F i g. 5. Scheme of linear dimension chain A_{Δ} when the piston moves to the upper dead center, the gaps correspond to the permissible during operation



Р и с. 6. Схема линейной размерной цепи A_{Δ} при движении поршня к верхней мертвой точке, размеры соответствуют допустимым при эксплуатации величинам

F i g. 6. Scheme of the linear dimension chain A_{Δ} when the piston moves to the upper dead point, the dimensions correspond to the permissible values during operation

Верхнее ES_{Δ}^B и нижнее EI_{Δ}^B – отклонения замыкающего звена, согласно формулам (3) и (4), будут равны:

$$ES_{\Delta}^B = 0 + 0,2 - 0,072 - 0,04 - 0,067 - 0,03 - 0,02 - 0,003 - (-0,03) = +0,138 \text{ мм},$$

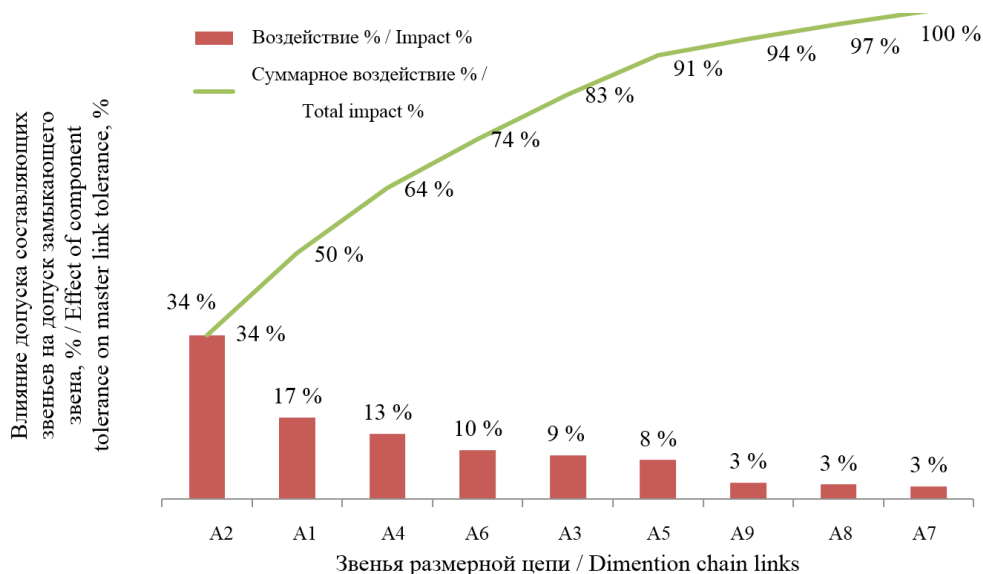
$$EI_{\Delta}^B = -0,1 + (-0,5) - 0,13 - (-0,04) - 0,12 - (0,03) - 0,05 - 0,015 - (0,05) = -1,035 \text{ мм}.$$

То есть величина замыкающего звена составит $A_{\Delta}^B = 1^{+0,138}_{-1,035}$ мм, а за-

зор между дном поршня и головкой блока должен находится в интервале от $-0,035$ до $1,138$ мм.

Оценку влияния составляющих звеньев на замыкающее звено проводили с использованием диаграммы Паретто (рис. 7).

Из рисунка 7 видно, что наибольшее влияние на допуск замыкающего звена оказывает звено A_2 – расстояние от оси коренных опор в блоке до привалочной плоскости с головкой блока. Таким образом, для исключения вероятности касания дна поршня с головкой блока предлагается ужесточить допуск на величину A_2 .



Р и с. 7. Степень влияния допусков составляющих звеньев на допуск замыкающего звена

F i g. 7. Degree of effect of component tolerances on master link tolerance

Задача 2

Подставив числовые значения в формулы (6–12), получим следующие результаты:

1. Номинальный размер замыкающего звена:

$$B_0 = 9,0 + 0,4 = 9,4 \text{ мм.}$$

2. Координаты середины полей допусков:

– составляющих звеньев:

$$\Delta_{0_1} = \frac{0 + 0,01}{2} = 0,005 \text{ мм,}$$

$$\Delta_{0_2} = \frac{0,04 + 0,07}{2} = 0,055 \text{ мм;}$$

– замыкающего звена:

$$\Delta_{0_1} = 0,005 + 0,055 = 0,06 \text{ мм.}$$

3. Допуски:

– составляющих звеньев:

$$T_1 = 0,01 - 0 = 0,01 \text{ мм,}$$

$$T_2 = 0,07 - 0,04 = 0,03 \text{ мм;}$$

– замыкающего звена:

$$T_{\Delta} = 0,01 + 0,03 = 0,04 \text{ мм.}$$

4. Предельные отклонения замыкающего звена:

$$\Delta_{B_{\Delta}} = 0,06 + \frac{0,04}{2} = 0,08 \text{ мм,}$$

$$\Delta_{H_{\Delta}} = 0,06 - \frac{0,04}{2} = 0,06 \text{ мм.}$$

По результатам расчетов глубина гнезда под бурт гильзы должна находиться в пределах $9,4^{+0,08}_{+0,04}$ мм, то есть в интервале 9,44...9,48 мм. Для исключения неблагоприятного сочетания предельных отклонений составляющих

звеньев размерной цепи назначается допуск на глубину обработки гнезда под бурт гильзы равный $9,4^{+0,07}_{+0,05}$ мм, то есть в интервале 9,45...9,47 мм.

Обсуждение и заключение

В результате проведенных исследований были сделаны следующие выводы.

1. Расстояние между днищем поршня и головкой блока цилиндров двигателей Д-245, Д-260 может находиться в интервале:

– для новых двигателей – от 0,488 до 1,592 мм;

– для двигателей, бывших в эксплуатации, но имеющих допустимые величины размеров, – от –0,035 до 1,615 мм. Данная величина выходит за пределы допуска на 0,035 мм, следовательно, с вероятностью 2,98 % произойдет касание днища поршня с головкой блока. При этом не учитываются изменения мощности, степень сжатия и другие технико-экономические показатели работы двигателя.

2. Для исключения вероятности касания днища поршня с головкой блока предлагается ужесточить допуск на высоту блока за счет увеличения расстояния от оси коренных опор в блоке до привалочной плоскости с головкой блока с допустимого размера 370,5 мм до 370,65 мм. В этом случае допуск замыкающего звена при размерах составляющих звеньев, соответствующих допустимым при эксплуатации, составит $A_{\Delta_{\text{дв}}} = 1^{+0,138}_{-0,885}$ мм, а зазор между днищем поршня и головкой блока будет находиться в интервале от 0,115 до 1,138 мм.

Таким образом, размерным анализом установлено, что допустимая величина на фрезерование привалочной плоскости блока составляет 0,35 мм.

3. Глубина обработки бурта гильзы при установке регулировочной шайбы толщиной 0,4 мм должна составлять от 9,45 до 9,47 мм.

В заключение можно отметить, что новизной результатов исследования яв-



ляются обоснованные размеры на новые ремонтные величины двигателей Д-245, Д-260, так как данную инфор-

мацию завод изготовитель не предоставляет, а она крайне необходима для ремонтных предприятий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Бурумкулов, Ф. Х.** Определение полного ресурса блока цилиндров автотракторных двигателей / Ф. Х. Бурумкулов, В. П. Лялякин, В. И. Иванов // Техника в сельском хозяйстве. – 2005. – № 4. – С. 30–33.
2. **Раков, Н. В.** Повышение долговечности блока цилиндров двигателя Д-260 / Н. В. Раков, А. В. Смольянов, П. П. Лезин // Сельский механизатор. – 2017. – № 12. – С. 44–45. – URL: <http://selmech.msk.ru/1217.html> (дата обращения: 03.04.2020). – Рез. англ.
3. **Раков, Н. В.** Оценка условий работы сопряжения отверстие – распределительный вал двигателя Д-260 / Н. В. Раков, А. В. Смольянов // Пермский аграрный вестник. – 2018. – № 4 (24). – С. 16–21. – URL: http://agrovest.psaa.ru/wp-content/uploads/2018/12/agrar_vest424.pdf (дата обращения: 03.04.2020). – Рез. англ.
4. **Денисов, А. С.** Анализ изменения технического состояния ресурсопределяющих элементов дизелей КамАЗ в процессе эксплуатации / А. С. Денисов, А. Р. Асоян, В. П. Захаров // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2011. – № 8. – С. 32–35.
5. **Денисов, В. А.** Применение ресурсосберегающих технологий для восстановления базовых деталей дизельных двигателей с аварийными дефектами / В. А. Денисов // Труды ГОСНИТИ. – 2013. – Т. 113. – С. 412–419.
6. **Мураткин, Г. В.** Повышение надежности коленчатых валов при ремонте двигателей / Г. В. Мураткин, А. А. Дятлов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2013. – № 5. – С. 25–31. – URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=1864 (дата обращения: 03.04.2020).
7. **Денисов, В. А.** Восстановление базовых деталей зарубежных двигателей с дефектами, приводящими к внезапным отказам / В. А. Денисов // Труды ГОСНИТИ. – 2013. – Т. 111, № 2. – С. 47–50. – Рез. англ.
8. **Арзамасцев, Л. И.** Ремонт блоков цилиндров автомобильных двигателей / Л. И. Арзамасцев, А. Ф. Синельников // Грузовик. – 2006. – № 2. – С. 26–36.
9. **Безбородов, И. А.** Вопросы технологической стратегии обеспечения точности сборки ДВС методом неполной взаимозаменяемости / И. А. Безбородов, А. А. Малышко // Труды ГОСНИТИ. – 2014. – Т. 114, № 1. – С. 157–161.
10. **Завороткин, Е. А.** Особенности конструкций алюминиевых блоков цилиндров современных ДВС / Е. А. Завороткин // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2010. – № 19. – С. 317–322. – Рез. англ.
11. **Сенин, П. В.** Теоретическое обоснование способов восстановления работоспособности привода клапанного механизма головки блока цилиндров / П. В. Сенин, Н. В. Раков, А. М. Макейкин. – DOI 10.15507/0236-2910.027.201702.154-168 // Вестник Мордовского университета. – 2017. – Т. 27, № 2. – С. 154–168. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/52-17-2/309-10-15507-0236-2910-027-201702-001> (дата обращения: 03.04.2020). – Рез. англ.
12. **Маренич, А. Я.** Определение допустимых и предельных величин износов деталей шатунно-поршневого механизма методом решения размерных цепей / А. Я. Маренич, А. В. Чепурин, И. Л. Маренич // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2002. – № 6. – С. 30–34.
13. **Fischer, B. R.** Mechanical Tolerance Stackup and Analysis / B. R. Fischer. – New York : Marcel Dekker, 2004. – 408 p. – ISBN10 0824753798.
14. **Pérez, R.** Concurrent Conceptual Evaluation of Tolerances' Synthesis in Mechanical Design / R. Pérez, J. Ciurana, C. Riba [et al.]. – DOI 10.1177/1063293X11406147 // Concurrent Engineering: Research and Applications. – 2011. – Vol. 19, Issue 2. – Pp. 175–186. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1063293X11406147> (дата обращения: 03.04.2020).
15. **Sivakumar, K.** Concurrent Design for Nominal and Tolerance Analysis and Allocation of Mechanical Assemblies Using DE and NSGA-II / K. Sivakumar, C. Balamurugan. – DOI 10.1504/IJMTM.2009.024618 // International Journal of Manufacturing Technology and Management (IJMTM). –

2009. – Vol. 18, Issue 1. – Pp. 15–33. – URL: <http://www.inderscience.com/offer.php?id=24618> (дата обращения: 03.04.2020).

16. **Аввакумов, В. Д.** Особенность расчета плоских размерных цепей / В. Д. Аввакумов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2015. – № 11. – С. 37–40. – URL: http://www.mashin.ru/files/2015/sb1115_web.pdf (дата обращения: 03.04.2020). – Рез. англ.

Поступила 17.10.2019; принята к публикации 20.11.2019; опубликована онлайн 30.06.2020

Об авторах:

Сенин Петр Васильевич, проректор по научной работе ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: H-1219-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru

Раков Николай Викторович, доцент 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, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3687-9371>, nikolaymgu@yandex.ru

Смолянов Алексей Викторович, доцент 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, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7852-1146>, ffenix2004@rambler.ru

Макейкин Анатолий Михайлович, преподаватель кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4629-0886>, s.f.f@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

П. В. Сенин – научное руководство, анализ и доработка текста; Н. В. Раков, А. В. Смолянов – подготовка начального текста с последующей доработкой, анализ литературных данных; А. М. Макейкин – подготовка и первичный анализ литературных данных, редактирование текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Burumkulov F.Kh., Lyalyakin V.P., Ivanov V.I. Determination of Total Cylinder Block Life of Autotractor Engines. *Tekhnika v selskom khozyaystve* = Machinery in Agriculture. 2005; (4):30-33. (In Russ.)
2. Rakov N.V., Smolyanov A.V., Lezin P.P. Increasing the Durability of Engine Block D-260. *Selskiy Mekhanizator* = Rural Mechanic. 2017; (12):44-45. Available at: <http://selmech.msk.ru/1217.html> (accessed 03.04.2020). (In Russ.)
3. Rakov N.V., Smolyanov A.V. Assessment of Operating Conditions of Hole – Camshaft Interference in the Engine D-260. *Permskiy agrarnyy vestnik* = Perm Agrarian Journal. 2018; 4(24):16-21. Available at: http://agrovest.psaa.ru/wp-content/uploads/2018/12/agrar_vest424.pdf (accessed 03.04.2020) (In Russ.)
4. Denisov A.S., Asoyan A.R., Zakharov V.P. Analysis of Changes in Technical Condition of Resource-Determining Elements of KamAZ Diesel Engines in the Process of Operation. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = News of Volgograd State Technical University. 2011; (8):32-35. (In Russ.)
5. Denisov V.A. Application of Resource-Saving Technologies for Restoration of Base Parts of Diesel Engines with Emergency Defects. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2013; 113:412-419. (In Russ.)
6. Muratkin G.V., Dyatlov A.A. Reliability Increase of Crankshafts during Engine Repair. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* = Repair. Restoration. Modernization. 2013; 5:25-31. Available at: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=1864 (accessed 03.04.2020). (In Russ.)
7. Denisov V.A. Restoration of Basic Parts of Foreign Engines with Defects Leading to Sudden Failures. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2013; 111(2):47-50. (In Russ.)



8. Arzamastsev L.I., Sinelnikov A.F. Repair of Automobile Engine Blocks. *Gruzovik* = Truck. 2006; 2:26-36. (In Russ.)
9. Bezborodov I.A., Malyshko A.A. Issues of Technological Strategy to Ensure the Accuracy of Assembly of an Internal Combustion Engine by the Method of Incomplete Interchangeability. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2014; 114(1):157-161. (In Russ.)
10. Zavorotkin Ye.A. Features of Designs of Aluminium Blocks of Cylinders of Modern Internal Combustion Engines. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = News of Saint-Petersburg State Agrarian University. 2010; (19):317-322. (In Russ.)
11. Senin P.V., Rakov N.V., Makeykin A.M. A Theoretical Basis for the Methods to Restore Working Capacity of Valve-Actuating Gear of the Cylinder Block Head. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2017; 27(2):154-168. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.027.201702.154-168>
12. Marenich A.Ya., Chepurin A.V., Marenich I.L. Definition of Admissible and Limiting Values of Wear of Details of the Connecting Rod-Piston Mechanism by a Method of the Decision of Dimensional Chains. *Remont. Vostanovlenie. Modernizatsiya* = Repair. Restoration. Modernization. 2002; 6:30-34. (In Russ.)
13. Fischer B.R. Mechanical Tolerance Stackup and Analysis. New York: Marcel Dekker; 2004. 408 p. (In Eng.)
14. Pérez R., Ciurana J., Riba C., et al. Concurrent Conceptual Evaluation of Tolerances' Synthesis in Mechanical Design. *Concurrent Engineering: Research and Applications*. 2011; 19(2):175-186. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/1063293X11406147>
15. Sivakumar K., Balamurugan C. Concurrent Design for Nominal and Tolerance Analysis and Allocation of Mechanical Assemblies Using DE and NSGA-II. *International Journal of Manufacturing Technology and Management (IJMTM)*. 2009; 18(1):15-33. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1504/IJMTM.2009.024618>
16. Avvakumov V.D. The Feature of Calculation of Flat Dimensional Chains. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii* = Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making. 2015; (11):37-40. Available at: http://www.mashin.ru/files/2015/sb1115_web.pdf (accessed 03.04.2020). (In Russ.)

Received 17.10.2019; revised 20.11.2019; published online 30.06.2020

About the authors:

Petr V. Senin, Vice-Rector for Science of National Research Mordovia State University (68 Bolshhevistskaya St., Saransk 430005, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: H-1219-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru

Nikolay V. Rakov, Associate Professor 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), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3687-9371>, nikolaymgu@yandex.ru

Alexey V. Smolyanov, Associate Professor 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), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7852-1146>, ffenix2004@rambler.ru

Anatoliy M. Makeykin, Lecturer of Technical Service Machines Chair of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4629-0886>, s.f.f@yandex.ru

Contribution of the authors:

P. V. Senin – scientific guidance, analysis and text development; N. V. Rakov, A. V. Smolyanov – preparation of the initial text with further refinement, analysis of literary data; A. M. Makeykin – preparation and initial analysis of literary data, editing of text.

All authors have read and approved the final manuscript.



Моделирование процесса тепловой обработки жидких продуктов в пластинчатом теплообменнике с использованием комплексной энергозамещающей установки

Ю. Б. Гербер*, А. В. Гаврилов, Н. С. Киян

*Академия биоресурсов и природопользования
ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского»
(пос. Аграрное, г. Симферополь, Россия)*

**gerber_1961@mail.ru*

Введение. В настоящее время актуальным является вопрос снижения затрат электроэнергии в технологиях переработки сельскохозяйственной продукции, в частности молока. В значительной мере эти затраты связаны с реализацией процессов тепловой обработки. Снижения затрат можно добиться несколькими способами, например, разработкой и применением установок, использующих солнечную энергию. В этом случае расход традиционной электрической энергии существенно снижается, но у производителей возникает задача согласования параметров установки с реальными условиями предприятия.

Материалы и методы. Анализ потребления энергии в технологиях переработки молока, режимов работы пластинчатого теплообменника, показателей работы гелиоколлекторов. Температура нагрева теплоносителя и продукта определялась с помощью приборного комплекса, позволяющего регистрировать значения температур в восьми различных контрольных точках и передавать полученные сигналы на жесткий диск портативного компьютера. Предложен метод определения параметров установки для подготовки теплоносителя в технологиях переработки молока с использованием комплексной энергозамещающей установки, которая обеспечит снижение затрат электроэнергии от 30 до 70 %.

Результаты исследования. Затраты электрической энергии на тепловые процессы могут быть снижены за счет использования энергии Солнца. Для того чтобы решить задачу оптимизации соотношения расхода теплоносителя, площади нагрева в теплообменнике и площади гелиоколлекторов энергозамещающей установки, рекомендовано использование полученных графических зависимостей, а также формул для определения площади гелиоколлекторов.

Обсуждение и заключение. Определение площади гелиоколлекторов комплексной энергозамещающей установки для реальных производственных условий возможно с помощью полученной аналитической зависимости, учитывающей взаимосвязь указанного параметра от температурного режима нагрева, площади поверхности нагрева в теплообменнике, массы обрабатываемого молока в единицу времени. Полученные графические зависимости дают возможность определить расход теплоносителя и площадь нагрева для заданных значений температуры нагрева.

Ключевые слова: гелиоколлектор, комплексная энергозамещающая установка, теплоноситель, источник энергии, поверхность нагрева, температура пастеризации, молоко, энергосбережение, теплообмен, тепловая мощность, площадь поверхности

© Гербер Ю. Б., Гаврилов А. В., Киян Н. С., 2020



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

Для цитирования: Гербер, Ю. Б. Моделирование процесса тепловой обработки жидких продуктов в пластинчатом теплообменнике с использованием комплексной энергозамещающей установки / Ю. Б. Гербер, А. В. Гаврилов, Н. С. Киян. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202002.200-218 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 2. – С. 200–218.

Modeling the Process of Heat Treatment of Liquid Products in a Plate Heat Exchanger Using an Integrated Energy-Substituting Installation

Yu. B. Gerber*, A. V. Gavrilov, N. S. Kiyan

Academy of Bioresources and Environmental Management of Vernadsky Crimean Federal University (Agrarnoye, Simferopol, Russia)

*gerber_1961@mail.ru

Introduction. Currently, the issue of reducing electrical energy consumption in the technologies of processing agricultural products, in particular, milk is topical. In large part, these costs are associated with the implementation of heat treatment processes. The reduction of electrical energy consumption can be achieved in several ways, one of which is the development and application of solar-powered installations. In this case, the consumption of traditional electrical energy is significantly reduced, but the manufactures have the task of coordinating the installation parameters and the real production conditions of enterprises.

Materials and Methods. The study examined energy consumption in milk processing technologies, plate heat exchanger operation modes and heliocollector performance indicators. The heating temperature of the coolant and the product was determined with an instrument complex that allows registering the temperature values in 8 different control points and transmitting the received signals to the personal computer hard disk. The method for defining the parameters of the plant for preparing the coolant in the technologies of milk processing with the use of a complex energy-substituting unit is proposed. The new technique provides a reduction of electric energy consumption from 30 to 70%.

Results. The consumption of electrical energy for thermal processes can be reduced by using solar energy. To solve the problem of optimizing the ratio of product consumption, heating area in the heat exchanger, the area of the solar collectors of the energy-substituting installation, it is recommended to use the obtained graphical dependencies and the formula for determining the area of the solar collectors.

Discussion and Conclusion. It is possible to determinate the area of solar collectors of complex energy-substituting installation for real production conditions through using the obtained analytical dependence taking into account the dependence the specified parameter on a temperature mode of heating, the area of a surface of heating in the heat exchanger, and weight of milk being processed per unit of time. The obtained graphical dependencies make it possible to determine the product consumption and heating area for the given heating temperature values.

Keywords: solar collector, complex energy substitution unit, heat carrier, energy source, heating surface, pasteurization temperature, milk, energy saving, heat exchange, thermal power, surface area

For citation: Gerber Yu.B., Gavrilov A.V., Kiyan N.S. Modeling the Process of Heat Treatment of Liquid Products in a Plate Heat Exchanger Using an Integrated Energy-Substituting Installation. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(2):200-218. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.200-218>

Введение

В современных условиях агропродовольственного производства все более остро становится вопрос снижения за-

трат дорогостоящих энергоносителей в технологиях переработки сельскохозяйственной продукции, в частности молока. Затраты электроэнергии для

осуществления тепловых процессов существенно повышают себестоимость готовой, в частности молочной, продукции, что снижает ее конкурентоспособность и ведет к наполнению рынка дешевой ненатуральной продукцией. Снижения затрат можно добиться как технологическими, так и техническими способами, например, разработкой и применением установок, использующих солнечную энергию. В этом случае расход традиционной электрической энергии существенно снижается. Однако в производственных условиях возникает задача определения требуемых параметров энергозамещающей установки с реальными производственными условиями предприятия.

Ранее проведенные исследования позволили сделать вывод о целесообразности использования комплексной энергозамещающей установки (КЭУ) на основе гелиоколлекторов для снижения энергетических затрат при реализации тепловых процессов в технологиях производства молочных продуктов [1–4]. Определена возможность успешного использования КЭУ для таких тепловых процессов, как пастеризация, нагрев, тепловая выдержка при производстве кисломолочной группы продуктов (кефир, творог, сметана и т. п.) [5–8; 10].

Для организации практического применения КЭУ в условиях производства возникла необходимость определения соотношения температуры

теплоносителя t_t и его расхода P_t , а также необходимой суммарной площади гелиоколлекторов F_k для реализации конкретных тепловых процессов с помощью пластинчатой теплообменной установки [9]. В лаборатории кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Академии биоресурсов и природопользования ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского» был проведен ряд экспериментов по определению параметров предложенной установки. Часть полученных результатов опубликована в открытой печати [10], в данной публикации приведены результаты исследований зависимости динамики нагрева жидкого продукта с помощью комплексной энергозамещающей установки от основных параметров теплообменной установки: расхода теплоносителя P_t и площади контакта с поверхностью нагрева F_p^1 .

Цель исследования – получить аналитическую, а также построить графоаналитическую модель процесса тепловой обработки жидкого продукта с использованием гелиосистемы, разработать методику определения необходимой площади гелиоколлекторов для нагрева заданного количества продукта в единицу времени до заданной температуры².

Обзор литературы

Изучением тепловых процессов на протяжении многих лет занимаются ученые всего мира [4–6]. Основы тепло-

¹ Реометрия пищевого сырья и продуктов: справочник / под ред. Ю. А. Мачихина. М.: Агропромиздат, 1990. 270 с.

² Ермолаев В. А., Гриценко Д., Юрченко В. В. Анализ влияния способа подвода теплоты на процесс вакуумного обезвоживания молочных продуктов // Инновации в пищевой биотехнологии: Сборник трудов Международного симпозиума / под общ. ред. А. Ю. Просекова. Кемерово: Изд-во ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 2018. С. 290–296; Козлова О. В., Тултабаева Т. Ч. Совершенствование технологии получения молочно-белковых концентратов, оценка состава и технологических свойств // Инновации в пищевой биотехнологии: Сборник трудов Международного симпозиума / под общ. ред. А. Ю. Просекова. Кемерово: Изд-во ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 2018. С. 33–44; Кригер О. В., Вэй С. Разработка поликомпонентного пробиотика на основе лактобактерий, выделенных из национальных кисломолочных продуктов // Инновации в пищевой биотехнологии: Сборник трудов Международного симпозиума / под общ. ред. А. Ю. Просекова. Кемерово: Изд-во ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 2018. С. 44–48.

обмена и прикладные задачи по тепловой обработке сельскохозяйственного сырья отражены в работах ряда исследователей [11; 12]. Вопросами оптимизации энергетических затрат в технологиях переработки сельскохозяйственной продукции занимались ученые как в нашей стране, так и за рубежом. Решение поставленной задачи предлагается в следующих основных направлениях: оптимизация технологии с целью сведения к минимуму повторности тепловой обработки [13–15]; совершенствование конструкции оборудования [16–18]; внедрение технических средств на основе использования возобновляемых источников энергии³ [19; 20]; комплексное использование традиционных и возобновляемых источников энергии⁴ [21; 22]. Предлагаемые решения технологических приемов оптимизации энергозатрат способствуют частичному решению проблемы, однако существенно повлиять на снижение затрат дорогих традиционных энергоносителей не могут [23–25]. Совершенствование конструкции оборудования при прочих положительных эффектах (повышение производительности, снижение затрат труда) также не оказывает значительного влияния на решение указанной задачи [26–28].

Обзор литературных источников демонстрирует большой интерес ис-

следователей к использованию возобновляемых источников энергии в технологических процессах, в частности аграрном производстве⁵ [29; 30].

Природно-климатические условия Крыма и юга России в значительной степени благоприятствуют развитию солнечной энергетики, поэтому ряд исследований посвящен этому вопросу применительно к Крымскому региону [31–33]. Зарубежный опыт в указанной области отражен в публикациях ученых Дании, Германии, Италии и других стран [34–37].

Совершенствованию оборудования для использования солнечной энергии и повышению коэффициента их полезного действия уделяется большое внимание в последние годы. Материал изготовления и конструктивные особенности солнечных батарей за последние пять лет претерпели серьезные изменения и позволяют ставить вопрос о широком их применении в технологических процессах агропромышленного производства⁶ [38]. Комплексное использование как традиционных, так и возобновляемых источников энергии рассмотрено в ряде работ⁷.

Проведенный обзор литературы по предлагаемой теме научных исследований дает возможность сделать заключение об экономической целесообразности применения в технологиях

³ Тлеков У. Г., Садыгова Л. А. Развитие альтернативных источников энергии в помощь решению проблем энергетики в РК // Актуальные проблемы энергетики АПКЖ: материалы VIII международной научно-практической конференции. 2017. С. 261–264.

⁴ Васильева Г. А., Троянова Е. Н. Проблемы развития альтернативных источников энергетики России // Современное инновационное общество: динамика становления, приоритеты развития, модернизация: экономические, социальные, философские, правовые, общенаучные аспекты: материалы Международной научно-практической конференции. 2015. С. 28–31.

⁵ Gabor D., Colombo U., King A. S. Beyond the Age of Waste: A Report to the Club of Rome. 2nd Ed. 2016. 258 p. URL: <https://www.elsevier.com/books/beyond-the-age-of-waste/gabor/978-0-08-027303-7> (дата обращения: 30.03.2020).

⁶ Sabarez H. T. Thermal Drying of Foods. In: Fruit Preservation. Food Engineering Series / A. Rosenthal [et al.]. New York: Springer, 2018. Pp. 181–210. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4939-3311-2_7 (дата обращения: 30.03.2020).

⁷ Альтернативные источники энергии [Электронный ресурс]. URL: <http://e-koncept.ru/2015/65324.htm> (дата обращения: 30.03.2020); Нетрадиционные возобновляемые источники энергии [Электронный ресурс]. URL: <http://www.bibliotekar.ru/alterEnergy/26.htm> (дата обращения: 30.03.2020).

переработки молока нетрадиционных источников энергии, в данном случае энергии Солнца, для сокращения затрат электрической энергии на нагрев молока [5; 12]. Большую часть затрат энергии в тепловых процессах переработки молока занимает пастеризация и нагрев (в том числе предварительный) на различных технологических этапах переработки⁸ [13–16]. Разница температур при нагреве продукта до необходимого значения обычно составляет 65...70 °С. Учитывая, что на нагрев одной тонны молока всего на один градус требуется около 1,1 кВт электроэнергии, для предоставления производственной мощностью в несколько десятков тонн несложно определить суммарные энергетические затраты, которые в конечном счете закладываются в себестоимость готового продукта⁹ [17–19].

Ранее проведенные исследования показывают, что основной причиной больших энергозатрат в технологиях переработки молока и производства молочных продуктов является температурный режим и объем теплоносителя (воды) [3]. Предварительный нагрев теплоносителя при помощи гелиоустройства и подача к тепловому аппарату, который установлен в технологической линии, дают возможность снизить расход электрической энергии различных традиционных энергоносителей и позволяют сделать производство по переработке молока менее энергозатратным [2; 8].

Выполненные на кафедре технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Академии биоресурсов и природопользования ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского» лабораторные и производственные эксперименты по применению КЭУ в южных регионах

страны для подогрева теплоносителя показали [1; 3], что КЭУ позволит снизить указанный выше интервал: при неблагоприятных погодных условиях – до 45–50 °С; при благоприятных погодных условиях (ясная солнечная погода) – до 25–30 °С [8–10].

Наиболее перспективный вариант применения энергии Солнца для обеспечения теплом технологических линий средней производительности – это система, состоящая из комбинации солнечных коллекторов, теплового котла, бака-аккумулятора [8; 14].

Основными конструктивными элементами предложенной КЭУ являются трубчатый гелиоприемник (гелиоколлектор) и бак-аккумулятор, установленные на несущей раме. Также установка имеет систему водоснабжения с теплоизоляцией и термоизмерительный комплекс. Экспериментальная КЭУ работает следующим образом. Циркуляция теплоносителя осуществляется за счет изменения его плотности по мере нагревания солнечными лучами. Нагретый теплоноситель, поступая в верхнюю часть бака-аккумулятора, вытесняет из нижней части прохладный теплоноситель. Вытесненный теплоноситель при этом перетекает по нижней части циркуляционного трубопровода в нижнюю часть гелиоколлектора, заполняя пространство. Забор нагретого теплоносителя (воды) из бака-аккумулятора осуществляется из верхней части.

Практическое применение КЭУ в условиях производства затрудняет неопределенность соотношения температуры теплоносителя t_t и его расхода P_t , а также необходимой суммарной площади гелиоколлекторов F_k для реализации конкретных тепловых процессов с помощью пластинчатой теплообмен-

⁸ **Тлеков У. Г., Садыгова Л. А.** Развитие альтернативных источников энергии в помощь решению проблем энергетики в РК.

⁹ **Васильева Г. А., Троянова Е. Н.** Проблемы развития альтернативных источников энергетики России.

ной установки. Данное соотношение по сути определяет конструктивно-режимные параметры установки для конкретных тепловых режимов, без которых нет возможности дать полноценные рекомендации производству. Обзор и анализ исследований, проведенных ранее учеными в вопросах использования теплоносителя, нагретого с помощью гелиоустановок, показал, что методика такого расчета на сегодняшний день отсутствует.

Материалы и методы

Как указано выше, на кафедре технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Академии биоресурсов и природопользования ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского» в результате проведенных многолетних исследований накоплен большой научный и производственный опыт использования КЭУ в технологиях переработки молока, послуживший основой для планирования и проведения описанных ниже экспериментов.

Определение зависимости температуры нагрева жидкости t_t в пластинчатом теплообменнике от расхода теплоносителя P_t

Для замера температуры нагреваемой воды в пастеризационной установке использовались тарированные термопары ТХА типа К измерительного восьмиканального блока «Тэра Д-ИТ-8ТП-Э3а-PST-2U», собранного по схеме, приведенной на рисунке 1.

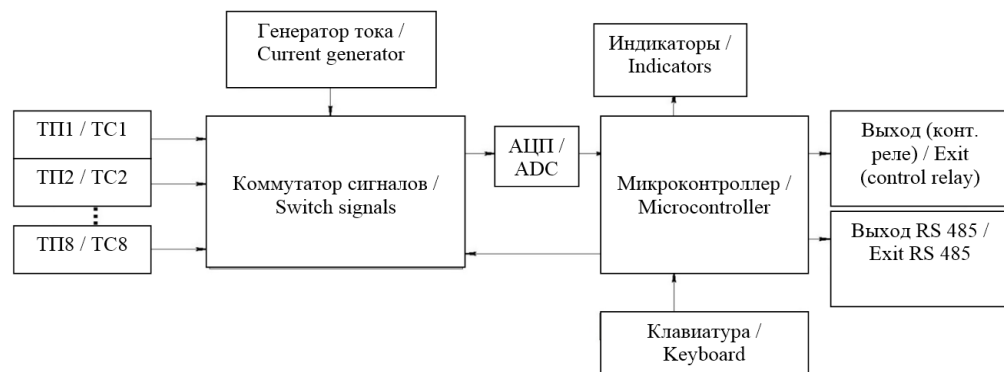
Погрешность температурного показателя по паспорту у прибора «Тэра» на термопаре $+(-)0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Значения с измерительного прибора «Тэра Д-ИТ-8ТП-Э3а-PST-2U» записывались в программе Technolog Soft.

На пластинчатый пастеризатор были установлены теплоизолированные термодатчики (рис. 2).

Для изменения расхода регулировалась подача молока в секции пастеризатора при помощи регулировочного вентиля, изменяя угол поворота. После чего на выходе замерялся расход молока.

Расход молока вычисляли следующим образом: каждый раз после того, как регулировочный вентиль устанавливался на 20° , 40° , 60° , 80° поворота, и пастеризационная установка выводилась на рабочий режим, секундомером замерялось время заполнения емкости (бидон 25 л), затем емкость взвешивалась и рассчитывался объем молока.



Р и с. 1. Обобщенная функциональная схема подключения измерительного восьмиканального блока «Тэра Д-ИТ-8ТП-Э3а-PST-2U»

F i g. 1. Generalized functional diagram of the connection of the measuring eight-channel unit Tera D-IT-8TP-E3a-RST-2U



Р и с. 2. Пастеризатор с установленными термопарами
F i g. 2. Pasteurizer with installed thermocouples

ка (V , л). После чего для каждого угла поворота рассчитывался расход P_t , л/мин:

$$P_t = \frac{V}{T},$$

где V – объем молока, л; T – время, в течение которого заполнилась емкость, мин.

Определение зависимости температуры нагрева жидкости t от площади теплообменных пластин F_p

В данном эксперименте площадь нагрева изменялась количеством установленных пластин: с рабочей установки демонтировалась часть пластин в секции пастеризации, при этом общее их количество в экспериментах составило 6, 9, 13 (рис. 3). В процессе каждого опыта пастеризационная установка выводилась на рабочий режим с заданным количеством включенных электрических нагревателей (во всех опытах число работающих нагревателей было одинаковым).

В этом режиме установка работала фиксированное время, а затем измерялась температура пастеризуемого молока.

Результаты исследования

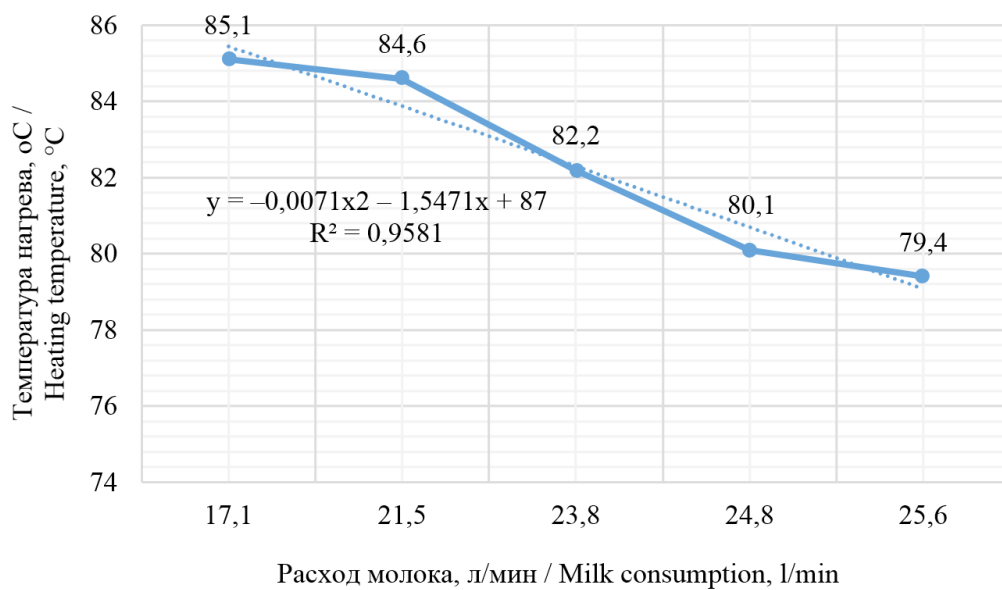
Согласно данным, полученным в результате первого эксперимента, построен график (рис. 4). Из графика видно, что увеличение расхода продукта ведет к снижению нагрева молока при прочих равных условиях, что вполне объяснимо законами термодинамики.

Динамика изменения более явно наблюдается в диапазоне значений от 21,5 до 24,5 л/мин, в дальнейшем динамика снижения замедляется. Требуемая температура пастеризации (82 °С) достигается при расходе молока 23,8 л/мин. Данный расход можно считать оптимальным для пастеризации молока при фиксированной площади теплообмена установки 2,23 м² (вариант включения всех пластин секции). Указанная температура соответствует оптимальной температуре пастеризации, например, при производ-



Р и с. 3. Пастеризатор с комплектом теплообменных пластин при проведении эксперимента

F i g. 3. Pasteurizer with a set of heat transfer plates during the experiment

Р и с. 4. График зависимости температуры нагрева t от расхода P_t F i g. 4. Graph of the dependence of heating temperature t on the flow P_t

стве функциональных кисломолочных продуктов.

Снижение расхода до отметки менее 21,5 л/мин незначительно влияет на динамику изменения температуры нагрева; аналогичная зависимость наблюдается и в области значений расхода более 25 л/мин. Учитывая нерациональность работы установки с низкой производительностью и сложностью нагрева до заданной температуры при очень высокой производительности процесса, приходим к ограничению диапазона значений расхода продукта. Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности работы пластинчатой установки данного типоразмера ($F_p = 2,23 \text{ м}^2$) в диапазоне значений расхода продукта 21,5–24,5 л/мин. Полученная зависимость также даст возможность в дальнейшем обосновать методику определения параметров теплообменной установки.

Согласно данным, полученным в ходе второго эксперимента, построен график (рис. 5).

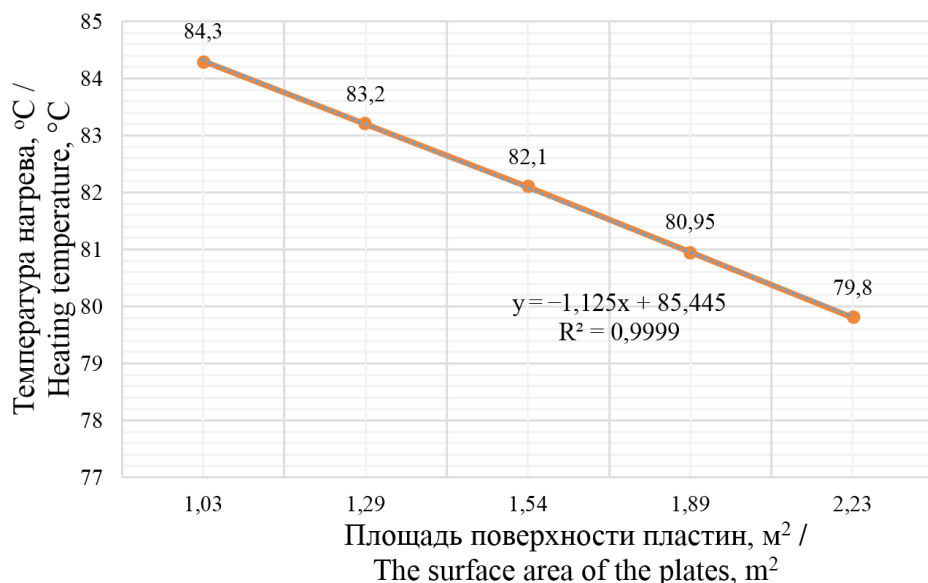
Основная задача теплообменной установки – нагрев жидкости до задан-

ной по технологии температуры за короткий период с минимальными энергетическими затратами. Априорные данные, а также проведенный эксперимент показывают зависимость температуры жидкости от указанных параметров – расхода и площади нагрева.

Для решения поставленной задачи полученные зависимости были совмещены на одном графике, на оси ординат которого расположены значения температуры нагрева.

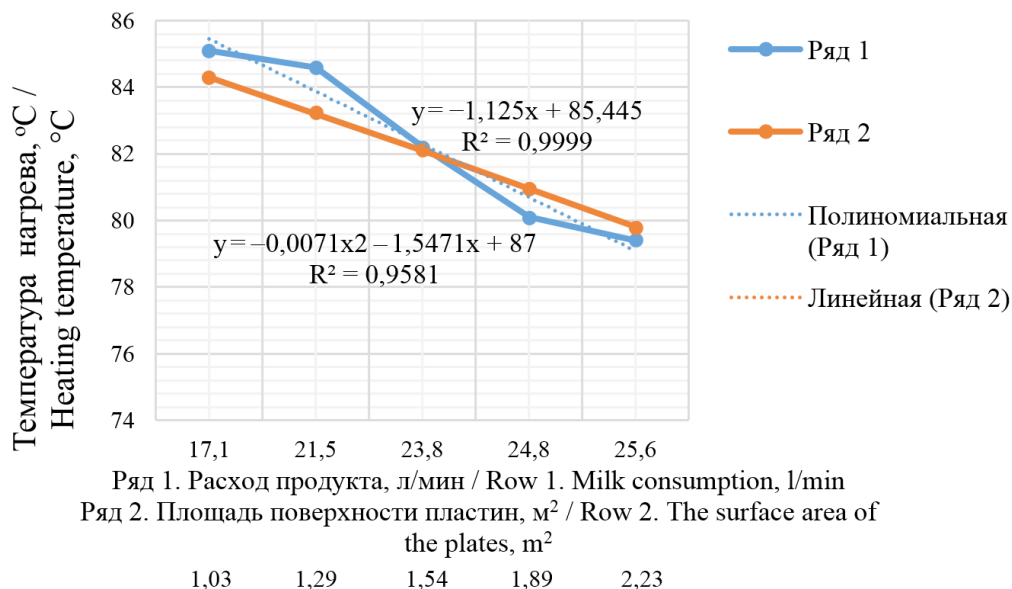
Воспользуемся полученными совмещенными графиками для решения задачи, поставленной в начале, – определения конструктивно-режимных параметров теплообменника с использованием КЭУ.

Для этого проводим на совмещенном графике линию, параллельную оси абсцисс, через точку, соответствующую температуре обработки продукта (согласно государственному стандарту или техническим условиям), до пересечения с графиками (рис. 6). Получим две точки пересечения. Опустив из точки пересечения вертикаль на ось



Р и с. 5. График зависимости температуры пастеризации от площади теплообменных пластин

F i g. 5. Graph of pasteurization temperature dependence on heat-exchange plate area



Р и с. 6. Совмещенные графические зависимости температуры нагрева продукта от расхода продукта P_t и площади поверхности теплообмена F_p

Fig. 6. Combined graphical dependencies of the product heating temperature on the flow rate of the product P_t and the surface area of heat transfer F_p

абсцисс, найдем значения параметра расхода P_t и площади поверхности нагрева F_p , соответствующие заданной температуре.

Например, для обеспечения температуры обработки продукта 80 °C расход должен составлять 24,9 л/мин, площадь контакта теплообмена 2,12 м². Таким образом, определены основные параметры работы теплообменной установки, методика позволяет определить указанные режимно-конструктивные параметры для любой температурной точки в диапазоне тепловых воздействий на молоко (нагрев, заквашивание, пастеризация).

При использовании в системе работы пластинчатого теплообменника комплексной энергозамещающей установки на основе гелиоколлекторов в методике определения конструктивно-режимных параметров возникает необходимость определения их суммарной площади. Для этого определим

суммарную тепловую мощность, создаваемую гелиосистемой.

Мощность тепловой энергии, которая генерируется поверхностью солнечного коллектора и отводится путем естественной конвекции, определяется по формуле:

$$Q_k = F_R (a \cdot \tau) \cdot v_{от} \times \times F_k \left[1 - \frac{U \cdot (T_{вх} - T_0)}{(a \cdot \tau) \cdot F_k} \right] \cdot n_k, \quad (1)$$

где F_k – площадь поглощающей поверхности гелиоколлектора; $a \cdot \tau$ – поглощающая способность гелиоколлектора (приведенная величина); F_R – коэффициент отвода теплоты; $v_{от}$ – относительная скорость (продукта и теплоносителя) в пластинчатом теплообменнике; $v_{от} = [V_{пл}] + V_T$; v_T – скорость движения теплоносителя; $v_{пл}$ – скорость продукта в секции теплообменника; T_0 и $T_{вх}$ – тем-

температуры окружающей среды и теплоносителя на входе в коллектор; U – коэффициент тепловых потерь коллектора (приведенная величина), Вт/(м²·К); n_k – количество секций коллекторов в комплексной энергозамещающей установке.

Учитывая, что не вся энергия, отводимая от коллекторов КЭУ, будет передана продукту, необходимо найти зависимость для количества теплоты, получаемой продуктом в секции пластинчатого теплообменника. Величина производительности работы секции зависит от кинематической вязкости молока и от его температуры. Для лучшего восприятия аналитической модели введем следующие обозначения:

$$U \cdot (T_{\text{вх}} - T_0) = A_{pl};$$

$$(a \cdot \tau) \cdot F_k = B_{pl}.$$

Учитывая это:

$$Q_k = F_R \cdot B_{pl} \cdot v_{\text{от}} \cdot \left[1 - \frac{A_{pl}}{B_{pl}} \right].$$

После раскрытия скобок:

$$Q_k = F_R \cdot B_{pl} \cdot v_{\text{от}} - F_R \cdot A_{pl} \cdot v_{\text{от}} \quad (2)$$

В полученном выражении общий множитель вынесем за скобки:

$$Q_k = v_{\text{от}} \cdot F_R \cdot (B_{pl} - A_{pl}). \quad (3)$$

Полученная формула применима для определения величины тепловой энергии, которая передается в какой-либо из секций установки нагреваемому объекту. Из формулы видно, что количество передаваемой теплоты пропорционально коэффициенту отвода теплоты, относительной скорости перемещения теплоносителя и потребителя тепла в секции, а также разности температур окружающего воздуха и теплоносителя.

Учитывая полученное равенство, найдем выражение для определения

площади гелиоколлекторов комплексной энергозамещающей установки в зависимости от основных режимно-конструктивных параметров процесса.

Для этого воспользуемся уравнением теплопередачи, которое объединяет количество теплоты, необходимое для нагрева продукта от начальной до конечной температуры, при которой осуществляется тепловой процесс (например, пастеризация), а также количество теплоты, которое способна сообщить поверхность теплопередачи с конкретными характеристиками.

$$F_p \cdot k_p \cdot \Delta t = E \cdot G \cdot c \cdot (t_n - t_h), \quad (4)$$

где F_p – общая площадь нагрева секции, м²; E – коэффициент регенерации, отражающий степень отбора тепла, направляемого на повторное использование; c – теплоемкость продукта, Дж/кг·К; t_n – величина температуры пастеризации, °С; t_h – начальная температура продукта, °С.

Фактически данная формула (4) может служить для решения ряда задач относительно всех как режимных, так и конструктивных параметров нагрева в теплообменнике. Найдем частный случай определения площади контакта с поверхностью нагрева F_p :

$$F_p = \frac{E \cdot G \cdot c \cdot (t_n - t_h)}{k_p \cdot \Delta t \cdot \tau}, \quad (5)$$

где G – масса продукта, кг; k_p – коэффициент теплопередачи; Δt – разность температур теплоносителя и продукта, °С; t – время контакта продукта с поверхностью теплообмена.

Приравняем выражения (3) и (4):

$$v_{\text{от}} \cdot F_R \cdot (B_{pl} - A_{pl}) \cdot U_{\text{тр}} = F_p \cdot k_p \cdot \Delta t \cdot \tau, \quad (6)$$

где $U_{\text{тр}}$ – приведенный коэффициент тепловых потерь при транспортировке теплоносителя от гелиоустановки к теплообменнику.

Процессы и машины агроинженерных систем

Опыт работы модуля КЭУ в практических условиях цеха по переработке молока Академии биоресурсов и природопользования ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского» показал высокую степень зависимости тепловых потерь от материала изготовления и состояния теплоизоляции трубопровода подачи теплоносителя.

Учитывая выражение для определения площади поверхности нагрева, полученное ранее (5), преобразуем выражение (6):

$$\begin{aligned} v_{от} \cdot F_R \cdot (B_{p1} - A_{p1}) \cdot U_{тр} = \\ = \frac{E \cdot G \cdot c \cdot (t_n - t_h)}{k_p \cdot \Delta t \cdot \tau} \cdot k_p \cdot \Delta t \cdot \tau. \end{aligned} \quad (7)$$

Учитывая общее уравнение теплопередачи (4), преобразуем правую часть формулы (7):

$$v_{от} \cdot F_R \cdot (B_{p1} - A_{p1}) \cdot U_{тр} = E \cdot G \cdot c \cdot (t_n - t_h).$$

Из полученного равенства выражим B_{p1} :

$$B_{p1} = \frac{E \cdot G \cdot c \cdot (t_n - t_h)}{v_{от} \cdot F_R \cdot U_{тр}} + A_{p1}.$$

Принимая во внимание введенное ранее обозначение $B_{p1} = (a \cdot \tau) \cdot F_k$, решим уравнение относительно площади гелиоколлекторов:

$$F_k = \frac{E \cdot G \cdot c \cdot (t_n - t_h)}{v_{от} \cdot F_R \cdot U_{тр} \cdot a \cdot \tau} + \frac{A_{p1}}{a \cdot \tau}. \quad (8)$$

Полученное выражение позволяет сделать следующие выводы:

- с повышением величины F_R снижается значение первого слагаемого уравнения (8), следовательно уменьшается величина F_k ;

- с увеличением показателя поглощающей способности гелиоколлектора $a \cdot \tau$ снижается необходимая суммарная площадь гелиоколлекторов F_k ;

- уменьшение величины F_R ведет к необходимости повышения F_k .

Обсуждение и заключение

Проведенные исследования позволили получить графическую модель зависимости температуры нагрева в пластинчатой установке от расхода теплоносителя P_T и площади поверхности теплообмена F_p в диапазоне температур тепловой обработки молока. Данные закономерности позволяют определить указанные параметры теплообменной установки для конкретного требуемого значения температуры обработки в технологии производства заданного молочного продукта. Практическая значимость указанной модели заключается в том, что появляется возможность конкретизировать значения параметров в сравнении с широким диапазоном значений, использовавшихся ранее, что в конечном итоге оптимизирует энергетические затраты на тепловую обработку.

В результате проведенных аналитических исследований получена модель для определения площади гелиоколлекторов комплексной энергозамещающей установки, работающей в системе пластинчатого теплообменника тепловой обработки молока. Полученная формула учитывает зависимость указанного параметра от температурного режима нагрева, площади поверхности нагрева в теплообменнике, массы обрабатываемого молока в единицу времени. Таким образом, полученные результаты позволяют производить расчет необходимых режимных и конструктивных параметров теплообменной установки, включающей устройство для использования солнечной энергии, минимизировать затраты электрической энергии.

Дальнейшая работа в этом направлении позволит расширить диапазон применения возобновляемых источников энергии в технологиях переработки молока, сделать процесс менее энергозатратным, а также снизить себестоимость производимой продукции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Гербер, Ю. Б.** Использование комплексного энергозамещающего устройства для переработки молока / Ю. Б. Гербер, А. В. Гаврилов, А. П. Вербицкий [и др.] // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. – 2016. – № 7 (170). – С. 52–59. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-kompleksnogo-energozameschayuschego-ustroystva-dlya-pererabotki-moloka/viewer> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
2. **Гербер, Ю. Б.** Определение параметров секции предварительного подогрева пастеризатора с использованием КЭУ / Ю. Б. Гербер, А. В. Гаврилов // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. – 2016. – № 5 (168). – С. 56–61. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-parametrov-seksii-predvaritelnogo-podogreva-pasterizatora-s-ispolzovaniem-keu> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
3. **Гербер, Ю. Б.** Использование комплексного энергозамещающего устройства в технологии производства функционального продукта «Ацидолакт» / Ю. Б. Гербер, А. В. Гаврилов, Н. С. Киян // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. – 2016. – № 6 (169). – С. 60–66. – URL: <https://e.lanbook.com/reader/journalArticle/346730/#1> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
4. **Ботвинникова, В. В.** Формирование потребительских свойств кисломолочных напитков на основе эффектов ультразвука / В. В. Ботвинникова, О. Н. Красуля. – DOI 10.14529/food150405 // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: пищевые и биотехнологии. – 2015. – Т. 3, № 4. – С. 30–40. – URL: <https://vestnik.susu.ru/food/article/view/4457> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
5. **Доровских, В. И.** Обоснование критериев оценки эффективности использования оборудования для первичной обработки молока / В. И. Доровских, Д. В. Доровских, С. Ф. Х. Альлами // Наука в центральной России. – 2016. – № 5 (23). – С. 62–69. – URL: <https://clck.ru/MjF8t> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
6. **Пасько, О. В.** Применение принципов ХАССП при разработке технологии творожного биопродукта / О. В. Пасько, Л. Г. Германская, О. В. Пензина // Аграрный вестник Урала. – 2014. – № 8 (126). – С. 34–37. – URL: <http://av.u.saca.ru/ru/issues/67/articles/1700> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
7. **Гербер, Ю. Б.** К вопросу проектирования современного молокоперерабатывающего предприятия / Ю. Б. Гербер, А. В. Гаврилов // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. – 2018. – № 15 (178). – С. 97–106. – Рез. англ.
8. **Гербер, Ю. Б.** Исследование предварительного подогрева теплоносителя комплексным энергозамещающим устройством в тепловых процессах переработки молока / Ю. Б. Гербер, А. В. Гаврилов, А. П. Вербицкий. – DOI 10.21603/2074-9414-2018-3-124-132 // Техника и технология пищевых производств. – 2018. – Т. 48, № 3. – С. 124–132. – URL: https://www.researchgate.net/publication/330879456_Thermal_Treatment_in_Milk_Processing_Using_a_Complex_Energy-Substitution_Equipment_during_Preliminary_Water_Heating (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
9. **Гербер, Ю. Б.** Энергетические показатели работы термосмешивающей системы в линии переработки молока с использованием комплексной энергозамещающей установки / Ю. Б. Гербер, А. В. Гаврилов, Н. С. Киян // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2018. – № 6 (88). – С. 65–69. – URL: <https://clck.ru/MjFzi> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
10. **Гербер, Ю. Б.** Обоснование параметров механической обработки молока при производстве кисломолочных продуктов / Ю. Б. Гербер, А. В. Гаврилов. – DOI 10.21603/2074-9414-2019-3-375-382 // Техника и технология пищевых производств. – 2019. – Т. 49, № 3. – С. 375–382. – URL: <http://fptt.ru/?page=archive&jrn=54&article=4> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.

11. **Кригер, О. В.** Разработка приемов длительного сохранения свойств молочнокислых микроорганизмов / О. В. Кригер, С. Ю. Носкова. – DOI 10.21603/2074-9414-2018-4-30-38 // Техника и технология пищевых производств. – 2018. – № 4. – С. 30–38. – URL: <http://fptt.ru/?page=archive&jrn=51&article=4> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
12. **Карпович, Э. В.** Перспективные направления использования солнечных батарей / Э. В. Карпович // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2011. – № 4. – С. 34–36. – URL: <http://www.cnsnb.ru/cnsnb/newpost/arttrn.asp?val=1182693> (дата обращения: 30.03.2020).
13. **Бобыль, А. В.** Источники развития альтернативной энергетики / А. В. Бобыль, А. Г. Забродский, В. Г. Малышкин [и др.] // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2017. – Вып. 92. – С. 31–35. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/istochniki-razvitiya-alternativnoy-energetiki> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
14. **Бровцин, В. Н.** Оптимизация параметров солнечной водонагревательной установки методом вычислительного эксперимента / В. Н. Бровцин, А. Ф. Эрк // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2013. – № 84. – С. 112–125. – URL: <https://docplayer.ru/42197151-V-n-brovcin-d-r-tehn-nauk-a-f-erk-kand-tehn-nauk.html> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
15. **Бровцин, В. Н.** Обоснование оптимальных параметров преобразователей энергии Солнца и ветра в электрическую / В. Н. Бровцин, А. Ф. Эрк // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2014. – № 85. – С. 72–84. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-optimalnyh-parametrov-preobrazovateley-energii-solntsa-i-vetra-v-elektricheskuyu> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
16. **Судаченко, В. Н.** Обоснование критерия экономической эффективности совместного использования традиционных и возобновляемых энергоисточников / В. Н. Судаченко, А. Ф. Эрк, Е. В. Тимофеев // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2017. – № 92. – С. 35–43. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-kriteriya-ekonomicheskoy-effektivnosti-sovmestnogo-ispolzovaniya-traditsionnyh-i-vozobnovlyаемых-energoistochnikov> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
17. **Марченко, О. В.** Системные исследования эффективности возобновляемых источников энергии / О. В. Марченко, С. В. Соломин // Теплоэнергетика. – 2010. – № 11. – С. 12–17.
18. **Пермяков, Э. Н.** Нетрадиционные возобновляемые источники энергии: состояние и перспективы освоения / Э. Н. Пермяков // Энергетическое строительство. – 2011. – № 12. – С. 15–21.
19. **Караева, Н. С.** Развитие альтернативных источников энергии в решении проблем энергетики / Н. С. Караева, М. А. Кариев // Вестник Кыргызского национального аграрного университета им. К. И. Скрябина. – 2014. – № 2 (31). – С. 331–335.
20. **Алексенко, С. В.** Нетрадиционная энергетика и энергоресурсосбережение / С. В. Алексенко // Инновации. Технология. Решения. – 2006. – № 3. – С. 8–41. – URL: <http://masters.donntu.org/2011/etf/korovin/library/article3/article3.htm> (дата обращения: 30.03.2020).
21. **Милованов, И. В.** Анализ современного состояния развития энергетики при использовании альтернативных источников энергии / И. В. Милованов // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 44. – С. 278–281. – URL: <https://kgau-works.kubsau.ru/issue/2013-44> (дата обращения: 30.03.2020).
22. **Свалова, В. Б.** Альтернативная энергетика: проблемы и перспективы / В. Б. Свалова // Мониторинг. Наука и технологии. – 2015. – № 3 (24). – С. 82–97. – URL: <http://csmos.ru/index.php?page=mnt-issue-2015-3-09> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
23. **Шевцова, С. В.** Анализ зарубежного опыта использования альтернативных видов энергии / С. В. Шевцова, Д. С. Жолудь // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2010. – № 6 (76). – С. 49–53. – URL: <https://clck.ru/MjNor> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.

24. **Мучинская, А. В.** Солнечная энергия в системе энергоснабжения сельскохозяйственных потребителей / А. В. Мучинская, А. Н. Синькевич // Сельскохозяйственные науки и агропромышленный комплекс на рубеже веков. – 2014. – № 8. – С. 158–161. – URL: <https://studylib.ru/doc/2102839/solnechnaya-e-nergiya-v-sisteme-e-nergiosnabzheniya> (дата обращения: 30.03.2020).

25. **Сафонов, В. А.** Тенденции, состояние, возможности, перспективы развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в республике Крым и г. Севастополь / В. А. Сафонов, А. А. Восканян // Энергетические установки и технологии. – 2017. – Т. 3, № 4. – С. 55–64. – Рез. англ.

26. **Сабанчин, В. Р.** Солнце как альтернатива традиционному топливу / В. Р. Сабанчин, А. Ф. Занина // Вестник УГУЭС. Наука. Образование. Экономика. Серия: Экономика. – 2014. – № 1 (7). – С. 201–204. – URL: <http://www.ugues.ru/files/Вестник/Vipusk-7-2014.pdf> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.

27. **Энговатова, В. В.** Перспективные направления в сфере энергосбережения и электроснабжения Крыма / В. В. Энговатова, В. И. Демин, Е. И. Овчинникова [и др.] // Научные труды КубГТУ. – 2015. – № 4. – С. 301–312. – URL: <https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0011/0392.pdf> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.

28. **Сухоручкина, Т. Ю.** Проблемы развития возобновляемых источников энергетики в России / Т. Ю. Сухоручкина, О. С. Атрашенко // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2016. – № 2 (14). – С. 40–43. – URL: <https://clck.ru/MjQ8w> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.

29. **Tepe, K.** Determination of Basic Parameters of Solar Panels / K. Tepe, K. Agbenotowossi, G. Djeteli [et al.] // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. – 2010. – Issue 2 (82). – С. 22–27. – URL: <http://naukarus.com/determination-of-basic-parameters-of-solar-panels> (дата обращения: 30.03.2020).

30. **Gladyshev, P. P.** Thin Film Solar Cells Based on CdTe and Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) Compounds / P. P. Gladyshev, S. V. Filin, A. I. Puzynin [et al.] // Journal of Physics: Conference Series: 3rd Nanotechnology International Forum (1–3 November, 2010). – Moscow, 2010. – Vol. 291.

31. **Clapp, J.** The Global Political Economy of Climate Change, Agriculture and Food Systems / J. Clapp, P. Newell, Z. W. Brent. – DOI 10.1080/03066150.2017.1381602 // The Journal of Peasant Studies – 2018. – Vol. 45, Issue 1. – Pp. 80–88. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03066150.2017.1381602?journalCode=fjps20> (дата обращения: 30.03.2020).

32. **Govindan, K.** Sustainable Consumption and Production in the Food Supply Chain: A Conceptual Framework / K. Govindan. – DOI 10.1016/j.ijpe.2017.03.003 // International Journal of Production Economics. – 2018. – Vol. 195. – Pp. 419–431. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925527317300610?via%3Dihub> (дата обращения: 30.03.2020).

33. **Cai, X.** Understanding and Managing the Food-Energy-Water Nexus – Opportunities for Water Resources Research / X. Cai, K. Wallington, M. Shafiee-Jood [et al.]. – DOI 10.1016/j.advwatres.2017.11.014 // Advances in Water Resources. – 2018. – Vol. 111. – Pp. 259–273. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0309170817304475?via%3Dihub> (дата обращения: 30.03.2020).

34. **Prosekov, A. Y.** Food Security: The Challenge of the Present / A. Y. Prosekov, S. A. Ivanova. – DOI 10.1016/j.geoforum.2018.02.030 // Geoforum. – 2018. – Vol. 91. – Pp. 73–77. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016718518300666?via%3Dihub> (дата обращения: 30.03.2020).

35. **Burdo, O.** Development of Wave Technologies to Intensify Heat and Mass Transfer Processes / O. Burdo, V. Bandura, A. Zykov [et al.]. – DOI 10.15587/1729-4061.2017.108843 // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 4, № 11 (88). – Pp. 34–42. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016718518300666?via%3Dihub> (дата обращения: 30.03.2020).

36. **Burdo, O. G.** Electrotechnologies of Targeted Energy Delivery in the Processing of Food Raw Materials / O. G. Burdo, V. N. Bandura, Y. O. Levtrinskaya. – DOI 10.3103/S1068375518020047 // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2018. – Vol. 54, Issue 2. – Pp. 210–218. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375518020047> (дата обращения: 30.03.2020).



37. **Sabarez, H. T.** Ultrasound Assisted Low Temperature Drying of Food Materials / H. T. Sabarez, S. Keuhbauch, K. Knoerzer. – DOI 10.4995/IDS2018.2018.7329 // 21st International Drying Symposium Proceedings. – 2018. – Pp. 1245–1250. – URL: https://www.researchgate.net/publication/330490810_Ultrasound_assisted_low_temperature_drying_of_food_materials (дата обращения: 30.03.2020).

38. **Kumar, C.** Microwave-Convective Drying of Food Materials: A Critical Review // C. Kumar, M. A. Karim. – DOI 10.1080/10408398.2017.1373269 // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2019. – Vol. 59, Issue 3. – Pp. 379–394. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10408398.2017.1373269?journalCode=bfsn20> (дата обращения: 30.03.2020).

Поступила 02.10.2019; принята к публикации 16.11.2019; опубликована онлайн 30.06.2020

Об авторах:

Гербер Юрий Борисович, профессор кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Академии биоресурсов и природопользования ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского» (295492, Россия, г. Симферополь, пос. Аграрное), доктор технических наук, Researcher ID: B-6690-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833>, gerber_1961@mail.ru

Гаврилов Александр Викторович, доцент кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Академии биоресурсов и природопользования ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского» (295492, Россия, г. Симферополь, пос. Аграрное), кандидат технических наук, Researcher ID: AАН-5137-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3382-0307>, tehfac@mail.ru

Киян Наталья Сергеевна, магистрант кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Академии биоресурсов и природопользования ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского» (295492, Россия, г. Симферополь, пос. Аграрное), Researcher ID: AАН-5147-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7043-8962>, natashik_1993@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Ю. Б. Гербер – общая идея, обоснование цели и задач проведения эксперимента, руководство проведением исследований; А. В. Гаврилов – техническое обеспечение проведения экспериментов, обоснование модуля гелиоколлекторов; Н. С. Киян – проведение экспериментов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Gerber Y.B., Gavrilov A.V., Verbitskiy A.P., et al. Using Integrated Energy Replacing Device for Milk Processing. *Izvestiya selskokhozyaystvennoy nauki Tavridy* = News of Taurida Agricultural Science. 2016; (7):52-59. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-kompleksnogo-energozameschayuschego-ustroystva-dlya-pererabotki-moloka/viewer> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)

2. Gerber Y.B., Gavrilov A.V. Determination of Parameters of Section of Preheat of Pasteurizer with the Use of KEU. *Izvestiya selskokhozyaystvennoy nauki Tavridy* = News of Taurida Agricultural Science. 2016; (5):56-61. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-parametrov-sektsii-predvaritel-nogo-podogreva-pasterizatora-s-ispolzovaniem-keu> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)

3. Gerber Y.B., Gavrilov A.V., Kiyani N.S. Using Integrated Energy Substituting Device in Manufacturing Technology of Functional Foods “Atsidolakt”. *Izvestiya selskokhozyaystvennoy nauki Tavridy* = News of Taurida Agricultural Science. 2016; (6):60-66. Available at: <https://e.lanbook.com/reader/journalArticle/346730/#1> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)

4. Botvinnikova V.V., Krasulya O.N. Formulation of Consumer Properties of Fermented Milk Products on the Basis of Ultrasound Exposure. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: pishchevye i biotekhnologii* = Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology. 2015; 3(4):30-40. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.14529/food150405>
5. Dorovskikh V.I., Dorovskikh D.V., Al-Lami S.F.H. Justification Criteria for Assessing the Effectiveness of Use Equipment for Primary Processing of Milk. *Nauka v Tsentralnoy Rossii* = Science in the Central Russia. 2016; (5):62-69. Available at: <https://clck.ru/MjF8t> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)
6. Pasko O.V., Germanskaya L.G., Penzina O.V. Quality Management of the Cottage Cheese Bioproduct with Use of the HASSP Principles. *Agrarnyy Vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals. 2014; (8):34-37. Available at: <http://avu.usaca.ru/ru/issues/67/articles/1700> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)
7. Gerber Y.B., Gavrilov A.V. To the Question of Designing a Modern Dairy Processing Plant. *Izvestiya sel'skokhozyaystvennoy nauki Tavridy* = News of Taurida Agricultural Science. 2018; (15):97-106. (In Russ.)
8. Gerber Yu.B., Gavrilov A.V., Verbitsky A.P. Thermal Treatment in Milk Processing: Using a Complex Energy-Substitution Equipment during Preliminary Water Heating. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* = Food Processing: Techniques and Technology. 2018; 48(3):124-132. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-3-124-132>
9. Gerber Yu.B., Gavrilov A.V., Kiyan N.S. Energy Indicators of Thermo-Mixing System Operation in a Milk Processing Line with the Use of a Complex Energy-Substituting Installation. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V. P. Goryachkina"* = Moscow Goryachkin Agroengineering University Bulletin. 2018; (6):65-69. Available at: <https://clck.ru/MjFzi> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)
10. Gerber Yu.B., Gavrilov A.V. Machine Processing of Milk in Dairy Production. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* = Food Processing: Techniques and Technology. 2019; 49(3):375-382. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-3-375-382>
11. Kriger O.V., Noskova S.Yu. Properties of Lactic Acid Microorganisms: Long-Term Preservation Methods. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* = Food Processing: Techniques and Technology. 2018; (4):30-38. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-4-30-38>
12. Karpovich E.V. Prospective Uses of Solar Panels. *Selskokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont* = Agricultural Machinery: Maintenance and Repair. 2011; (4):34-36. Available at: <http://www.cnsnb.ru/cnsnb/newpost/arttrn.asp?val=1182693> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)
13. Bobyl A.V., Zabrodskii A.G., Malyshev V.G., et al. Sources of Alternative Energy Development. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktov rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanized Crop and Livestock Production. 2017; (92):31-35. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/istochniki-razvitiya-alternativnoy-energetiki> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)
14. Brovtin V.N., Erk A.F. Optimization of Parameters of a Solar Water Heating Installation through Computational Experiment. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktov rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanized Crop and Livestock Production. 2013; (84):112-125. Available at: <https://docplayer.ru/42197151-V-n-brovcin-d-r-tehn-nauk-a-f-erk-kand-tehn-nauk.html> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)
15. Brovtin V.N., Erk A.F. Substantiation of Optimal Parameters of Solar and Wind Energy Converters into Electricity. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktov rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanized Crop and Livestock Production. 2014; (85):72-84. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-optimalnyh-parametrov-preobrazovateley-energii-solntsa-i-vetra-v-elektricheskuyu> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)

16. Sudachenko V.N., Erk A.F., Timofeev E.V. Justification Criterion of Economic Efficiency of Joint Use of Traditional and Renewable Energy Sources. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktov rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanized Crop and Livestock Production. 2017; (92):35-43. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-kriteriya-ekonomicheskoy-effektivnosti-sovmestnogo-ispolzovaniya-traditsionnyh-i-vozobnovlyaemyh-energoistoknikov> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)
17. Marchenko O.V., Solomin S.V. Systemic Studies of Renewable Energy Efficiency. *Teploenergetika* = Heat Power Engineering. 2010; (11):12-17. (In Russ.)
18. Permyakov E.N. Unconventional Renewable Energy Sources: Status and Prospects for Development. *Energeticheskoe stroitelstvo* = Energy Construction. 2011; (12):15-21. (In Russ.)
19. Karaeva N.S., Kariev M.A. Development of Alternative Energy Sources in Solving Energy Problems. *Vestnik Kyrgyzskogo natsionalnogo agrarnogo universiteta im. K. I. Skryabina* = Bulletin of the Skryabin Kyrgyz National Agricultural University. 2014; (2):331-335. (In Russ.)
20. Alekseenko S.V. Unconventional Energy and Energy Saving. *Innovatsii. Tekhnologiya. Resheniya* = Innovation. Technology. Solutions. 2006; (3):8-41. Available at: <http://masters.donntu.org/2011/etf/korovin/library/article3/article3.htm> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)
21. Milovanov I.V. Analysis of the Current State of the Energy Sector Development Using Alternative Energy Sources. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Works of the Kuban State Agrarian University. 2013; (44):278-281. Available at: <https://kgau-works.kubsau.ru/issue/2013-44> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)
22. Svalova V.B. Alternative Energy: Challenges and Prospects. *Monitoring. Nauka i tekhnologii* = Monitoring. Science and Technology. 2015; (3):82-97. Available at: <http://csmos.ru/index.php?page=mnt-issue-2015-3-09> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)
23. Shevcova S.V., Zholid D.S. Analysis of Foreign Experience of the Use of Alternative Types of Energy. *Energobezbezhenie. Energetika. Ergoaudit* = Energy Saving. Power Engineering. Energy Audit. 2010; (6):49-53. Available at: <https://clck.ru/MjNor> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)
24. Muchinskaya A.V., Sinkevich A.N. Solar Energy in the Energy Supply System for Agricultural Consumers. *Selskokhozyaystvennye nauki i agropromyshlennyy kompleks na rubezhe vekov* = Agricultural Sciences and Agro-Industrial Complex at the Turn of the Century. 2014; (8):158-161. Available at: <https://studylib.ru/doc/2102839/solnechnaya-e-nergiya-v-sisteme-e-nergosnabzheniya> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)
25. Safonov V.A., Voskanyan A.A. Trends, Status, Opportunities, Perspectives of Development in Renewable Energy Sources (V) in the Republic of Crimea and Sevastopol. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii* = Power Plants and Technologies. 2017; 3(4):55-64. (In Russ.)
26. Sabanchin V.R., Zanina A.F. Sun as an Alternative to Traditional Fuel. *Vestnik UGUES. Nauka. Obrazovanie. Ekonomika. Seriya: Ekonomika* = Bulletin of USUES. Science. Education. Economy. Series: Economy. 2014; (1):201-204. Available at: <http://www.ugues.ru/files/Вестник/Vipusk-7-2014.pdf> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)
27. Engovatova V.V., Demin V.I., Ovchinnikova E.I., et al. Future Directions in the Field of Energy and Power of Crimea. *Nauchnye trudy KubGTU* = Scientific Works of Kuban State Technical University. 2015; (4):301-312. Available at: <https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0011/0392.pdf> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)
28. Suhoruchkina T.Y., Atrasenko O.S. Problems of Development of Renewable Energy in Russia. *Energo- i resursobezbezhenie: Promyshlennost u transport* = Energy and Resource Saving: Industry and Transport. 2016; (2):40-43. Available at: <https://clck.ru/MjQ8w> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)
29. Tepe K., Agbenotowossi K., Djeteli G., et al. Determination of Basic Parameters of Solar Panels. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*. 2010; (2):22-27. Available at: <http://naukarus.com/determination-of-basic-parameters-of-solar-panels> (accessed 30.03.2020). (In Eng.)
30. Gladyshev P.P., Filin S.V., Puzynin A.I., et al. Thin Film Solar Cells Based on CdTe and Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) Compounds. In: *Journal of Physics: Conference Series: 3rd Nanotechnology International Forum* (1-3 November, 2010). Moscow; 2010. Vol. 291. (In Eng.)

31. Clapp J., Newell P., Brent Z.W. The Global Political Economy of Climate Change, Agriculture and Food Systems. *The Journal of Peasant Studies*. 2018; 45(1):80-88. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/03066150.2017.1381602>
32. Govindan K. Sustainable Consumption and Production in the Food Supply Chain: A Conceptual Framework. *International Journal of Production Economics*. 2018; 195:419-431. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.003>
33. Cai X., Wallington K., Shafiee-Jood M., et al. Understanding and Managing the Food-Energy-Water Nexus – Opportunities for Water Resources Research. *Advances in Water Resources*. 2018; 111:259-273. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.11.014>
34. Prosekov A.Y., Ivanova S.A. Food Security: The Challenge of the Present. *Geoforum*. 2018; 91:73-77. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.02.030>
35. Burdo O., Bandura V., Zykov A., et al. Development of Wave Technologies to Intensify Heat and Mass Transfer Processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017; 4(11):34-42. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108843>
36. Burdo O.G., Bandura V.N., Levtrinskaya Y.O. Electrotechnologies of Targeted Energy Delivery in the Processing of Food Raw Materials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2018; 54(2):210-218. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375518020047>
37. Sabarez H.T., Keuhbauch S., Knoerzer K. Ultrasound Assisted Low Temperature Drying of Food Materials. In: 21st International Drying Symposium Proceedings; 2018. Pp. 1245-1250. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4995/IDS2018.2018.7329>
38. Kumar C., Karim M.A. Microwave-Convective Drying of Food Materials: A Critical Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2019; 59(3):379-394. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1373269>

Received 02.10.2019; revised 16.11.2019; published online 30.06.2020

About the authors:

Yuriy B. Gerber, Professor of Chair of Technology and Equipment for Production and Processing of Animal Products, Academy of Bioresources and Environmental Management of Vernadsky Crimean Federal University (Agrarnoye, Simferopol 295492, Russia), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: B-6690-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833>, gerber_1961@mail.ru

Aleksandr V. Gavrilov, Associate Professor of Chair of Technology and Equipment for Production and Processing of Animal Products, Academy of Bioresources and Environmental Management of Vernadsky Crimean Federal University (Agrarnoye, Simferopol 295492, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: AAH-5137-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3382-0307>, tehfac@mail.ru

Natalya S. Kiyan, Postgraduate of Chair of Technology and Equipment for Production and Processing of Animal Products, Academy of Bioresources and Environmental Management of Vernadsky Crimean Federal University (Agrarnoye, Simferopol 295492, Russia), Researcher ID: AAH-5147-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7043-8962>, natashik_1993@mail.ru

Contribution of the authors:

Yu. B. Gerber – general idea, formulation of the purpose and objectives of the experiment, management of the studies; A. V. Gavrilov – technical support for the experiments, justification of the heliocollector module; N. S. Kiyan – conducting experiments.

All authors have read and approved the final manuscript.



Simulation of Sesame Seeds Outflow in Oscillating Seed Metering Device Using DEM

N. N. Sharaby^{a,b*}, A. A. Doroshenko^b, A. V. Butovchenko^b

^a*Kafrelsheikh University (Kafr el-Sheikh, Egypt)*

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

**noureldin_sharaby@agr.kfs.edu.eg*

Introduction. Sesame crop is one of the most important export crops in many countries around the world, especially in Africa. To meet the agricultural requirement of precision planting, various types of precision seed planters have been developed. Numerous studies were carried out to study the optimisation of the parameters of the precision planting. One of these parameters, affecting the quality of the precision seeder, is the grain outflow from the seed metering device.

Materials and Methods. In order to maintain good continuous performance of an oscillating seeder, it is important to monitor seed flow in real-time and adjust oscillation parameters automatically. Existing research methods, such as prototyping and monitoring the process using a high-speed camera, by reason of the random movement of particles, do not allow obtaining sufficient data to understand trajectories and velocities of particles and existing equations for particle motion when simulating the sowing process do not allow taking into account the interaction of particles that having various shapes, rolling and sliding friction coefficients, and the elastic modulus of particle materials and a working body. In this study, the outflow rate of sesame seeds in an oscillating seed metering device was modeled using the simulation method based on the discrete element method. The aim of this study is to create a simulation model of an oscillating-type sowing planter using the sowing sesame seeds as an example for evaluating the effectiveness of this model, and the possibility of further optimization and prediction of sowing seeds with this device.

Results. The analysis of the results showed that during the simulation, the sowing rate of sesame seeds when leaving the oscillating seed metering holes has significant differences in number and direction. The results of the modeling process in this study showed that when opening a hole in the oscillating seeder, a number of sesame seeds from 0 to 4 were coming out of it. The resulting model allows monitoring the behavior of each particle of a sesame seed, analyzing its trajectory, speed, and forces acting on it at any one time, and varying the parameters to obtain the dependence of uneven seeding on the kinematic and geometric parameters of the device.

Discussion and Conclusion. The obtained simulation results provide an effective method for predicting the consumption of sesame seeds from the oscillating seed meter, which serves as the basis for optimizing the kinematic and geometric parameters of the oscillating sowing device in order to increase its efficiency. This model is universal and can be adapted to sow other crops.

Keywords: discrete element method, sesame seeds, oscillating seed metering, precision seeder, seeds motion

For citation: Sharaby N.N., Doroshenko A.A., Butovchenko A.V. Simulation of Sesame Seeds Outflow in Oscillating Seed Metering Device Using DEM. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(2):219-231. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.219-231>

Моделирование истечения семян кунжута при колебательном дозировании семян устройством с использованием DEM

Н. Н. Шараби^{1,2*}, А. А. Дорошенко², А. В. Бутовченко²

¹ Университет Кафр-эль-Шейха (г. Кафр-эль-Шейх, Египет)

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

*noureldin_sharaby@agr.kfs.edu.eg

Введение. Кунжутная культура является одной из самых важных экспортных культур во многих странах мира, особенно в Африке. Чтобы удовлетворить сельскохозяйственные требования точного посева, были разработаны различные типы сеялок. Проведены численные исследования по изучению оптимизации параметров прецизионного посева. Одним из таких параметров, влияющих на качество работы прецизионной сеялки, является истечение зерна из дозатора семян.

Материалы и методы. Чтобы поддерживать хорошие непрерывные рабочие характеристики в колеблющейся сеялке, важно следить за расходом семян в режиме реального времени и автоматически регулировать колебательные параметры. Существующие методы исследования, такие как создание прототипа и наблюдение за процессом с использованием скоростной съемки, из-за хаотичного движения частиц не позволяют получить достаточное количество данных для понимания траектории и скорости перемещения частиц (существующие уравнения движения частиц при моделировании процесса посева не позволяют учесть взаимодействие частиц, имеющих различные формы), коэффициенты трения качения и скольжения, модули упругости материалов частиц и рабочего органа. В этом исследовании поток семян кунжута в колеблющейся сеялке точного посева был воссоздан с использованием метода имитационного моделирования метода дискретных элементов. Целью исследования являлось создание имитационной модели высевающего аппарата вибрационного типа на примере посева семян кунжута и последующей оценки эффективности его модели, а также возможности дальнейшей оптимизации и прогнозирования посева семян этим аппаратом.

Результаты исследования. Анализ результатов показал, что во время моделирования скорость посева семян кунжута при выходе из отверстия имеет существенные различия по величине и направлению. Приведенные в статье результаты показывают, что при открытии отверстия в высевающем аппарате из него выходит от нуля до четырех семян. Полученная модель позволяет проводить наблюдения за поведением каждой частицы семени кунжута, проводить анализ ее траектории, скорости движения и сил, действующих на нее в любой момент времени, а также при варьировании параметров получать зависимости неравномерности посева от кинематических и геометрических параметров работы устройства.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты имитационного моделирования обеспечивают эффективный метод прогнозирования расхода семян кунжута в колеблющемся дозаторе семян, что служит основой для оптимизации кинематических и геометрических параметров работы вибрационного высевающего аппарата с целью повышения эффективности его работы. Данная модель является универсальной и может быть адаптирована к посеву других сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: метод дискретных элементов, семена кунжута, колебательный дозатор семян, прецизионная сеялка, движение семян

Для цитирования: Шараби, Н. Н. Моделирование истечения семян кунжута при колебательном дозировании семян устройством с использованием DEM / Н. Н. Шараби, А. А. Дорошенко, А. В. Бутовченко. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202002.219-231 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 2. – С. 219–231.

Introduction

Sesame crop is one of the oldest oil-producing crops around the world which has a high ability to adapt to tropical and semi-tropical regions. Sesame seeds are widely involved in making healthy foods, which is increasingly in demand significantly nowadays, moreover, they have positive effects on human health because of their content of nutrients, antioxidants, minerals, and vitamins. The annual global consumption of oils and edible fats are about 120 million (MT) [1]. Sesame seeds are a rich source of protein such as soybeans, which makes them a high nutritional and healthy value¹.

There is a major difference for production both sesame seeds and sesame oil from one region to another around the world, however, despite the rise of sesame production in Asia and Africa compared to Europe as showed in Table 1². The low cultivated area and production of the sesame seeds in numerous countries are due to some fundamental factor such as usually grown in less fertile soils, low labor and lack of nutrient management properly. Furthermore, using the traditional methods of sowing sesame seeds such as hand planting, and limited use of mechanically planting such as row planter is one of the major causes for low yields.

Sesame seeds are sown or planted manually via hand or mechanically using different methods such as hand-operated seeder or tractor – operated seed drills as well as a precision planter. While precision sowing for sesame seeds is the best method between different sowing techniques compared with other methods, as it is used for accurately place single seeds or groups of seed almost equidistant apart along a furrow, however, using precision planting for sowing sesame seeds is still limited compared to other crops like cereals [2].

Literature Review

The planting distance for sesame varies according to the seed varieties, for example, the recommended planting distance for sesame in is 10–20 cm between plants in the same row and 40–60 cm between rows according to sesame varieties. Generally, planters may contain a central hopper for whole rows or individual hopper for each row, which contain the seeds and transported them downwards to the seed metering device, and then the seeds fall into the seed delivery tube that conveys the seeds into the seedbed. The seed metering device aims to keep the seed spacing uniformity along the row and between rows or is restricted to transfer seeds from the seed hopper and deposit it into the seed delivery tube, therefore,

Table 1

The production output of sesame seed and oil around the world

Region	Sesame seed (million tons)	Sesame oil (million tons)	Total production (tons)
Asia	2.1800	0.809	2.9890
Africa	0.8090	1.337	2.1460
America	0.1760	0.023	0.1990
Australia	0	0.002	0.0020
Europe	0.0014	0.031	0.0324

Source: FAO 2012

¹ Onyibe J.E., Tologbonshe E.B., Ubi E.O. Beniseed Production and Utilisation in Nigeria. Extension Bulletin No. 154. Zaria: Ahmadu Bello University. 25 p.

² Food and Agriculture Organization (FAO). Available at: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (accessed 26.03.2020). (In Eng.)

its performance affects the uniformity of seed distribution directly. The cultivation of sesame seeds using the row planter helps to maintain equal planting spacing within and between rows to enhance production and give high yield. There is no widespread use of sesame seeds planter in many countries around the world, where there are few and limited in the form of partnerships programs between international and local organizations in some countries that producing sesame seeds as is the case in Ethiopia for developing prototypes and local made row sesame seeds planter for small-scale farmers (The programme on Integrated Seed Sector Development – ISSD)³. While for large-scale farmers, as in one of the sesame cultivation programs in northwest Ethiopia supported by the Sesame Business Network (SBN) in collaboration with some Ethiopian agricultural institutions⁴.

Based on the research studies conducted on the sesame crop, it is necessary to overcome the challenges that stand in the way of increasing the sesame yield and quality, which is a major export crop in many countries. In addition to the interest in the utilization and development of sowing or planting sesame seeds technologies on the rows while keeping the equal distances between the seeds along the row and between the rows using a precision seed planter, which saves time, costs, reduce the seeds used in agriculture as well as improving the sesame production. Sesame seeds have an irregular shape, thus existing mechanical metering devices cannot meet its precision seeding, and damaged seeds are a critical problem. Therefore, pneumatic metering technology has been widely developed for precision seeding because its high accuracy and maintaining the integrity of the seeds from damage at

great operating speeds, but it needs high power requirements [3; 4]. The objective of this paper is to simulate the process of sesame seeds being fed into oscillating seed metering model for precision seed distribution, which is considered as a low-cost planting seeder with minimum power requirement for operation. Then, according to the monitoring results, the unit will be developed to achieve the uniformity of seed distribution for sesame seeds.

Precision seed metering unit

Seed metering device is used for transfer seeds from the seed box and deposit it into the delivery system that conveys the seeds into the seedbed. The aim of seed planting using precision planter is to achieve precise seed distribution within the row. The achievement of the set seed spacing majorly depends on the machine technical variables such as the type of seed meters, the planter forward speed, overall gear ratio between drive wheel and seed rotor, seed meter drive and to some extent on seed quality [5]. The good design of a seed metering unit is necessary for satisfactory performance of any precision planter. The assessment of distance between plants and seed rate as provided by the planters is also important in analyzing its performance. Therefore, seed meter is the most important part on planter and its performance affects the uniformity of seed distribution directly [6]. There are two kind of seed metering technology: pneumatic metering technology and mechanical metering technology.

Analysis of the monitoring seeds rate method

The rate of seeds outflow that come out from seed metering unit can be determined experimentally. One of the methods is to observe and measuring seeds population uniformity in the real-time using

³ Walsh S., Thijssen M.H. Programme on Integrated Seed Sector Development in Ethiopia. 2015 Annual report. Wageningen UR: Centre for Development Innovation; 2016. 48 p. Available at: <https://edepot.wur.nl/395911> (accessed 26.03.2020). (In Eng.)

⁴ Sesame Business Network Newsletter. April 2015. Issue 6. 8 p. Available at: https://agriprofocus.com/upload/post/Issue_6_April_2015_English1443299081.pdf (accessed 26.03.2020). (In Eng.)

different types of seeds sensor (Optoelectronic sensors, Radio waves sensors) are widely used because of their low cost and high accuracy. Optoelectronic sensors can be installed in different positions along the seed tube; input, middle or output of the seed tube, and widely used because of their low cost and high accuracy. The sensor detects each grain and sends it to the seed controller display⁵. Optical sensors utilize light beams so they have some big problems as; count seeds and dust in field during planting because they can't tell the difference between dust and seed, doubles look like singles, the problem of dust coating the sensor eyes and failing all together. To solve these problems, high-frequency radio waves sensor is used which developed by Precision Planting Inc. to monitor seed mass instead of seed shape to avoid the influence and interference of dust during planting process⁶. Radio wave sensor uses high-frequency waves to look at dropping seeds from different angle. This gives the sensor to distinguish a single seed from a double, dust or from any other material because they all register a different mass. Therefore, in recent years, numerous authors have used the Discrete Element Method (DEM) to simulate the motion of grain materials and analyze flow rate of many different types of seeds from the seed metering unit. Where the application of numerical simulations provides a feasible alternative to physical experiments and plays an important role in various industrial applications. The Discrete Element Method was recognized to be a numerical tool for simulating grain material after the publication of the Cundall and Strack [7].

Materials and Methods

Oscillating seed metering unit

Oscillating seed metering device has numerous benefits and far ranging com-

pared to mechanical metering technology and pneumatic metering technology, and as a result, it simplifies maintenance as there are no longer drive chains, no driven by ground wheel, no drive shafts, no clutches and sprockets system as in mechanical seed metering devices. In addition, high accuracy planting cannot be occurred for traditional seed metering precision planters due to the sliding of ground wheel and chain vibration, especially at high forward speeds. In addition, it does not contain a pneumatic system which consists of a fan installation for solid fertiliser and a vacuum system with fan for single grain metering as in pneumatic seed metering devices, Hence the power requirement is less.

The structure of the oscillating seed metering system was shown in Figure 1. In the design of the oscillating seed metering device, the input of seeds is made passively, by filling from the hopper and deposit into the oscillating seed metering system that transmit the seeds by an oscillating movement to the soil through seed tubes after they left the holes. It is simple in design as it didn't need to require additional power consumption and hasn't impact on the damage of grain material. The necessary condition for improving the continuous working performance of an oscillating seeder is that the seeds should be uniformly discharged during falling into the seed delivery tube to the soil surface because this can maintain equal spacing between the seeds along the furrow.

Results

The flow rate of sesame seeds from seed metering device can be predicted using DEM, which includes a set of physical, mathematical and numerical methods designated to calculate outflow processes characteristics. To obtain the most realistic calculation, software systems enable to

⁵ Horsh. Planting and Seeding. Available at: <https://www.horsch.com/us/products/planting-and-seeding> (accessed 26.03.2020). (In Eng.)

⁶ WaveVision. Available at: <https://www.precisionplanting.com/products/product/wavevision> (accessed 26.03.2020). (In Eng.)

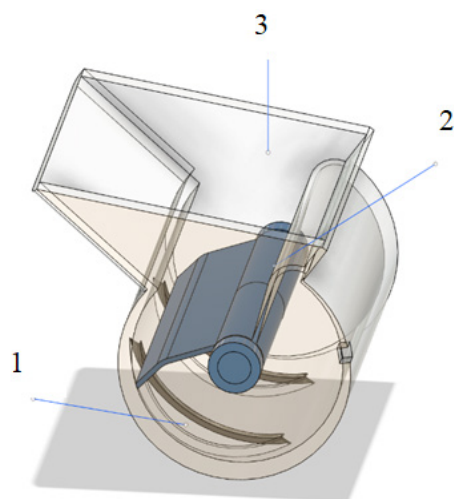


Fig. 1. The general view of the oscillating seed metering unit:
1 – hole; 2 – oscillating seed meter; 3 – hopper

simulate heterogeneous bulk medium having properties as close as possible to the original. EDEM Simulation was chosen as a software package for further calculations.

DEM simulations

DEM is a discontinuous numerical method for analyzing the dynamic behavior of the granular materials at particle interaction level and its use is becoming more popular [8]. In the DEM, Newton's second law of motion and Euler's dynamics equation are usually used to describe the translational and rotational movements of each material and particulate assemblies and uses a contact law to resolve contact forces. The overall system behaviour is determined as a result of individual material interactions [9; 10]. It has been successfully applied to the process simulation in agriculture [11–14] as well as DEM has been used in several analyses to study particle dispersion mechanisms in many agricultural machines as in seed feeding device [15–18]. Although there have been many studies of seed-metering devices, most previous studies have not addressed the seed motion in an oscillating seed metering device. In order to represent the various shapes of agricultural

seeds, a multi-sphere approach method was adopted to describe complex material geometries, as the most commonly used technique to describe complex material geometries uses multi-spherical particles, in which a certain number of spheres were “glued” together [19–21], or using optimized spherical harmonics for describing non – spherical particle shapes whether regular or irregular shapes [22].

Particle model

The commercial three-dimensional DEM software (EDEM, Edinburgh, UK) was used in simulations. Three-dimensional models of oscillating seed metering device are imported into EDEM, the shape of the oscillating part model was rectangular with dimensions 57 mm × 22 mm according to the structure of the oscillating seed metering and made of stainless steel. In this study, the particle of sesame seeds is taken as the object of research, so sesame seeds motion in an oscillating seed metering unit is simulated under oscillation motion with displacement magnitude is 17.5 degrees.

Due to the difference of agricultural materials such as grain and seeds in their form and so they have a very wide range

of forms like spherical, ellipsoidal, and diamond with round or sharp-edged. Consequently, the size of the products ranges from below a millimeter to tens of centimeters. The simplified measurement of the three dimensions of the shape: length, width, and thickness, which is frequently used is not enough to accurately describe complex shapes [23]. Therefore, the complex shapes of particles are often used for DEM modelling process by clusters of rigidly joined overlapping spheres known as the multi-sphere method. The contact of multi-sphere particles is described via the contacts between their sub-spheres. Accuracy of the description of mechanical behavior is influenced by the number of particles combined into a cluster [24]. The major advantage of using spheres is the lower computation time in comparison with the real structures. As well as, the non-spherical particles demand more advanced algorithms and are more difficult to model [25]. But the main disadvantage of using spheres is that the flow patterns of the real particle shape cannot be described. Therefore, according to the physical properties of sesame seeds, a triaxial ellipsoidal particle model was established using multiple spheres. To generate an ellipsoidal structure from the spheres, several spheres

must be symmetrically connected in a row. However, with an increasing number of particles, the elliptical shape increases, the mechanical time step of a discrete simulation decreases, and the computational time increases. Therefore, to replicate an ellipsoidal sesame seeds and to save computational time, several arrangements and numbers of spheres were checked in the particle flow simulations to find the optimal number of spheres for sesame seeds, which were 12 spheres. To describe the real particle behavior in our numerical model, clumps of 12 joint spheres were formed together. Its semi-axes were 3.3, 2 and 1mm as illustrated in Figure 2. The material properties and interaction properties are the most two substantial categories of material parameters for DEM modelling. Therefore the mechanical properties of the materials (Poisson's ratio, shear modulus, and density) and particle contact parameters (Coefficient of restitution, static friction and rolling friction) used in EDEM simulations are respectively listed in Tables 2 and 3.

EDEM simulation condition

Figure 3 illustrates the component parts used in the simulation, referred to as the oscillating element, a hopper for feeding sesame seeds to the unit, and holes for

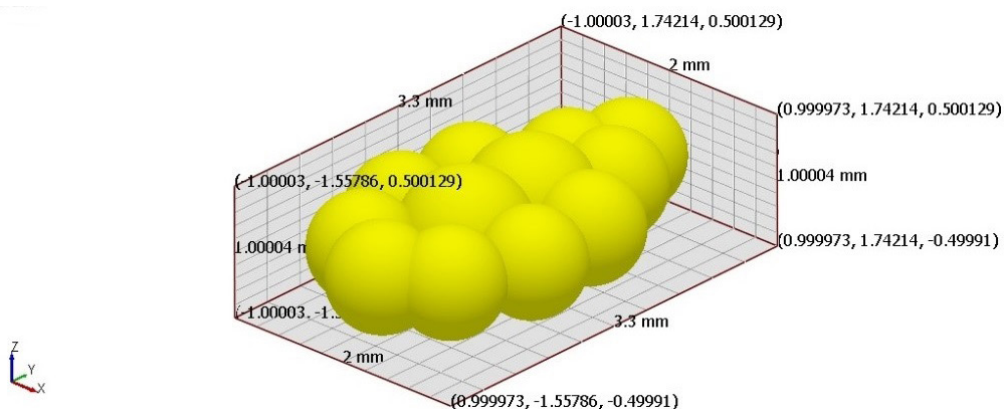


Fig. 2. Snapshot of a three-dimensional model for sesame seeds

Table 2

Mechanical properties of the materials used in the EDEM simulation

Material properties	Sesame seeds	Steel
Poisson's ratio	0.05	0.303
Shear modulus (Pa)	$1 \cdot 10^7$	$7.93 \cdot 10^{10}$
Density, kg/m ³	850	7 800

Table 3

Interaction parameters used in the EDEM simulation

Contact parameters	Sesame seeds / Sesame seeds	Sesame seeds / Steel
Coefficient of restitution	0.20	0.28
Coefficient of static friction	0.35	0.52
Coefficient of rolling friction	0.10	0.15

output the seeds to soil surface. At the beginning of the calculation, sesame seeds were generated, after filling from the hopper, sesame seeds moving under the effect of oscillation motion by oscillating element. To study the characteristics of the outflow of sesame seeds with time during the simulation, a boundary area with $15 \times 44.48 \times 46.44$ mm was taken in the direction of X, Y, and Z axes respec-

tively for simulation, so that the modelling zone is surrounded by walls from all its faces except in the upper boundary. The angle of displacement magnitude for oscillating seed metering is equal to 17.5 degrees up and down. The method of coloured particles was used for continuous discharge during simulation to detect the different sesame seeds velocities as shown in Figure 3. These param-

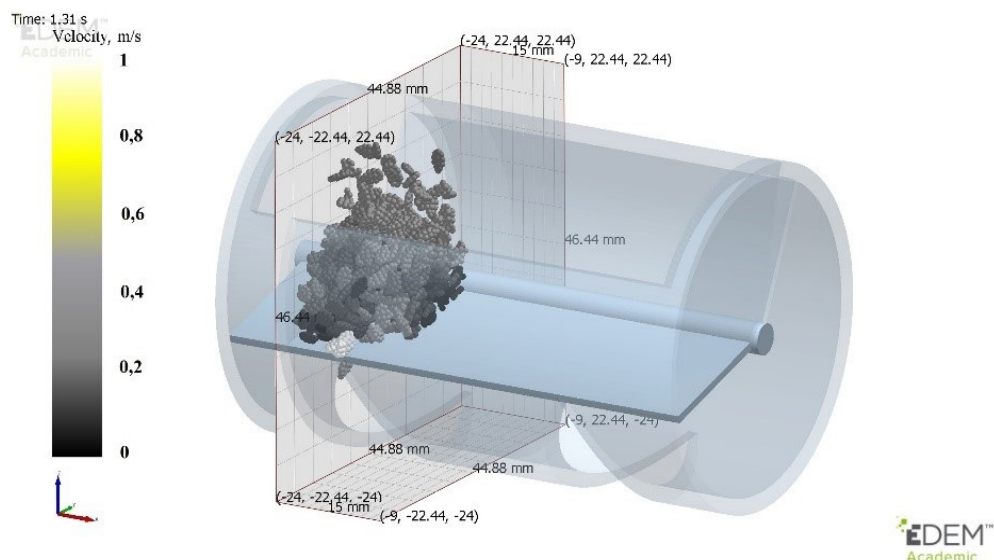


Fig. 3. Snapshot of simulation condition in EDEM

ters correspond to the mode of oscillating seed metering unit operation, where its scheme was presented above.

To determine the outflow rate of an equivalent spherical particle having the same volume as the sesame seeds. The sesame seeds were drop and free fall from the hopper under the influence of gravity moves freely into the oscillating seed metering after that the seeds move under oscillation motion with displacement magnitude is 17.5 degrees via an oscillating element with frequency 16 Hz during the modelling process. In addition to parameters that describe the constitutive material of the particles, the simulation time step and number of particles are necessary for the simulation setup. The simulation of the continuous sesame outflow was done using a periodic boundary condition of the geometry. Figure 4 shows the simulation results of continuous sesame seeds discharge in the oscillating seed metering model using DEM simulations. The average flow rate of sesame seeds was about 33 seeds at time 1.43 s with a time step around 0.08 s.

Discussion and Conclusion

It can be seen that from DEM simulations at the beginning of the modelling process, there are no sesame seeds were coming out of the holes into seed tube for 3 steps and then there was regular outflow of sesame seeds with from oscillating seed metering device at the rate of one seed in the most time but there was also the exit of more than one seed together and sometimes did not come out any seeds, as a result of the seeds moving in different directions after colliding with the oscillating element and not just in the vertical direction as presented in Figure 5. The results obtained illustrate the inconsistency of sesame seeds discharge during the modeling

process because the obtained values for the seeds outflow from the device. Which this results in sometimes not coming out any of the sesame seeds from the device or coming out for more than one seed together from the holes at the same time to the soil surface. This observation could be due to the random movement of sesame seeds in several directions after moving by oscillating element used in the model in oscillating seed metering device during the simulation and before dropping into the seed tube.

DEM simulation results for sesame seeds outflow in oscillating seed metering device have shown that the paper thus provides an effective method for prediction the sesame seed outflow as well as the EDM model has been used to better understand seed movement mechanism in an oscillating seed metering unit. This is necessary and important for automatically adjusting the oscillation parameters to enhance the uniform discharge of seeds in seed metering device to solve the problem of determining the grain outflow rate in the design of grain planting machines, and to improve the continuous working performance of an oscillating seeder for precision planting.

Further studies by the authors will look to improve the DEM model by developing the design of the oscillating element and including more input parameters in modelling process in order to control the seed flow rate individually and control the direction of movement of seeds after the collision by oscillating element to give uniformity in seed outflow from oscillating seed metering unit. In addition, creating a mathematical and computational model to simulate the sesame seeds by combining of the obtained particle flow model with adding some improvements in the design of the oscillating element.

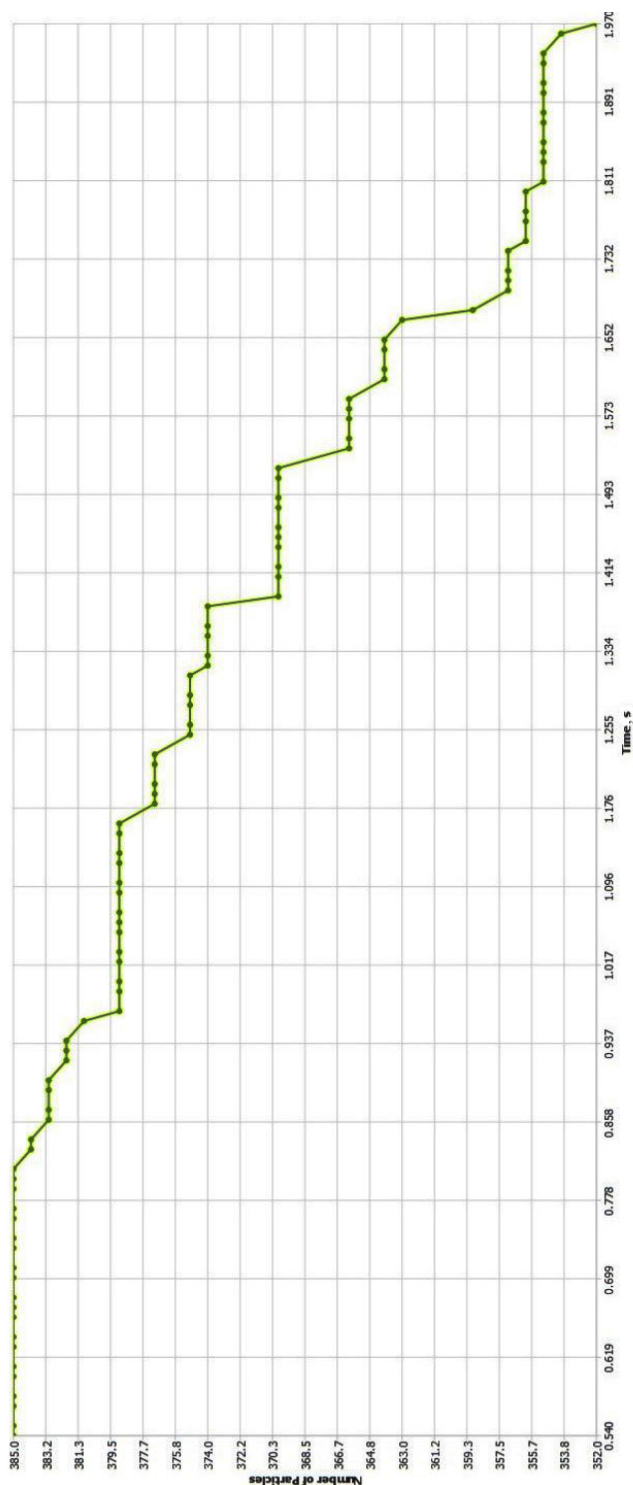


Fig. 4. Dependence of particle discharge at the time during the simulation

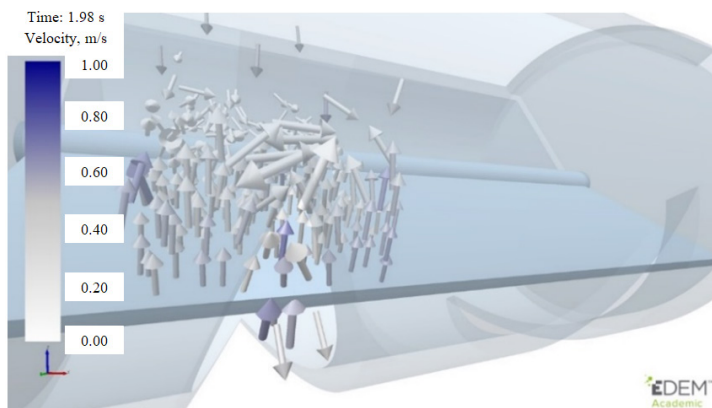


Fig. 5. A snapshot of velocity and direction of particles motion during the simulation using EDEM in oscillating seed metering unit

REFERENCES

1. Varzakas T. Book Review: Peter K.V. (2012) Handbook of Herbs and Spices. Vol. 2. *International Journal of Food Science & Technology*. 2013; 48(7):1558. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.12108>
2. Movahedi E., Rezvani M., Hemmat A. Design, Development and Evaluation of a Pneumatic Seeder for Automatic Planting of Seeds in Cellular Trays. *Journal of Agricultural Machinery*. 2016; 4(1):65-72. Available at: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=IR2016800061> (accessed 26.03.2020). (In Eng.)
3. Yang L., Yan B.X., Cui T., et al. Global Overview of Research Progress and Development of Precision Maize Planters. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2016; 9(1):9-26. (In Chin.) DOI: <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20160901.2285>
4. Reddy B.S., Satyanarayana A.R.V., Adake R.V., et al. Performance of Seed Planter Metering Mechanisms under Simulated Conditions. *Indian Journal of Dryland Agricultural Research and Development*. 2012; 27(2):36-42. Available at: https://www.researchgate.net/publication/255734431_Performance_of_Seed_Planter_Metering_Mechanisms_under_Simulated_Conditions (accessed 26.03.2020). (In Eng.)
5. Yazgi A., Degirmencioglu A. Measurement of Seed Spacing Uniformity Performance of a Precision Metering Unit as Function of the Number of Holes on Vacuum Plate. *Journal of the International Measurement Confederation*. 2014; 56:128-135. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.06.026>
6. Cundall P.A., Strack O.D.L. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies. *Geotechnique*. 1979; 29(1):47-65. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>
7. Ramírez A., Nielsen J., Ayuga F. On the Use of Plate-Type Normal Pressure Cells in Silos: Part 2: Validation for Pressure Measurements. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2010; 71(1):64-70. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.12.005>
8. Boac J.M., Ambrose R.P.K., Casada M.E., et al. Applications of Discrete Element Method in Modeling of Grain Postharvest Operations. *Food Engineering Reviews*. 2014; 6:128-149. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s12393-014-9090-y>
9. Guo Y., Wassgren C., Ketterhagen W., et al. Some Computational Considerations Associated with Discrete Element Modeling of Cylindrical Particles. *Powder Technology*. 2012; 228:193-198. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.05.015>
10. Horabik J., Molenda M. Parameters and Contact Models for DEM Simulations of Agricultural Granular Materials: A Review. *Biosystems Engineering*. 2016; 147:206-225. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.02.017>

11. Leblicq T., Smeets B., Roman H., et al. A Discrete Element Approach for Modelling the Compression of Crop Stems. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016; 123:80-88. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.02.018>
12. Doroshenko A., Butovchenko A., Gorgadze L. The Modeling of the Process of Grain Material Outflow from a Hopper Bin with a Lateral Outlet. In: MATEC Web of Conferences. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018). 2018; 224:6. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822405013>
13. Tijskens E., Ramon H., De Baerdemaeker J. Discrete Element Modelling for Process Simulation in Agriculture. *Journal of Sound and Vibration*. 2003; 266(3):493-514. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00581-9](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00581-9)
14. Zhang T., Liu F., Zhao M.Q., et al. Movement Law of Maize Population in Seed Room of Seed Metering Device Based in Discrete Element Method. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2016; 32(22):27-35. (In Chin.) DOI: <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2016.22.004>
15. Han D.D., Zhang D.X., Yang L., et al. EDEM-CFD Simulation and Experiment of Working Performance of Inside-Filling Air-Blowing Seed Metering Device in Maize. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2017; 33(13):23-31. (In Chin.) DOI: <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2017.13.004>
16. Han D., Zhang D., Jing H., et al. DEM-CFD Coupling Simulation and Optimization of an Inside-Filling Air-Blowing Maize Precision Seed-Metering Device. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018; 150:426-438. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.006>
17. Lei X., Liao Y., Liao Q. Simulation of Seed Motion in Seed Feeding Device with DEM-CFD Coupling Approach for Rapeseed and Wheat. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016; 131:29-39. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.11.006>
18. Radvilaite U., Ramires-Gomez A., Kacianauskas R. Determining the Shape of Agricultural Materials Using Spherical Harmonics. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016; 128:160-171. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.09.003>
19. Wang X., Yu J., Lv F., et al. A Multi-Sphere Based Modelling Method for Maize Grain Assemblies. *Advanced Powder Technology*. 2017; 28(2):584-595. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2016.10.027>
20. Xu T., Yu J., Yu Y., et al. A Modelling and Verification Approach for Soybean Seed Particles Using the Discrete Element Method. *Advanced Powder Technology*. 2018; 28(12):3274-3290. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2018.09.006>
21. Radvilaite U., Ramirez-Gomez A., Rusakevicius D., et al. Semi-Analytical Models of Non-Spherical Particle Shapes Using Optimised Spherical Harmonics. *Chemical Engineering Research and Design*. 2018; 137:376-394. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.07.031>
22. Boac J.M., Casada M.E., Maghirang R.G., et al. 3-D and Quasi-2-D Discrete Element Modeling of Grain Commingling in a Bucket Elevator Boot System. *Transactions of the ASABE*. 2012; 55(2):659-672. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.39812>
23. Wiacek J., Molenda M., Horabik J., et al. Influence of Grain Shape and Intergranular Friction on Material Behavior in Uniaxial Compression: Experimental and DEM Modeling. *Powder Technology*. 2012; 217:435-442. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.10.060>
24. Luding S. Cohesive, Frictional Powders: Contact Models for Tension. *Granular Matter*. 2008; 10(4):235-246. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10035-008-0099-x>

Received 21.11.2019; revised 14.01.2020; published online 30.06.2020

Поступила 21.11.2019; принята к публикации 14.01.2020; опубликована онлайн 30.06.2020

About the authors:

Noureldin N. Sharaby, Assistant Lecturer of Agricultural Engineering Department of Faculty of Agriculture, Kafrelsheikh University (El-Geish St., Kafr el-Sheikh 33516, Egypt), Postgraduate Student of Chair of Engineering and Maintenance of Transporting and Manufacturing Systems at Agribusiness Department, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5506-1589>, noureldin_sharaby@agr.kfs.edu.eg

Artyom A. Doroshenko, Associate Professor of Chair of Engineering and Maintenance of Transporting and Manufacturing Systems at Agribusiness Department, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia), Ph.D. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3739-7059>, sad133@yandex.ru

Andrey V. Butovchenko, Head of Department of Chair of Engineering and Maintenance of Transporting and Manufacturing Systems at Agribusiness Department, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9335-9586>, butovchenkoav@yandex.ru

Contribution of the authors:

N. N. Sharaby – collecting and analyzing the theoretical and practical materials for the research topic, analyzing the scientific sources for the research study, critical analysis and revising of the paper; A. A. Doroshenko – scientific guidance, mathematical modeling for the study object, analyzing the study results; A. V. Butovchenko – scientific guidance, a problem statement, definition of research methodology, critical analysis and revision the paper.

All authors have read and approved the final manuscript.

Об авторах:

Шараби Нурэлдин Нурэлдин, преподаватель кафедры сельскохозяйственного машиностроения факультета сельского хозяйства Университета Кафр-эль-Шейха (33516, Египет, г. Кафр-эль-Шейх, ул. Эль-Гейш), аспирант кафедры проектирования и технического сервиса транспортно-технологических систем агропромышленного факультета ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5506-1589>, noureldin_sharaby@agr.kfs.edu.eg

Дорошенко Артем Александрович, доцент кафедры проектирования и технического сервиса транспортно-технологических систем агропромышленного факультета ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3739-7059>, sad133@yandex.ru

Бутовченко Андрей Владимирович, заведующий кафедрой проектирования и технического сервиса транспортно-технологических систем агропромышленного факультета ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9335-9586>, butovchenkoav@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

Н. Н. Шараби – анализ теоретических и практических материалов по теме исследования, анализ научных источников по теме исследования, критический анализ и доработка текста; А. А. Дорошенко – научное руководство, математическое моделирование объекта исследования, анализ результатов исследования; А. В. Бутовченко – научное руководство, постановка задачи, определение методологии исследования, критический анализ и доработка решения.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

УДК 631.243.3:664.72

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202002.232-253



Технология мониторинга и управления воздушными потоками внутри металлического силоса при хранении зерна

А. С. Разворотнев, Ю. Д. Гавриченко*
*ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский
институт зерна и продуктов его переработки»
(г. Москва, Россия)*
**gavrud@bk.ru*

Введение. Сохранение урожая зерновых в металлических силосах с плоским дном не представляется возможным без мониторинга и управления воздушными потоками во внутреннем объеме. В силосах с неуправляемыми потоками воздуха происходит перераспределение влаги и дополнительное увлажнение поверхностного слоя, что приводит к потерям около 2 % зерна. Целью работы является разработка технологии, исключающей увлажнение поверхностного слоя зерна при хранении в металлических силосах.

Материалы и методы. В лабораторных условиях были определены аэродинамические параметры зерна пшеницы и сои в диапазоне скоростей фильтрации менее 0,15 м/с. В металлических силосах вместимостью 2 000, 3 000 и 10 000 т одновременно измерены температура и относительная влажность воздуха внутри, в верхней части силоса и снаружи. Период измерения температуры и относительной влажности составлял 30 мин в течение двух и пяти месяцев. Для измерения использовались автономные регистраторы.

Результаты исследования. Предложен новый объективный норматив вентилирования зерна – минимальная (критическая) скорость фильтрации, обеспечивающая вынос влаги за пределы силоса. Аналитическими исследованиями получено уравнение для вычисления средневзвешенной скорости фильтрации воздуха, выходящего из зерновой массы. Общий расход воздуха, соответствующий средневзвешенной скорости фильтрации, обеспечит по всей поверхности скорость фильтрации не менее критической и исключит оседание влаги. Экспериментально выявлены периоды насыщения влагой воздуха до 100 % в надзерновом пространстве под крышей силоса. Уточнен механизм выброса тепла под крышу силоса из глубины зерновой массы при хранении.

Обсуждение и заключение. Предложен алгоритм безопасного активного вентилирования зерна и подкрышного пространства в металлическом силосе. Рекомендованы предельные значения относительной влажности атмосферного воздуха, использование которого исключит увлажнение зерновой массы при активном вентилировании в диапазоне перепада температур зерна и атмосферы до 30 °С и более. Полученные

© Разворотнев А. С., Гавриченко Ю. Д., 2020



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

данные могут быть использованы машиностроителями при изготовлении металлических силосов, а также при эксплуатации производителями зерна и его переработке.

Ключевые слова: металлический силос, вентиляция, хранение зерна, самосогревание, увлажнение, относительная влажность, температура

Для цитирования: Разворотнев, А. С. Технология мониторинга и управления воздушными потоками внутри металлического силоса при хранении зерна / А. С. Разворотнев, Ю. Д. Гавриченко. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202002.232-253 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 2. – С. 232–253.

Technology for Monitoring and Control of Air Flows Inside Metal Silos during Grain Storage

A. S. Razvorotnev, Yu. D. Gavrichenkov*

All-Russian Research Institute of Grain and Its Processing Products (Moscow, Russia)

*gavrud@bk.ru

Introduction. Preservation of grain crops in flat-bottomed metal silos is not possible without monitoring and control of air flows in the internal volume. In the silos with uncontrolled air flows, there is a redistribution of moisture and additional moistening of the grain surface layer that leads to losses of about 2% of grain. The aim of this work is to develop a technology for preventing the grain surface layer from humidifying during storage in metal silos.

Materials and Methods. Under laboratory conditions, aerodynamic parameters of wheat and soybean grains were determined in the range of filtration rates less than 0.15 m/s. In metal silos, with a capacity of 2,000, 3,000 and 10,000 t, the temperature and relative humidity of the air inside at the top of the silos and outside were measured simultaneously. The temperature and relative humidity measurement period was 30 min for two and five months. Autonomous recorders were used for measurement.

Results. A new objective standard of grain ventilation is proposed – minimum (critical) filtration rate, which ensures moisture removal outside the silo. The analytical studies produced an equation for calculating the weighted average filtration rate of air leaving the grain mass. The total air flow rate corresponding to the weighted average filtration rate will provide a filtration rate of at least critical over the entire surface and will exclude moisture settling. The periods of air saturation with moisture up to 100% in the supervisory space under the roof of the silo have been determined experimentally. The mechanism of heat emission up to the silo roof space from the depth of grain mass during storage has been clarified.

Discussion and Conclusion. The algorithm for safe active ventilation of grain and roof space in metal silos is proposed. Limit values of relative humidity of atmospheric air are recommended, the use of which will exclude humidification of grain mass when ventilating actively in the range of temperature difference between grain and atmosphere up to 30 °C and more. The obtained data can be used by mechanical engineers in the manufacture of metal silos and by grain producers in the operation of the said silos.

Keywords: metal silo, ventilation, grain storage, self heating, humidification, relative humidity, temperature

For citation: Razvorotnev A.S., Gavrichenkov Yu.D. Technology for Monitoring and Control of Air Flows Inside Metal Silos during Grain Storage. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(2):232-253. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.232-253>

Введение

Для сохранения урожая зерновых в России к 2035 г., по экспертной оценке, потребуется дополнительно построить зернохранилища вместимостью свыше 84 млн т [1]. Имеющийся дефицит емкостей для хранения, очевидно, будет устранен введением в эксплуатацию металлических силосов, которые используются во всем мире. В России за последние 16 лет ежегодно вводились в эксплуатацию металлические емкости вместимостью около 1 млн т. В отличие от традиционно строившихся элеваторов из железобетонных конструкций металлические силосы более экономичны. Они имеют меньший срок строительства в 1,5–2 раза, на 15–20 % меньшие капитальные затраты и не менее 20 % – снижение текущих затрат на содержание зданий. По сравнению с напольными складами в металлических силосах механизированы погрузочно-разгрузочные работы с зерном. Недостатком этих силосов является невозможность гарантированно сохранить в условиях умеренного климата верхний слой зерна массой около 2 % от общего объема [2]. В странах с жарким климатом такой недостаток силосов отсутствует. Сохранение верхнего слоя зерна в металлических силосах в климатических условиях нашей страны – актуальная задача.

На сохранность зерна существенное влияние оказывают температура и влажность воздуха, окружающего зерновую массу и находящегося внутри нее [3; 4]. Повышенные температура и влажность являются благоприятной средой для развития бактерий, грибов, плесеней, насекомых и других негативных процессов, снижающих стойкость зерна к хранению и приводящих к потерям массы и качества. В металлическом силосе вследствие высокой

проводимости тепла и температуры ограждающих стен воздух под крышей в надзерновом пространстве изменяет свои параметры в зависимости от погодных условий и физиологических процессов, протекающих в зерновой массе. Параметры воздуха внутри зерновой массы изменяются значительно медленнее и практически не зависят от погодных условий. Зерновая масса обладает низкой температуропроводностью и теплопроводностью. На изменение параметров воздуха в межзерновом пространстве влияют физиологические процессы, протекающие в зерновой массе при хранении. В процессе дыхания компонент зерновой массы выделяется тепло, приводящее к повышению температуры и нередко к случаям самосогревания зерна. Предотвратить этот процесс позволяет вентилирование зерновой массы¹.

В металлических силосах с плоским дном, предназначенных для хранения, предусмотрены две вентиляционные установки и устройство для мониторинга температуры во внутреннем объеме. Одна установка предназначена для вентилирования надзернового пространства под крышей. В верхней части силоса или на крыше устанавливаются осевые (крышные), вытяжные вентиляторы, которые осуществляют замену воздуха в надзерновом пространстве. Приток наружного воздуха обеспечивается через кольцевой зазор между вертикальной стенкой силоса и крышей. Другая установка предназначена для активного вентилирования зерновой массы, замены воздуха во внутреннем объеме силоса, в том числе и в межзерновом пространстве. Наружный более холодный воздух нагнетается в зерновую массу снизу через перфорацию в плоском дне. Выводится воздух из силоса в верхней части через

¹ **Burrill P.** Super Cool Aeration Results // Source Link Grains Research and Development Corporation (GRDC). 21.06.2016. URL: <https://storedgrain.com.au/super-cool-aeration-results/> (дата обращения: 20.04.2020).

кольцевой зазор между стенкой и крышей в дефлекторы. Устройство для мониторинга температуры представляет собой вертикально натянутый внутри силоса трос с датчиками температуры. Расстояние между датчиками не более 1,5 м. Показания датчиков выводят на пульт управления.

В конструкции металлических силосов не предусмотрен мониторинг количества воздуха, обращающегося внутри силоса. Силосы не оборудованы измерительной аппаратурой контроля расхода воздуха, подаваемого в зерновую массу. Известно, что при активном вентилировании происходит перераспределение влаги в массе зерна. При малых скоростях фильтрации десорбируемая из зерна влага оседает на поверхности зерновой массы, приводит к дополнительному увлажнению и развитию негативных процессов [5]. В процессе хранения в надзерновом пространстве под крышей силоса (особенно в осенне-зимний период при охлаждении атмосферы ниже 0 °С) образуется конденсат, который выпадает на поверхность зерновой массы и также увлажняет зерно.

Настоящая статья посвящена разработке технологии, исключающей увлажнение поверхностного слоя зерна при хранении в металлических силосах, выведению алгоритма безопасного активного вентилирования зерна и алгоритма вентилирования надзернового пространства под крышей силоса.

Обзор литературы

В нормативно-технической документации, а также в инструкциях по эксплуатации металлических силосов отечественных и зарубежных компаний-изготовителей не изложены методы управления воздушными потоками. В силосах, укомплектованных одинаковым вентиляционным оборудованием, хранятся различные зерновые культуры. Аэродинамические характеристики зерновых культур отличаются друг от друга. Например, потери давления воз-

духа на одном метре высоты зерна при фильтрации со скоростью 0,037 м/с по данным составят: пшеницы – около 110 Па, кукурузы – около 30 Па, проса – около 280 Па, ржи – около 120 Па. При активном вентилировании требуется регулировка установки для каждой культуры. Для металлических силосов установлен единый норматив объема воздуха, нагнетаемого в зерновую массу.

В инструкциях активное вентилирование в металлических силосах рекомендовано осуществлять при удельном расходе воздуха не менее 10 м³/ч на одну тонну. Однако этот норматив недостаточно объективен. В работах ряда ученых установлено, что воздушный поток внутри силоса неравномерно распределяется в зерновой массе [6]. Около стен силоса воздух имеет большую скорость по сравнению с центральной частью. Это обосновано различием высот слоя зерна: в центре слой более высокий, чем у стен. Разность высот возникает вследствие загрузки силоса через одно отверстие в центре крыши, в силосе образуется конусообразная насыпь. Размеры конусной части насыпи зависят от диаметра силоса. Высота конусной части выше в силосах, имеющих больший диаметр. Чем больше диаметр силоса, тем меньший объем воздуха проходит через центральную часть насыпи при средней удельной подаче. Действующий норматив установлен около 30 лет назад на основе исследований в силосе диаметром 15,2 м. В настоящее время строят силосы диаметром от 8 до 40 м. Объединенным нормативом подачи воздуха для всех зерновых культур и типоразмеров силосов могла бы быть критическая скорость фильтрации, при которой обеспечивается вынос влаги за пределы силоса. В зерновую массу необходимо нагнетать воздух в объеме с учетом неравномерности распределения в насыпи, при котором устанавливается критическая

(нормативная) скорость фильтрации в центральной части. При таком режиме активного вентилирования будет обеспечен вынос влаги за пределы силоса и исключено выпадение ее на поверхностный слой [7].

Для описания аэродинамических параметров зерновых культур в плотном слое в литературе используют следующую формулу Рамзина:

$$P = 9,81 \cdot A \cdot h \cdot v^n, \quad (1)$$

где P – потери давления в зерновом слое, Па; A и n – эмпирические коэффициенты, приведены в таблице 1 для различных культур; h – высота слоя, мм; v – скорость фильтрации – расход воздуха, отнесенный к площади зерновой массы, м/с.

Коэффициенты в таблице 1 получены В. Ф. Самочетовым экспериментально при скоростях фильтрации свыше 0,1 м/с. Фактические скорости фильтрации в металлических силосах, по данным О. М. Бинело, не превышают 0,05 м/с [8]. Требуется экспериментально подтвердить правомерность использования значений эмпирических коэффициентов для этих режимов вентилирования. В ряде работ формула (1) применена для мониторинга количества воздуха, нагнетаемого в зерновую массу [8; 9]. Предлагается измерять перепад давления в слое фиксированной толщиной внутри зерновой насыпи. По формуле (1) вычисляют среднюю скорость фильтрации, затем средний расход воздуха через массу зерна и удель-

ную подачу. Технологическая схема хранения зерна в металлическом силосе с мониторингом расхода воздуха представлена на рисунке 1.

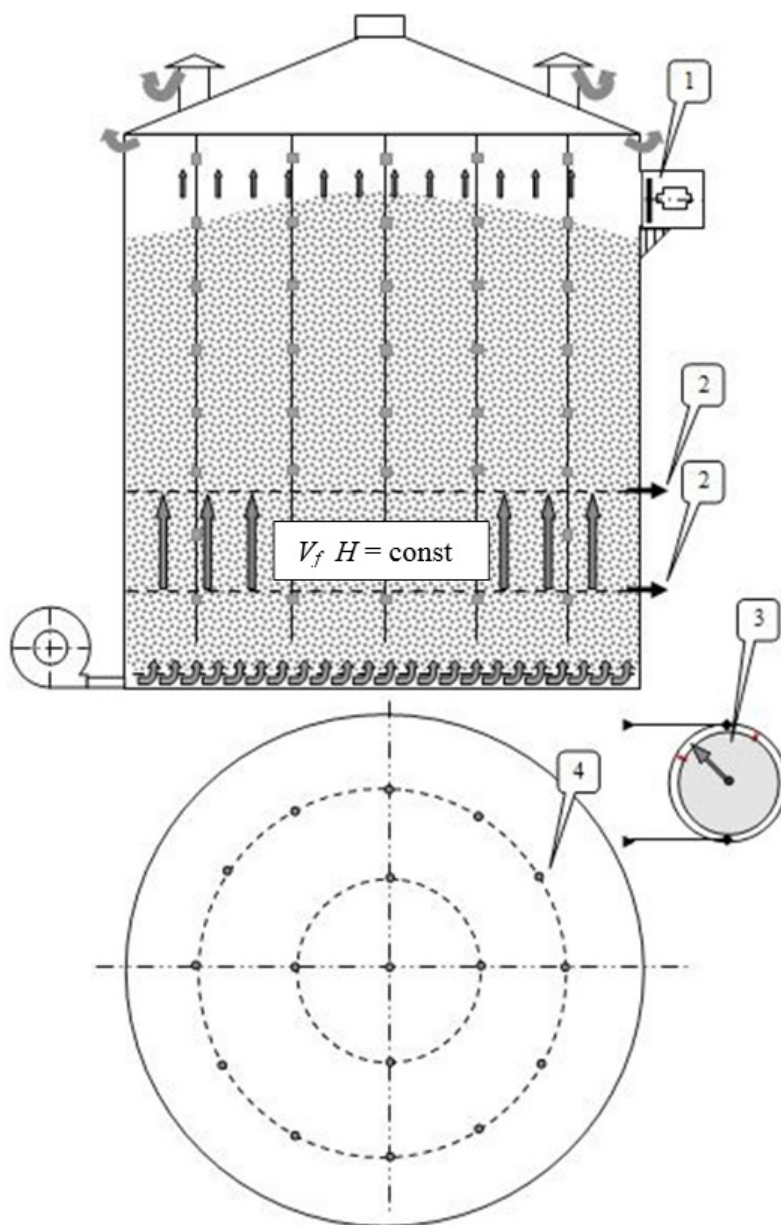
В металлических силосах в соответствии с нормативной документацией разрешается хранение зерна влажностью не более 14 %. Вентилирование допускается воздухом, имеющим параметры, исключающие дополнительное увлажнение зерна. Температура наружного воздуха должна быть ниже температуры зерна не менее чем на 5 °С. В инструкциях не определены предельные параметры атмосферного воздуха, при которых не происходит увлажнение зерна при вентилировании. В некоторых зарубежных инструкциях, например испанской фирмы Kordoba, дана таблица предельной относительной влажности наружного воздуха. В таблице разность температур зерна и атмосферы не превышает 8 °С. Зерно влажностью 14 % допускается вентилировать воздухом, имеющим 100 % влажность. Требуется разработать таблицу в более широком диапазоне разности температур: с учетом условий хранения в умеренном климате РФ. Разность температур может достигать более 30 °С. Вентилирование воздухом с влажностью, близкой к 100 %, недопустимо.

Для контроля и управления установкой вентилирования надзернового пространства силоса в инструкциях рекомендовано измерять относительную влажность воздуха под крышей и снаружи при помощи психрометра Ассма-

Таблица 1
Table 1

Значения коэффициентов A и n для различных культур
Values of factors A and n for different cultures

Культура / Culture	A	n	Культура / Culture	A	n
Пшеница / Wheat	1,41	1,43	Кукуруза / Corn	0,67	1,55
Рожь / Rye	1,76	1,41	Горох / Peas	0,82	1,51
Овес / Oats	1,64	1,42	Гречиха / Buckwheat	1,76	1,41
Ячмень / Barley	1,44	1,43	Просо / Millet	2,34	1,38



Р и с. 1. Технологическая схема хранения зерна в металлическом силосе с мониторингом расхода воздуха: 1 – осевой вентилятор; 2 – присоединение к дифманометру; 3 – дифманометр для измерения давления воздуха; 4 – схема расположения термоподвесок в поперечном сечении силоса; $\Delta P = f(V_f)$ – изменение давления как функция скорости фильтрации

F i g. 1. Process diagram of grain storage in metal silo with air flow monitoring: 1 – axial fan; 2 – accession to a manometer; 3 – manometer for measurement air pressure; 4 – diagram of positioning for thermal supports in cross section of silo; $\Delta P = f(V_f)$ – pressure change as a function of filtration rate

на. Включать установку требуется при превышении влажности воздуха над зерном по сравнению с влажностью воздуха снаружи.

В инструкции не указаны периодичность контроля, а также значение превышения влажности воздуха внутри относительно влажности снаружи. Выполнить на практике предложенные в инструкции условия контроля влажности не представляется возможным: высота силосов около 20 м. Также нецелесообразно вентилировать подкрышное пространство при состоянии превышения влажности воздуха внутри относительно наружной, но не менее точки росы. В этом случае нет опасности выпадения конденсата.

Разработать алгоритм управления установкой вентилирования подкрышного пространства силоса возможно на основе анализа данных изменений температуры и относительной влажности воздуха внутри в верхней части силоса и снаружи. Наблюдения за изменениями параметров воздуха целесообразно провести в период от закладки зерна с температурой не менее 20 °С до устойчивого охлаждения атмосферы ниже 0 °С. Такое соотношение температур характерно для умеренного климата. Похожие исследования для условий жаркого климата выполнены в зарубежных работах² [10].

В наших работах опубликованы графики изменений температуры и влажности воздуха в силосе и снаружи [11–13]. Полученные данные подтверждают неустойчивое состояние верхнего слоя зерна при хранении в металлическом силосе. Внутри в верхнем слое на глубине около 70 мм и на поверхности зерновой насыпи может образоваться конденсат. В этих местах относительная влажность воздуха достигает 100 %

в отдельные периоды хранения. Часто предельное насыщение влагой воздуха наблюдается в надзерновом пространстве под крышей. Начинаются эти процессы при устойчивом понижении наружной температуры ниже нуля, составляющей не менее половины времени в течение месяца. Высказано предположение о том, что внутри силоса происходит насыщение воздуха влагой, близкой 100 %, при двух вариантах: 100 % относительной влажности воздуха снаружи (дождливая погода) и выбросе тепла под крышу из глубинных слоев зерновой массы.

Для подтверждения изложенных выше вариантов насыщения влагой воздуха требуется более детально изучить соотношение параметров воздуха внутри силоса и снаружи в следующие периоды хранения. Периоды повышения температуры над зерном относительно наружной температуры и периоды 100 % влажности наружного воздуха.

Материалы и методы

Потери давления и расход воздуха при вентилировании зерна измерялись в производственных и лабораторных условиях. В производственных силосах измерения выполнялись при вентилировании пшеницы, овса и сои, в лаборатории – при вентилировании пшеницы и сои.

Перед выполнением замеров в силосах выравнивался поверхностный слой посредством выгрузки части зерна в течение 15 мин. В силосах измерялись: перепад давления в слоях фиксированной толщины, давление воздуха в нижнем слое над перфорированной решеткой и расход воздуха, нагнетаемый в силос. Перепад давления измерялся в следующих силосах и культурах. В пшенице – толщина слоя 2,95 м

² Кечкин И. А., Разворотнев А. С., Гавриченко Ю. Д. Обеспечение сохранности зерна в металлическом силосе // Инновационное развитие пищевой, легкой промышленности и индустрии гостеприимства: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию Алматинского технологического университета. Алматы, 2017. С.194–196.

в силосе фирмы RIELA вместимостью 2 000 т, заполненном свыше 50 %. В зерне сои – толщина слоя 2,0 и 3,0 м в силосе фирмы GSCOR вместимостью 10 000 т, загруженном полностью. Давление в нижнем слое измерялось при вентилировании овса толщиной 0,5 м в силосе RIELA вместимостью 3 000 т и при вентилировании пшеницы слоем более 10 м в силосе той же фирмы вместимостью 2 000 т.

Перепад и давление измерялись U-образным манометром, заполненным водой. При охлаждении атмосферы до 0 °C и ниже использовался дифманометр-напорометр ДНМП. Расход воздуха, нагнетаемый в силос, измерялся в воздухопроводе между вентилятором и силосом по общепринятой методике с применением пневмометрической трубки Пито.

В лабораторных условиях вентилировалась пшеница с высотой слоя 1 м, а соя с высотой 0,22 м. Измерялись давление воздуха в нижнем слое и расход воздуха. Для измерения давления использовался спиртовой микроманометр. Расход воздуха измерялся при помощи сужающих устройств: трубы Вентури и диафрагмы.

Температура и относительная влажность воздуха измерялись в верхней части внутри силосов вместимостью 2 000 и 10 000 т. Силосы были заполнены соответственно на 90 % и 100 % сухим зерном пшеницы влажностью менее 14 % урожая текущего года. В силосе на 2 000 т наблюдения осуществлялись в течение двух месяцев (сентябрь–октябрь 2016 г.), в силосе на 10 000 тонн наблюдали в течение пяти месяцев (октябрь 2017 г.–февраль 2018 г.). Внутри силоса и снаружи параметры воздуха измерялись одновременно через каждые 30 мин, в сутки – 24 измерения.

Для измерения температуры и относительной влажности воздуха использовались автономные регистраторы Логгер 100-ТВ. В силосах регистраторы помещались: в верхнем слое зерна на глубине

около 70 мм; в надзерновом пространстве – посередине между крышей и зерном на расстоянии около 200–300 мм от крыши и на поверхности зерна. Снаружи регистраторы устанавливались около силоса с северной стороны на высоте 1,5–2,0 м от земли. Погрешность измерения температуры, в диапазоне от –40 °C до +70 °C, составляла не более 2 °C; погрешность измерения относительной влажности, в диапазоне от 10 % до 95 %, составляла не более 5 %.

При анализе данных температуры и относительной влажности, измеренных регистраторами, дополнительно рассчитывалось влагосодержание. По этому показателю можно оценить количество конденсата, выпадающего при охлаждении воздуха.

Помимо данных регистраторов использовались показания системы штатного мониторинга температуры, установленной внутри зерновой массы в силосе. Наблюдения осуществлялись в тех же силосах, в которых были установлены регистраторы, и дополнительно еще в пяти вместимостью по 10 000 т, заполненных пшеницей. В одном из дополнительно наблюдаемых силосов зафиксирован процесс самосогревания, представленный ниже в разделе «Результаты исследования». Показаны температуры, зафиксированные датчиками, установленными на термоподвеске в центре силоса на высоте от 1,0 до 13,0 м от днища. Расстояние между датчиками – 1,5 м.

Таблицу предельных значений относительной влажности воздуха для вентилирования разрабатывали для пшеницы и ячменя. При этом использовались данные равновесной влажности, опубликованные в одной из наших работ, а также общеизвестные таблицы изменения относительной влажности воздуха от температуры [13–15]. Данные для ячменя можно использовать для ржи, равновесные значения влажности этих культур практически одинаковые.

Результаты исследования

В таблице 2 представлены результаты аэродинамических испытаний. Из данных таблицы 2, фактических потерь давления, определены эмпирические коэффициенты для зерна сои ($A = 0,22$; $n = 1,10$).

Расхождения между расчетными и фактическими значениями потерь давления не превышают 15 %. Это допустимо для инженерных расчетов вентилирования зерна по формуле (1).

Используя эту формулу, можно описать эпюру скоростей воздуха на границе выхода из зерновой массы от центра силоса до стены следующим уравнением:

$$v_x = \exp r^{-1} (\ln P - \ln A - \ln (h + (R - x) \operatorname{tg} \alpha)), \quad (2)$$

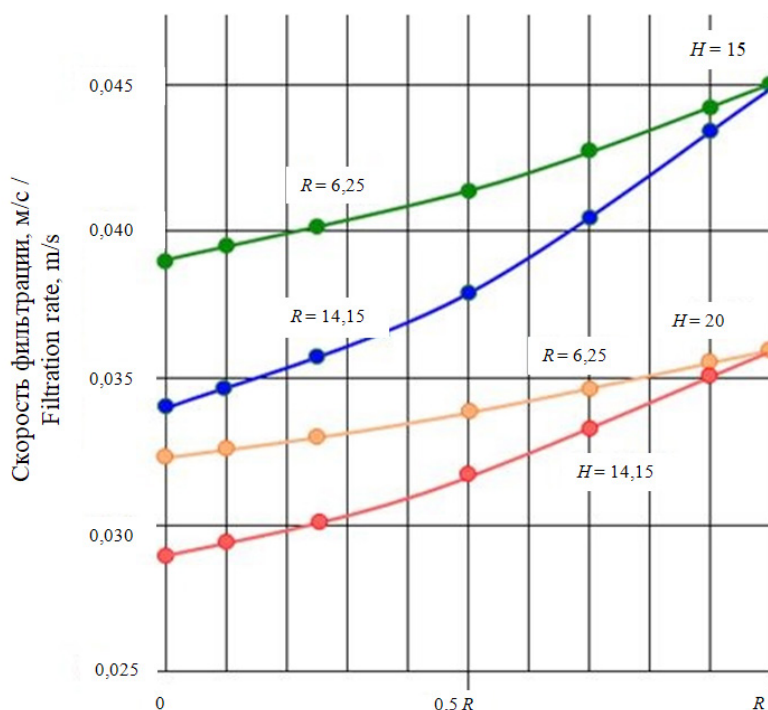
где v_x – скорость фильтрации воздуха на выходе из зерновой массы на расстоянии x от центра силоса, м/с; P – давление воздуха в нижней части насыпи, Па; h – высота слоя зерна около вертикальной стенки силоса, мм; R – радиус силоса, мм; x – переменная величина расстояния от центра силоса до его стенки, мм; α – угол естественного откоса зерна, град.

На рисунке 2 приведены графики изменения скоростей фильтрации воздуха от центра до стенки в двух силосах. При большей высоте слоя скорость фильтрации меньше и меньше расход воздуха. Около стенки силоса скорость воздуха одинакова для силосов различного диаметра, если в них одинаковые высоты зерновой массы и давление под

Т а б л и ц а 2
Table 2

Сравнение расчетных и экспериментальных значений потерь давления воздуха в различных зерновых культурах при вентилировании со скоростью менее 0,15 м/с
Comparison of calculated and experimental values of air pressure losses in different grain crops during ventilation with speed less than 0.15 m/s

V , м/с	Потеря давления ΔP , Па / Pressure loss ΔP , Pa		Зерновая культура / Grain crop		Толщина слоя, мм / Thickness of a layer, mm	Место измерения давления / Place of measurement of pressure
	Фактическое / Actual	Расчетное / Settlement	Наименование / Name	Влажность / Humidity		
0,033	320	310	пшеница / wheat	13,5	2 950	Перепад давления в металлическом силосе / Pressure drop in metal silo
0,027	220	233	пшеница / wheat	13,5	2 950	
0,021	160	160	пшеница / wheat	13,5	2 950	
0,038	170	174	soя / soy	7,0	3 000	
0,028	120	129	soя / soy	7,0	3 000	
0,016	70	71	soя / soy	7,0	3 000	
0,038	130	117	soя / soy	7,0	2 000	
0,028	90	86	soя / soy	7,0	2 000	
0,016	50	47	soя / soy	7,0	2 000	В нижнем слое зерна в силосе / In the lower layer of grain in silo
0,026	50	45	овес / oats	13,8	500	
0,033	1 080	1 078	пшеница / wheat	13,5	10 250	
0,027	870	808	пшеница / wheat	13,5	10 250	
0,021	630	567	пшеница / wheat	13,5	10 250	В нижнем слое зерна в лабораторных условиях / In the lower layer of grain in laboratory conditions
0,030	12	10	soя / soy	6,0	220	
0,090	39	34	soя / soy	6,0	220	
0,150	68	59	soя / soy	6,0	220	
0,030	90	91	пшеница / wheat	11,3	1 000	
0,050	193	191	пшеница / wheat	11,3	1 000	
0,060	241	248	пшеница / wheat	11,3	1 000	



Р и с. 2. Изменение скоростей воздуха на поверхности зерновой массы в силосах диаметром 12,5 м и 28,3 м при высоте зерна около стен 15 м и 20 м и давлении воздуха в нижней части насыпи 2 500 Па

Fig. 2. Air velocities on the surface of the grain mass in silo with diameter of 12.5 m and 28.3 m at grain heights near the walls of 15 m and 20 m and air pressure in the lower part of the fill of 2,500 Pa

решеткой. В силосах с большим диаметром имеется больший разброс значений скоростей фильтрации по поверхности зерновой массы.

Для установления критической скорости фильтрации в центральной части силоса требуется дополнительный объем воздуха с учетом неравномерности распределения в зерновой массе. Расход воздуха должен соответствовать средневзвешенной скорости фильтрации в силосе. Давление в нижнем слое должно соответствовать критической скорости в центральной части силоса.

Максимальное давление воздуха в нижнем слое зерна можно вычислить по формуле:

$$P = 9,81 \cdot A(H + R \cdot \operatorname{tg} \alpha) \cdot v^n, \quad (3)$$

где H – высота вертикальной стенки силоса, мм; v – критическая скорость фильтрации, м/с.

Подставив выражение (3) в уравнение (2), получим следующую зависимость для вычисления средневзвешенной скорости фильтрации:

$$\bar{v} = \exp n^{-1} (n \cdot \ln v + \ln (H + R \cdot \operatorname{tg} \alpha) - \ln (h + R - X) \cdot \operatorname{tg} \alpha), \quad (4)$$

где X – координата средневзвешенной скорости фильтрации, мм.

$$\bar{v} = R^{-1} \int_0^R v(x) dx. \quad (5)$$

Координату средневзвешенной скорости фильтрации вычисляли, используя формулу (4) и формулу (5) для силосов диаметром от 8 до 40 м при равенстве высот зернового слоя и стенки силоса в диапазоне от 15 до 20 м. Координата практически не зависит от высоты стенки, изменяется в силосах различного диаметра. Значения координаты, полученной расчетом для силосов с различными диаметрами, представлены в таблице 3.

На рисунке 3 представлен случай возникновения самосогревания зерна в центре нижней части металлического силоса, заполненного зерном пшеницы массой около 9 000 т.

С 22 по 26 января в слое высотой до 7,0 м (пять датчиков слева направо) от дна в центре силоса (рис. 3) произошло повышение температуры. В слоях, лежащих выше, повышение температуры не наблюдалось. В слое высотой до 2,5 м от дна температура повысилась более чем на 20 °С. В слое высотой от 2,5 до 7,0 м температура повысилась более чем на 7 °С. Через трое суток 29 января произошло самосогревание в слое высотой от 7,0 до 8,5 м, температура повысилась на 40 °С. Затем в течение 1–2 суток самосогревание развилось в нижних слоях. Этот процесс в реальных условиях может развиваться скоротечно, в течение одной недели. В нагретом состоянии зерно находилось до 21 февраля, до его

выгрузки из силоса. В данном силосе осуществлялся визуальный контроль температуры по показаниям датчиков, однако исследователи поздно среагировали на повышение температуры и включили активное вентилирование. Силос был оборудован четырьмя вентиляторами с общей производительностью свыше 80 000 м³/ч. В данном случае имел место человеческий фактор.

На рисунках ниже представлены изменения относительной влажности (рис. 4), влагосодержания (рис. 5) и температуры (рис. 6) воздуха снаружи и под крышей силоса вместимостью 10 000 т за период наблюдений с 11:00 12 января до 18:00 16 января 2018 г.

Этот период характерен тем, что имеются импульсы повышения температуры, влагосодержания и относительной влажности в воздухе над зерном, а также период 100 % влажности воздуха снаружи. Из представленных данных следует, что наиболее опасными являются импульсы выброса тепла в надзерновое пространство под крышу. В кратковременные периоды повышения температуры в надзерновом пространстве (рис. 6) происходит увлажнение воздуха, достигающее 100 % (рис. 4). После прекращения выброса тепла происходит охлаждение воздуха, из которого выпадает максимальное количество конденсата. Например, с 21:00 12 января до 7:00 13 января влагосодержание в одном кубическом

Т а б л и ц а 3

Table 3

Значения координаты средневзвешенной скорости фильтрации воздуха в силосах различного диаметра

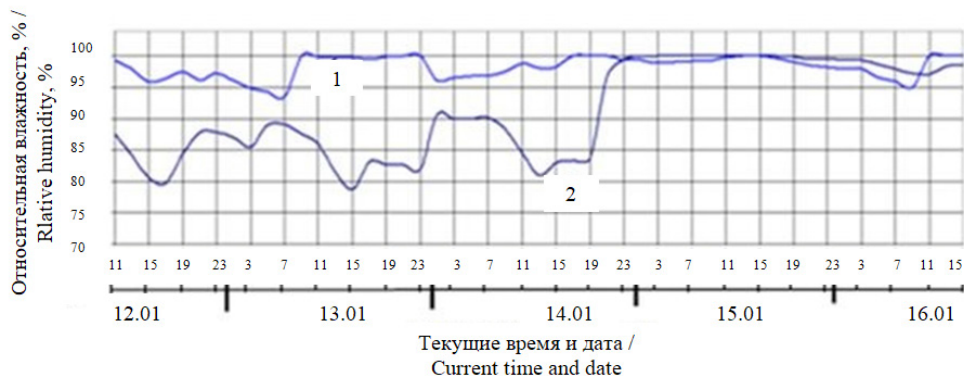
Values of coordinate of weighted average air filtration speed in silos of different diameter

Координата средневзвешенной скорости фильтрации / Weighted average filter rate coordinate	Диаметр силоса, м / Silo diameter, m			
	<10	10–20	20–30	>30
X^w	0,50R	0,55R	0,60R	0,65R

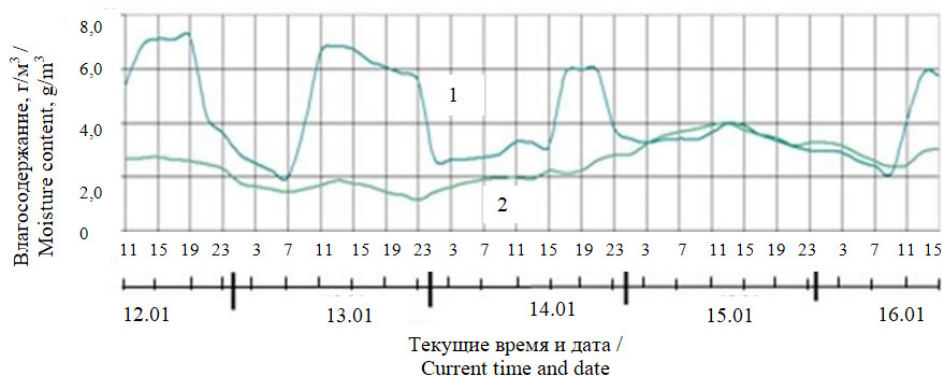
19.01.2018	-7	-2	0	2	3	7	12	14	-8
22.01.2018	-6	-4	0	1	3	6	11	13	0
26.01.2018	18	16	7	19	11	4	6	-9	
29.01.2018	-1	11	15	26	41	44	30	-5	
30.01.2018	15	19	29	41	46	30	11	-3	
31.01.2018	50	58	49	49	29	7	3	1	
01.02.2018	56	60	47	50	22	5	4	-4	
02.02.2018	59	60	58	52	39	7	1	-8	
02.02.2018	61	61	58	53	42	7	2	-3	
03.02.2018	63	64	59	54	45	8	3	-2	
05.02.2018	66	64	61	54	35	19	-5		
06.02.2018	55	56	56	37	30	8	-9		
07.02.2018	51	57	57	43	39	8	-4		
08.02.2018	44	59	59	50	43	9	-4		
09.02.2018	39	58	60	54	50	10	-6		
10.02.2018	44	51	58	52	10	-1	1		
12.02.2018	42	49	61	56	12	-9			
13.02.2018	41	51	62	57	9	-11			
14.02.2018	24	40	57	59	-11				
15.02.2018	22	40	57	59	-6				
16.02.2018	21	40	58	-4					
19.02.2018	17	40	7	-3					
20.02.2018	17	43	-4	-6					
21.02.2018	17	47	-11	-12					
22.02.2018	12	26	-13						

Р и с. 3. Самосогревание зерна пшеницы в металлическом силосе. Красным выделены температуры выше 40 °C

F i g. 3. Self-heating wheat grain in metal silo. Temperatures above 40 °C are highlighted in red



Р и с. 4. Изменение относительной влажности воздуха: 1 – над зерном; 2 – снаружи
F i g. 4. Change of relative air humidity: 1 – above grain; 2 – outside



Р и с. 5. Изменение влагосодержания воздуха: 1 – над зерном; 2 – снаружи
F i g. 5. Change of air moisture content: 1 – above grain; 2 – outside



Р и с. 6. Изменение температуры воздуха: 1 – над зерном; 2 – снаружи; 3 – в поверхностном слое на глубине около 70 мм
F i g. 6. Air temperature change: 1 – above grain; 2 – outside; 3 – in the surface layer at a depth of about 70 mm

метре воздуха над зерном уменьшилось с 7 г до 2 г (рис. 5). Можно предположить, что из одного кубического метра воздуха надзернового пространства выпало около 5 г конденсата. При 100 % влажности снаружи воздух внутри верхней части силоса имеет такие же показатели влажности, температуры и влагосодержания, как в атмосфере снаружи. В этот период воздух под крышей насыщается влагой (рис. 4), но не происходит его охлаждения (рис. 6). Поэтому образование конденсата маловероятно.

Некоторые исследователи обосновывают увлажнение поверхностного слоя наличием конвекции внутри металлических силосов. Авторы отмечают, что в результате перепадов температур между зерновой массой и атмосферой происходит процесс влагопереноса и, возможно, отпотевание и увлажнение верхнего слоя. В работе уточняется, что конвективные потоки воздуха имеют место в неветилируемых металлических силосах. Силосы для хранения зерна в верхней части и внизу соединены с атмосферой (рис. 1). В верхней части внутренний объем силоса соединен с атмосферой через кольцевой зазор между вертикальной стенкой и крышей, внизу – через вентиляционную установку. При такой конструкции силосов, имеющих высоту более 20 м, в них возможно естественное вентилирование зерна. Наличием этого процесса можно объяснить кратковременные (несколько часов) импульсы повышения температуры под крышей. По данным, представленным на рисунке 6, не наблюдается зависимости температуры над зерном от температуры снаружи. Повышение температуры над зерном до 5–8 °С (кривая 1) происходило независимо от колебаний температуры снаружи от –5 до –17 °С (кривая 2). Если бы в силосе имели место только конвективные токи, то максимальное повышение температуры над зерном можно было бы ожидать при максимальном пониже-

нии температуры снаружи. В этом случае максимальная разность температур между теплым воздухом внутри зерна и холодным воздухом снаружи. В реальном силосе такого изменения не наблюдается.

В силосе происходит эпизодическое движение воздуха снизу вверх. Вышележащие слои зерна подогреваются теплом нижних. Для понимания этого процесса интерес представляют наблюдения за температурой верхнего слоя зерна на глубине 70 мм от поверхности (рис. 6, кривая 3). В диапазоне периодов движения воздуха с 11:00 12 января до 20:00 14 января температура верхнего слоя практически не изменялась и составляла около 7 °С при наружной отрицательной – до –17 °С (рис. 6, кривая 2). В период равновесия, при равенстве температур снаружи и под крышей (отрицательных от –1 до –9 °С), наблюдается охлаждение верхнего слоя. При последующем движении воздуха вновь повышается температура верхнего слоя зерна.

В соответствии с известными физическими свойствами воздух движется через зерновую массу вследствие разности давлений в верхней и нижней частях силоса и разности температур между зерном и воздухом снаружи. Наиболее интенсивное движение воздуха вверх происходит при совпадении направлений аэродинамических сил и конвекции по аналогии с вентилированием погребов, топки печей и т. д.

Конвекция в силосе подтверждается тем обстоятельством, что воздух под крышей охлаждается не до температуры атмосферы, а на 4–5 °С выше (рис. 6, кривые 1 и 2). Такова составляющая конвекции в повышении температуры над зерном. Металлические силосы более габаритные, поэтому в них отсутствует устойчивое движение воздуха. Разность давлений внизу и вверху силоса возникает вследствие совпадения в определенном сочетании многих факторов в атмосфере. Например, дав-

ление воздуха внизу увеличивается при повышении его плотности, зависящей от абсолютного давления, влагосодержания и других факторов. Давление воздуха вверх снижается при уменьшении его плотности вследствие нагрева, а также зависит от воздействия завихрений, возникающих при обдуве ветром крыши. Завихрения могут одновременно или порознь с разных сторон силоса создавать избыточное давление или разрежение. Избыточное давление препятствует выходу воздуха из силоса, а разрежение способствует вытяжке. Характер завихрений зависит от скорости и направления ветра, аэротеней, от других зданий, расположенных на территории, и других факторов. При благоприятном совпадении вышеперечисленного происходят движение воздуха внутри силоса и изменения в надзерновом пространстве под крышей. Однако совпадения случайны, поэтому случайны и выбросы тепла из зерновой массы. Аналогичный процесс движения воздуха наблюдался в силосе вместимостью 2 000 т [12; 13]. Предусмотреть влияние всех факторов на изменения температурно-влажностных параметров воздуха внутри силоса при хранении зерна не представляется возможным.

В силосе не происходит движения воздуха при 100 % влажности снаружи. В этом случае воздух в надзерновом пространстве имеет такую же влажность и такую же максимальную плотность, как снаружи. Не имеется разности давлений воздуха между верхней и нижней частями силоса, но имеется разность температур между зерном и атмосферой. Температура внутри зерновой массы на высоте от 7 до 13 м составляла от 14 до 22 °С, а снаружи температура была отрицательная, от –1 до –9 °С. Данные графиков изменения тем-

пературы внутри зерновой массы в этом силосе опубликованы ранее³. Плотный воздух над зерном препятствует движению более теплого и легкого воздуха из глубины зерновой массы.

В таблице 4 представлены предельные значения относительной влажности воздуха, использование которого не приведет к повышению влажности зерна при вентилировании. При прохождении через зерновую массу происходит нагрев атмосферного воздуха, в котором, следовательно, уменьшается относительная влажность. Нагревается воздух до температуры зерна в конце вентилирования, значение которой вычислялось по следующей формуле [13]:

$$T_k = 0,3 \cdot T_3 + 0,7 \cdot t,$$

где T_k – конечная температура зерна после охлаждения, °С; T_3 – начальная температура зерна, °С; t – температура наружного воздуха, °С.

Равновесная влажность зерна, которая устанавливается по окончании вентилирования, не должна превышать исходную влажность. Для зерна с заданными параметрами в конце вентилирования в таблице 4 определялась максимально допустимая относительная влажность воздуха в силосе по таблице равновесной влажности. Предельная влажность наружного воздуха вычислялась по общеизвестным формулам пересчетом влажности воздуха внутри силоса для более низких температур снаружи.

Например, при вентилировании зерна пшеницы, имеющей температуру 15 °С и влажность 12 %, воздухом с температурой 0 °С и относительной влажностью 60 % произойдет снижение температуры зерна и повышение температуры воздуха до 5 °С. Такое повышение температуры в силосе снизит

³ Разворотнев А. С., Гавриченко Ю. Д. Изменение температуры внутри зерновой массы пшеницы при хранении в металлическом силосе большой вместимости // Сборник трудов к 90-летию ВНИИЗ. М., 2019. С. 166–170.

Предельные значения относительной влажности атмосферного воздуха для охлаждения зерна различной влажностью в металлическом силосе

Limit values of relative humidity of atmospheric air for grain cooling with different humidity in metal silo

Температура атмосферного воздуха, °C / Atmospheric air temperature, °C	Температура зерна, °C / Temperature of grain, °C		Влажность зерна / Humidity of grain					
			< 12 %		12–13 %		13–14 %	
	Начальная / Initial	Конечная / Final	Пшеница / Wheat	Ячмень / Barley	Пшеница / Wheat	Ячмень / Barley	Пшеница / Wheat	Ячмень / Barley
–15	15	–2	70	60	70	65	75	70
	20	–1	70	60	70	65	75	70
–10	15	–2	65	60	70	65	75	70
	20	–1	65	60	70	65	75	70
–5	15	1	65	55	70	65	75	70
	20	3	62	55	70	65	73	70
	25	4	60	55	70	65	73	65
0	15	5	60	55	70	65	70	65
	20	6	60	53	68	65	70	65
	25	8	60	53	68	63	70	65
	30	9	60	51	68	63	70	65
5	15	8	60	53	68	63	70	65
	20	10	60	50	65	60	70	65
	25	11	58	50	65	60	70	65
	30	13	58	50	65	60	70	65
10	15	11	58	50	65	58	70	65
	20	13	58	50	65	58	70	65
	25	14	55	50	65	55	70	65
	30	16	55	50	65	55	70	65
15	20	17	52	48	63	55	68	65
	25	18	52	48	63	55	68	63
	30	20	50	45	62	53	65	63
	35	21	50	45	60	50	65	60

влажность атмосферного воздуха до 45 %, при которой равновесная влажность зерна не превысит исходную.

Обсуждение и заключение

Выполнить безопасное активное вентилирование зерна возможно при различных вариантах технологии.

В первом варианте для каждой зерновой культуры и габаритных размеров силоса необходим вентилятор, аэродинамическая характеристика которого соответствует аэродинамике зерновой культуры, заложенной на хранение. Такая технологическая схе-

ма создает ряд неудобств в эксплуатации и повышает капитальные и текущие затраты. Неудобства заключаются в том, что в процессе подготовки зернохранилищ к приемке нового урожая не представляется возможным прогнозировать номенклатуру и количество по каждой зерновой культуре. Капитальные затраты на приобретение дополнительного вентиляционного оборудования и текущие на приобретение запасных частей более широкой номенклатуры увеличатся.

Во втором варианте на каждый силос устанавливаются одинаковые вентиляторы, обеспечивающие безопасное вентилирование зерновой культуры, имеющей аэродинамическую характеристику с максимальными параметрами. Для вентилирования зерна с меньшими аэродинамическими параметрами дросселируют воздуховоды от вентилятора. Этот вариант имеет повышенные затраты электроэнергии, которые возрастут в несколько раз. Использовать такую технологию в практике нецелесообразно.

В третьем варианте предлагается технология подготовки воздуха (охлаждение, подсушивание), нагнетаемого в зерновую массу, до кондиций, исключающей образование конденсата [16–18]. Эта технология энергоемка и ее целесообразно использовать во влажном и жарком климате.

Авторы предлагают вариант – регулировать количество нагнетаемого воздуха изменением массы вентилируемого зерна. Этот способ не требует затрат, но требует знаний по управлению воздушным потоком. Чем меньше масса зерна, тем больше расход воздуха. Устанавливается объем воздуха, при котором в наиболее нагруженной центральной части силоса обеспечивается критическая скорость фильтрации.

Предлагаемая технология активного вентилирования зерна в метал-

лических силосах заключается в следующем:

1. Металлические силосы оборудуют контрольно-измерительным прибором давления воздуха. Снаружи, как показано на рисунке 1, устанавливают дифманометр, например ДНМП, для измерения перепада давления воздуха в слое зерна толщиной 3 м. Нижняя точка отбора давления расположена на расстоянии не менее 1 м от днища силоса.

2. По таблице 4 определяются предельные параметры наружного воздуха для вентилирования зерна. При достижении этих параметров в окружающем воздухе вентилируется зерновая масса. Если требуется вентилирование воздухом, имеющим относительно влажность больше предельно допустимого значения в таблице 4, то возможно оценить повышение влажности зерна по следующей формуле:

$$\Delta W = 5 \cdot 10^{-4} \cdot (\varphi_{\phi} - \varphi_{\text{д}}) \cdot \Delta T \cdot e^{0,07t},$$

где ΔW – приращение влажности зерна, %; φ_{ϕ} – фактическая относительная влажность атмосферного воздуха, %; $\varphi_{\text{д}}$ – допустимая относительная влажность (из таблицы 4), %; ΔT – разность температур зерна и атмосферного воздуха, °C; t – температура атмосферного воздуха, °C.

Допускается повышение влажности в пределах погрешности измерения, не более 0,5 %.

3. Вычисляется по формуле (4) значение средневзвешенной скорости фильтрации воздуха. Затем – перепад давления в слое толщиной 3 м по следующей формуле:

$$\Delta P = 29\,430 \cdot A \cdot \bar{v}^n, \quad (7)$$

где ΔP – перепад давления воздуха в слое толщиной 3 м, Па.

4. Вентилятор включается вручную. Если перепад давления на дифмано-

метре покажет значение меньше вычисленного по формуле (7), то уменьшается масса зерна в силосе. Зерно выгружается в оперативную емкость (предусмотренную в технологической схеме) или в свободный силос до тех пор, пока показание на дифманометре не совпадет с вычисленным значением. В этом случае в зерновую массу будет подаваться объем воздуха, обеспечивающий критическую скорость фильтрации в центральной части силоса и гарантированный вынос влаги за его пределы.

5. При опасности возникновения самосогревания зерновой массы ее вентилирование осуществляется при любых погодных условиях. Учитывая ранее рассмотренный случай самосогревания, и с целью исключения человеческого фактора целесообразно систему мониторинга температуры внутри зерновой массы оборудовать сигнализацией или устройством автоматического включения вентиляторов. Эти устройства должны включаться при повышении температуры на 7°C и более в течение 2–3 суток на двух и более датчиках.

Технология вентилирования надзернового пространства заключается в определении времени включения осевых (под крышей) вентиляторов и продолжительности их работы. Вентилирование в надзерновом пространстве необходимо осуществлять в периоды насыщения влагой воздуха. Включение вентиляторов позволит не только исключить конденсат, но интенсифицировать процесс охлаждения и снизить затраты. Мощность осевого вентилятора не более 1,5 кВт, мощность венти-

лятора для активного вентилирования не менее 18 кВт. Количество осевых вентиляторов, как правило, равно количеству нагнетающих.

Согласно результатам исследований, приведенным выше, максимальное насыщение воздуха влагой происходит в периоды повышения температуры над зерном. Вентиляторы должны включаться и выключаться автоматически при достижении следующих соотношений температур внутри силоса и снаружи.

1. Включаются вентиляторы при превышении температуры внутри силоса относительно температуры снаружи не менее чем на 7°C .

2. Выключаются вентиляторы при установлении разности температур не более 4°C .

Для внедрения технологий управления воздушными потоками внутри металлических силосов требуется выполнить дополнительно следующие исследования и разработки.

1. Исследовать процесс сорбции и десорбции зерном влаги в динамическом режиме вентилирования при скоростях фильтрации воздуха не более 0,05 м/с. Имеются данные единичных опытов в этом диапазоне скоростей воздуха⁴ [19].

2. Экспериментально определить минимальную скорость фильтрации, обеспечивающую гарантированный унос влаги из надзернового пространства (критическую скорость).

3. Разработать и испытать в производственных условиях блок управления осевыми (крышными) вентиляторами.

⁴ Сорочинский В. Ф. Кинетика охлаждения зерна после сушки на установках активного вентилирования // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сборник научных статей первых Международных Лыковских научных чтений (22–23 сентября 2015 г.). Курск: Университетская книга, 2015. С. 230–235.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Фейденгольд, В. Б.** Потребность России в зернохранилищах. Экспертная оценка / В. Б. Фейденгольд. – DOI 10.25741/2413-287X-2019-06-2-071 // Комбикорма. – 2019. – № 6. – С. 82–86. – URL: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/06_19/06_2019_30-34.pdf (дата обращения: 20.04.2020). – Рез. англ.
2. **Kumar, D.** Reducing Postharvest Losses during Storage of Grain Crops to Strengthen Food Security in Developing Countries / D. Kumar, P. Kalita. – DOI 10.3390/foods6010008 // Foods. – 2017. – Vol. 6, Issue 8. – Pp. 1–22. – URL: <https://www.mdpi.com/2304-8158/6/1/8> (дата обращения: 20.04.2020).
3. **Carrera-Rodríguez, M.** Transient Numerical Study of the Effect of Ambient Temperature on 2-D Cereal Grain Storage in Cylindrical Silos / M. Carrera-Rodríguez, G. M. Martínez-González, J. L. Navarrete-Bolaños. – DOI 10.1016/j.jspr.2011.01.006 // Journal of Stored Products Research. – 2011. – Vol. 47, Issue 2. – Pp. 106–122. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022474X11000166?via%3Dihub> (дата обращения: 20.04.2020).
4. **Hammami, F.** Modelling and Simulation of Heat Exchange and Moisture Content in a Cereal Storage Silo / F. Hammami, S. B. Mabrouk, A. Mami. – DOI 10.1080/13873954.2016.1157823 // Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems. – 2016. – Vol. 22, Issue 3. – Pp. 207–220. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13873954.2016.1157823> (дата обращения: 20.04.2020).
5. **Patent No. 8720079 USA, B2.** Modular Aeration Assembly for Grain Bins : No. 20120047762 : appl. 26.08.2010 : publ. 13.05.2014 / Neufeld J., Thiessen B. ; assignee Woodhaven Capital Corp. – URL: <https://patents.justia.com/patent/8720079> (дата обращения: 20.04.2020).
6. **Chen, S.** The Experimental Research on Grain Storage Heat and Moisture Transfer / S. Chen, W. Wu, Y. Xu [et al.] // International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics (AMEII 2015). – 2015. – Pp. 28–33. – URL: https://scholar.google.com/scholar?hl=ru&as_sdt=0%2C5&q=The+Experimental+Research+on+Grain+Storage+Heat+and+Moisture+Transfer+&btnG= (дата обращения: 20.04.2020).
7. **Olatunde, G.** CFD Modeling of Air Flow Distribution in Rice Bin Storage System with Different Grain Mass Configurations / G. Olatunde, G. G. Atungulu, S. Sadaka. – DOI 10.1016/j.biosystem-seng.2016.09.007 // Biosystems Engineering. – 2016. – Vol. 151. – Pp. 286–297. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1537511016301507?via%3Dihub> (дата обращения: 20.04.2020).
8. **Binelo, M. O.** Airflow Simulation and Inlet Pressure Profile Optimization of a Grain Storage Bin Aeration System / M. O. Binelo, V. Faoro, O. A. Kathatourian [et al.]. – DOI 10.1016/j.compag.2019.104923 // Computers and Electronics in Agriculture. – 2019. – Vol. 164. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169919307483?via%3Dihub> (дата обращения: 20.04.2020).
9. **Разворотнев, А. С.** Оценка эффективности металлических силосов по удельным расходам электроэнергии на вентилирование зерна различных культур / А. С. Разворотнев, Ю. Д. Гавриченко. – DOI 10.32462/0235-2508-2018-0-10-53-55 // Хлебопродукты. – 2018. – № 10. – С. 53–55. – URL: <https://www.khlebpod.ru/293-zhurnaly-2018/10-18/3492-otsenka-effektivnosti-metallicheskih-silosov-po-udelnyim-raskhodam-elektroenergii-na-ventilirovanie-zerna-razlichnykh-kultur> (дата обращения: 20.04.2020).
10. **Lopes, D. C.** Comparison of Equilibrium Models for Grain Aeration / D. C. Lopes, A. J. S. Neto, R. V. Júnior. – DOI 10.1016/j.jspr.2014.11.001 // Journal of Stored Products Research. – 2015. – Vol. 60. – Pp. 11–18. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022474X14001143> (дата обращения: 20.04.2020).
11. **Panigrahi, S. S.** Effect of Mediterranean Climatic Condition during Aeration and Silo Wall Coating in On-Farm Grain Storage in South Australia / S. S. Panigrahi, Ch. B. Singh, J. M. Fielke. – DOI 10.13031/aim.201900976 // American Society of Agricultural and Biological Engineers. – 2019. – URL: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=50535> (дата обращения: 20.04.2020).
12. **Разворотнев, А. С.** Управление воздушными потоками внутри металлического силоса при хранении зерна / А. С. Разворотнев, Ю. Д. Гавриченко. – DOI 10.32462/0235-2508-2019-28-11-60-63 // Хлебопродукты. – 2019. – № 11. – С. 60–63. – URL: <https://khlebpod.ru/329-zhurnaly-2019->



года/11-19/3995-upravlenie-vozdushnymi-potokami-vnutri-metallicheskogo-silosa-pri-khranении-zerna (дата обращения: 20.04.2020). – Рез. англ.

13. **Разворотнев, А. С.** Режимы хранения и вентилирования зерна пшеницы в металлических силосах большой вместимости / А. С. Разворотнев, Ю. Д. Гавриченко, И. А. Кечкин // Хлебопродукты. – 2017. – № 11. – С. 57–59. – URL: <https://khlebprod.ru/260-zhurnaly-2017/11-17/3032-rezhimy-khraneniya-i-ventilirovaniya-zerna-pshenitsy-v-metallicheskih-silosakh-bolshoj-vmestimosti> (дата обращения: 20.04.2020). – Рез. англ.

14. **Gavrichenkov, Yu. D.** Change of the Acid Number of Wheat Grain Fat While Stored in Laboratory Conditions / Yu. D. Gavrichenkov, A. S. Razvorotnev, I. A. Kechkin [et al.]. – DOI 10.21323/2618-9771-2019-2-2-27-30 // Food Systems. – 2019. – Vol. 2, Issue 2. – Pp. 27–30. – URL: <https://www.fs-jour.com/jour/article/view/38> (дата обращения: 20.04.2020).

15. **Navarro, Sh.** The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management / Sh. Navarro, R. T. Noyes. – Boca Raton : CRC Press, 2001. – 672 p.

16. **Francisco, N.-M.** Simulation of the Temperature of Barley during Its Storage in Cylindrical Silos / N.-M. Francisco. – DOI 10.1016/j.matcom.2018.09.004 // Mathematics and Computers in Simulation. – 2019. – Vol. 157. – Pp. 1–14. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378475418302143> (дата обращения: 20.04.2020).

17. **Patent No. 9885520 USA, B1.** Grain Conditioning System and Methodology : appl. 03.08.2016 : publ. 06.02.2018 / Abbasi Sh. ; assignee Agplexus LLC. – URL: <https://patents.google.com/patent/US9885520B1/en> (дата обращения: 20.04.2020).

18. **Bradna, J.** The Impact of Weather Conditions on Microclimate in Storage Facilities / J. Bradna, J. Šimon, D. Hájek [et al.]. – DOI 10.15159/AR.18.178 // Agronomy Research. – 2018. – Vol. 16, Issue 4. – Pp. 1580–1589. – URL: <https://dspace.emu.ee/xmlui/handle/10492/4418> (дата обращения: 20.04.2020).

19. **Сорочинский, В. Ф.** Изменение температуры пристенного слоя зерна в металлических элеваторах / В. Ф. Сорочинский // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2016. – № 4. – С. 13–16. – URL: <https://vniiz.org/science/publication/article-151> (дата обращения: 20.04.2020).

Поступила 09.10.2019; принята к публикации 06.12.2019; опубликована онлайн 30.06.2020

Об авторах:

Разворотнев Александр Сергеевич, старший научный сотрудник ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт зерна и продуктов его переработки» (127434, Россия, г. Москва, Дмитровское ш., д. 11), кандидат технических наук, доцент, Researcher ID: AAN-1423-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3957-041X>, razvorotnev.ac@gmail.com

Гавриченко Юрий Дмитриевич, старший научный сотрудник ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт зерна и продуктов его переработки» (127434, Россия, г. Москва, Дмитровское ш., д. 11), кандидат технических наук, доцент, Researcher ID: AAG-8142-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5590-8997>, gavrud@bk.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. С. Разворотнев – анализ литературных данных, редактирование текста; Ю. Д. Гавриченко – анализ литературных данных, постановка задачи исследования, обработка данных, написание текста статьи.

Благодарности: Авторы выражают благодарность доктору технических наук В. Ф. Сорочинскому за оказанную помощь в выборе направления исследований и главному технологу ЗАО «БиоТехнологии» Г. Д. Диковой за помощь в проведении исследований в производственных условиях.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Feydengold V.B. Russia's Need for Grain Storage Facilities. Expert Assessment. *Kombikorma* = Compound Feeds. 2019; (6):82-86. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25741/2413-287X-2019-06-2-071>
2. Kumar D., Kalita P. Reducing Postharvest Losses during Storage of Grain Crops to Strengthen Food Security in Developing Countries. *Foods*. 2017; 6(8):1-22. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/foods6010008>
3. Carrera-Rodríguez M., Martínez-González G.M., Navarrete-Bolaños J.L. Transient Numerical Study of the Effect of Ambient Temperature on 2-D Cereal Grain Storage in Cylindrical Silos. *Journal of Stored Products Research*. 2011; 47(2):106-122. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2011.01.006>
4. Hammami F., Mabrouk S.B., Mami A. Modelling and Simulation of Heat Exchange and Moisture Content in a Cereal Storage Silo. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. 2016; 22(3):207-220. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/13873954.2016.1157823>
5. Modular Aeration Assembly for Grain Bins: Patent 8720079 USA. No. 20120047762; appl. 26.08.2010; publ. 13.05.2014. Available at: <https://patents.justia.com/patent/8720079> (accessed 20.04.2020). (In Eng.)
6. Chen S., Wu W., Xu Y., et al. The Experimental Research on Grain Storage Heat and Moisture Transfer. In: International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics (AMEII 2015). 2015. Pp. 28-33. Available at: https://scholar.google.com/scholar?hl=ru&as_sdt=0%2C5&q=The+Experimental+Research+on+Grain+Storage+Heat+and+Moisture+Transfer+&btnG= (accessed 20.04.2020). (In Eng.)
7. Olatunde G., Atungulu G.G., Sadaka S. CFD Modeling of Air Flow Distribution in Rice Bin Storage System with Different Grain Mass Configurations. *Biosystems Engineering*. 2016; 151:286-297. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.09.007>
8. Binelo M.O., Faoro V., Kathatourian O.A., et al. Airflow Simulation and Inlet Pressure Profile Optimization of a Grain Storage Bin Aeration System. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019; 164. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104923>
9. Razvorotnev A.S., Gavrichenkov Yu.D. Evaluation of Metal Silos Efficiency in Terms of Specific Power Consumption for Grain Ventilation of Different Crops. *Khleboпродукты* = Bakery Products; 2018; (10):53-55. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.32462/0235-2508-2018-0-10-53-55>
10. Lopes D.C., Neto A.J.S., Júnior R.V. Comparison of Equilibrium Models for Grain Aeration. *Journal of Stored Products Research*. 2015; 60:11-18. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2014.11.001>
11. Panigrahi S.S., Singh Ch.B., Fielke J.M. Effect of Mediterranean Climatic Condition during Aeration and Silo Wall Coating in On-Farm Grain Storage in South Australia. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2019. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.13031/aim.201900976>
12. Razvorotnev A.S., Gavrichenkov Yu.D. Air Flow Control inside the Metal Silo during Grain Storage. *Khleboпродукты* = Bakery Products. 2019; (11):60-63. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.32462/0235-2508-2019-28-11-60-63>
13. Razvorotnev A.S., Gavrichenkov Yu.D., Kechkin I.A. Modes of Storage and Ventilation of Wheat Grain in Metal Silos of Large Capacity. *Khleboпродукты* = Bakery Products. 2017; (11):57-59. Available at: <https://khlebpod.ru/260-zhurnaly-2017/11-17/3032-rezhimy-khraneniya-i-ventilirovaniya-zerna-pshenitsy-v-metallicheskih-silosakh-bolshoj-vmestimosti> (accessed 20.04.2020). (In Russ.)
14. Gavrichenkov Yu.D., Razvorotnev A.S., Kechkin I.A., et al. Change of the Acid Number of Wheat Grain Fat While Stored in Laboratory Conditions. *Food Systems*. 2019; 2(2):27-30. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2019-2-2-27-30>
15. Navarro Sh., Noyes R.T. The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management. Boca Raton: CRC Press; 2001. 672 p. (In Eng.)
16. Francisco N.-M. Simulation of the Temperature of Barley during Its Storage in Cylindrical Silos. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2019; 157:1-14. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2018.09.004>



17. Grain Conditioning System and Methodology: Patent 9885520 USA. Appl. 03.08.2016; publ. 06.02.2018. Available at: <https://patents.google.com/patent/US9885520B1/en> (accessed 20.04.2020). (In Eng.)

18. Bradna J., Šimon J., Hájek D., et al. The Impact of Weather Conditions on Microclimate in Storage Facilities. *Agronomy Research*. 2018; 16(4):1580-1589. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15159/AR.18.178>

19. Sorochinskiy V.F. Change of Temperature of the Wall Layer of Grain in Metal Elevators. *Khranenie i pererabotka sel'hozsyrya* = Storage and Processing of Farm Products. 2016; (4):13-16. Available at: <https://vniiz.org/science/publication/article-151> (accessed 20.04.2020). (In Russ.)

Received 09.10.2019; revised 06.12.2019; published online 30.06.2020

About the authors:

Alexandr S. Razvorotnev, Senior Researcher of All-Russian Research Institute of Grain and Its Processing Products (11 Dmitrovskoye Shosse, Moscow 127434, Russia), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Researcher ID: AAH-1423-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3957-041X>, razvorotnev.ac@gmail.com

Yuri D. Gavrichenkov, Senior Researcher of All-Russian Research Institute of Grain and Its Processing Products (11 Dmitrovskoye Shosse, Moscow 127434, Russia), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Researcher ID: AAG-8142-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5590-8997>, gavrud@bk.ru

Contribution of the authors:

A. S. Razvorotnev – literature analysis, text editing; Yu. D. Gavrichenkov – literary data analysis, scientific guidance, data processing, article writing.

Acknowledgements: The authors would like to thank V. F. Sorochinskiy, D.Sc. in Engineering, for his assistance in choosing the research direction and the Chief Technologist of the BioTechnologies company G. D. Dikova for her help in conducting research in industrial conditions.

All authors have read and approved the final manuscript.



Влияние аэрозольной обработки гуминовыми препаратами на посевные качества семян зерновых культур

О. А. Тетерина¹, В. С. Тетерин^{2*}, С. В. Митрофанов²,
М. Ю. Костенко¹, Г. К. Рембалович¹, Н. Н. Новиков²

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

²ИТОСХ – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (г. Рязань, Россия)

*labio-giant@mail.ru

Введение. По прогнозам экспертов в ближайшие годы рост мирового рынка органической продукции будет продолжаться со скоростью 15–16 % в год и составит к 2025 году порядка 20 % от мирового рынка всей сельскохозяйственной продукции. В связи с этим интерес вызывает разработка элементов агротехнологий по использованию почвоулучшающих веществ и регуляторов роста естественного происхождения, в том числе гуминовых препаратов, позволяющих получать достаточно высокие урожаи сельскохозяйственной продукции.

Материалы и методы. Были исследованы способы применения гуминовых препаратов. Объектами лабораторных исследований являлись семена ячменя ярового. Препараты применялись как с использованием традиционного полусухого метода, так и с помощью разработанного оборудования для обработки семян горячим туманом. Проращивание семян в лабораторных условиях осуществлялось согласно ГОСТу 12038-84. Данные лабораторных исследований подвергались математической обработке методом дисперсионного анализа.

Результаты исследования. Полученные результаты свидетельствуют о том, что обработка семян гуматами способствовала повышению посевных качеств независимо от способа обработки семян. Однако сравнительный анализ эффективности применения при предпосевной обработке семян тест-культуры аэрозоля и традиционного полусухого метода показал, что использование разработанного оборудования позволило повысить биологическую активность гуминовых препаратов, что привело к увеличению силы роста и биометрических показателей проростков.

Обсуждение и заключение. Обработка семян ячменя ярового гуминовыми препаратами оказывает положительный эффект на посевные и урожайные качества семян. Наиболее сильный положительный результат получен при обработке семенного материала с низкими посевными качествами, который получают при уборке семенных участков в годы с неблагоприятными условиями: дефицит тепла, обильные осадки, а также нарушение технологий уборки и подготовки семян. Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что применение разработанного устройства для обработки семян горячим туманом позволяет снизить энергетические затраты и увеличить эффективность обработки.

Ключевые слова: аэрозольная обработка, горячий туман, гуминовые препараты, гуматы, посевные качества семян, предпосевная обработка, устройство для обработки семян



Для цитирования: Тетерина, О. А. Влияние аэрозольной обработки гуминовыми препаратами на посевные качества семян зерновых культур / О. А. Тетерина, В. С. Тетерин, С. В. Митрофанов [и др.]. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202002.254-267 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 2. – С. 254–267.

The Effect of Humic Aerosol Treatment on Grain Seeds Quality

**O. A. Teterina^a, V. S. Teterin^{b*}, S. V. Mitrofanov^b,
M. Yu. Kostenko^a, G. K. Rembalovich^a, N. N. Novikov^b**

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

^b*Institute of Agricultural Technical Support – Branch of Federal
Scientific Agroengineering Center VIM (Ryazan, Russia)*

**labio-giant@mail.ru*

Introduction. According to experts, in the coming years, the world market of organic products will continue to grow at a rate of 15-16% per year. The growth will equal about 20% of the world market of all agricultural products by 2025. In this connection, of a particular interest is the development of elements of agricultural technologies for the use of soil-improving substances and growth regulators of natural origin, including humic preparations, which provide for sufficiently high yields of agricultural products.

Materials and Methods. The methods of using humic preparations were investigated on the example of spring barley seeds, treated with the traditional semi-dry method and using hot mist. Germination of seeds in the laboratory was carried out according to the Russian State Standard GOST 12038-84. The laboratory data were subjected to mathematical processing by the method of variance analysis.

Results. The treatment of seeds with humic preparations led to an increase in sowing qualities, regardless of the method of seed treatment. However, the comparative efficiency analysis of the pre-sowing treatment of the test crop seeds with the aerosol and using the semi-dry method showed that the use of the developed equipment made it possible to increase the biological activity of humic preparations, which brought about an increase in the growth and biometric parameters of seedlings.

Discussion and Conclusion. The treatment of spring barley seeds with humic preparations has some positive effect on their sowing and yield qualities. The strongest positive effect was obtained when treating seeds with reduced sowing qualities, which was quite often observed when harvesting seed crops in years with unfavorable conditions: heavy rainfall, lack of heat, as well as in violation of the technology of harvesting and preparing seeds. Our experimental studies showed that the use of the developed device for treating seeds with hot mist reduces energy costs and increases processing efficiency.

Keywords: aerosol treatment, hot mist, humic preparations, humates, seed quality, seedbed preparation, seed treatment device

For citation: Teterina O.A., Teterin V.S., Mitrofanov S.V., et al. The Effect of Humic Aerosol Treatment on Grain Seeds Quality. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(2):254-267. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.254-267>

Введение

В настоящее время развитию сельского хозяйства в России уделяется большое внимание, в частности повы-

шению эффективности производства и улучшению качества производимой сельскохозяйственной продукции, основываясь на принципах всесторонней

интенсификации технологических процессов, с созданием и использованием нового высокотехнологичного оборудования с целью повышения урожайности сельскохозяйственных культур.

Стоит отметить, что в последнее время резко возрос спрос на экологически чистую продукцию. В результате этого в мире активное развитие получили предприятия, специализирующиеся на получение так называемой «органической продукции». По прогнозам экспертов в ближайшие годы рост мирового рынка органической продукции будет продолжаться со скоростью 15–16 % в год и составит к 2025 году порядка 20 % от мирового рынка всей сельскохозяйственной продукции¹.

Россия, с точки зрения развития данного вида земледелия, имеет высокий потенциал, так как на сегодняшний день наша страна имеет более 30 млн залежных земель, которые длительное время не использовались, а значит, в них не вносились химические удобрения и средства защиты растений.

Однако переход на органическое сельское хозяйство требует решения проблемы обеспечения питания растений при производстве сельскохозяйственной продукции, так как согласно Федеральному закону № 280-ФЗ², а также ГОСТу Р 56508-2015³ запрещено использовать агрохимикаты и пестициды, в том числе минеральные удобрения, синтетические гербициды, фунгициды, инсектициды и т. д., что в свою очередь неизбежно приведет к снижению урожайности возделываемых культур и деградации почв.

Ввиду этого особый интерес вызывает разработка элементов агротехнологий по использованию почвоулучшающих веществ и регуляторов роста естественного (природного) происхождения, в том числе гуминовых кислот и препаратов на их основе, позволяющих получать более высокие урожаи сельскохозяйственной продукции [1; 2].

Обзор литературы

Гуминовые препараты представляют собой естественные высокомолекулярные стимуляторы роста растений на основе солей гуминовых кислот. Гуминовые кислоты в естественных условиях образуются в почве в результате разложения клетчатки растений и других органических остатков. В настоящее время разработаны промышленные технологии производства гуматов из различных видов органического сырья (торф, бурый уголь, сапропель, биогумус и др.). Включение данных препаратов в технологии возделывания сельскохозяйственных культур позволяет ускорить процессы формирования, развития и роста различных растений [3; 4].

Гуминовые вещества могут вступать в широкий спектр реакций, они образуют водорастворимые и водонерастворимые комплексы с гидроксидами и ионами металлов, взаимодействуют с различными органическими и минеральными соединениями, в том числе с алканами, жирными кислотами, диалкилфталатами, а также пестицидами и т. д. Ввиду этого гуминовые вещества принято использовать в целях рекультивации водных и почвенных сред в качестве детоксикантов природного про-

¹ Органическое земледелие: перспективы и реальность // Ресурсосберегающее земледелие. 14.08.2018. URL: <http://rosorganic.ru/about/press/organic-farming-prospects-and-reali.html> (дата обращения: 08.04.2020).

² Об органической продукции и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федер. закон Рос. Федерации от 3 августа 2018 г. № 280-ФЗ: принят Гос. Думой Федер. Собр. Рос. Федерации 25 июля 2018 г.: одобр. Советом Федерации Федер. Собр. Рос. Федерации 28 июля 2018 г. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_304017/989cf3df49885e3a23aeb0264619ff37b9c8b959/ (дата обращения: 08.04.2020).

³ ГОСТ Р 56508-2015. Продукция органического производства. Правила производства, хранения, транспортирования.

исхождения без риска их вторичного загрязнения [5; 6].

Известно, что гуминовые кислоты занимают важную роль в структурообразовании почвы, способствуют регулированию геохимических потоков металлов в водных и почвенных экосистемах, накоплению питательных веществ и микроэлементов в доступной для растений форме [4; 7].

Гуминовые вещества обладают ярко выраженной биологической активностью, что дает возможность использовать их в качестве стимуляторов роста растений. По данным исследований, они легко усваиваются растениями, мобилизуют работу их иммунных систем, способствуют поступлению питательных веществ, усиливают обменные процессы, происходящие в растительных клетках, а также стимулируют развитие всех почвенных микроорганизмов, тем самым способствуя восстановлению (образованию) гумуса в почвах⁴ [8–10].

Применение гуминовых препаратов способствует повышению урожайности сельскохозяйственных культур, особенно при неблагоприятных климатических условиях. Они оказывают поддержку растениям, помогая им справиться с последствиями засухи, заморозков, а также позволяя снизить химический стресс от обработки пестицидами. Гуматы повышают устойчивость растений к различным заболеваниям, тем самым являясь неспецифическими активаторами иммунной системы [9–12].

Спектр применения гуминовых препаратов весьма широк и включает практически все сельскохозяйственные культуры, возделываемые как в малых крестьянско-фермерских хозяйствах, так и в крупных аграрных предприятиях [13; 14]. В связи с этим гуминовые препараты используют различными

способами: в качестве некорневой подкормки, во время обработки посевного материала и путем внесения в почву в виде растворов, в том числе во время послеуборочной заделки пожнивных остатков [15].

При производстве сельскохозяйственной продукции важным агротехнологическим приемом является предпосевная обработка семян, которая способствует повышению качества посевного материала и увеличению урожайности зерновых культур. На основании исследований ученых установлено, что физические методы обработки семян способствуют повышению всхожести и энергии прорастания. В качестве физического воздействия изучалось влияние электромагнитных волн в микроволновом, ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах, а также нагрев семян путем низкоинтенсивного локального лазерного излучения. Однако воздействие электромагнитных волн зачастую оценивалось в нагреве семян. Кроме этого, с целью активизации физиологических процессов семян применяют методы естественного воздушно-теплого обогрева⁵ [16].

По данным ряда ученых, обработка гуминовыми препаратами ослабляет отрицательное значение травматических повреждений семян растений, улучшает посевные качества семян: лабораторную и полевую всхожесть семян, энергию прорастания, стимулирует рост и развитие проростков первичной корневой системы, снижая при этом поражение семян грибными заболеваниями, возникающими в результате внутренней семенной инфекции [17].

Эффективность воздействия гуминовых препаратов в процессе предпосевной обработки в определенной степени зависит от технологии и тех-

⁴ Биодобавки для роста растений и рекультивации почв. Экспертный подход к выбору и применению / А. Ю. Винаров [и др.]. М.: ДеЛи принт, 2006. 150 с.

⁵ Жалнин Э. В., Шибряева Л. С., Садыкова С. Ж. Влияние воздействия разных видов излучений на зерновой материал: научная монография. Алматы-Москва: Агроуниверситет, 2015. 119 с.

нических средств, применяемых при ее проведении. В настоящее время в основном используются протравливатели семян с вращающимися форсунками с дисперсностью каплей от 30 до 120 мкм. Уменьшение дисперсности капель, активное перемешивание семян, а также тепловое воздействие способно усилить эффект от применения гуминовых препаратов в процессе обработки семян. С этой целью было разработано устройство для обработки семян горячим туманом (рис. 1) [18].

Материалы и методы

С целью определения эффективного способа предпосевной обработки семян гуминовыми препаратами по влиянию на их посевные качества были проведены экспериментальные исследования.

Объектами лабораторных исследований являлись семена ячменя ярового сортов: «Владимир», «Маргрет», гибридная линия «Аннабель × Эльф», «Зазерский 85».

На фоне контрольного варианта применялось два гуминовых препарата: «Экорост» и «АгроВерм» (табл. 1). Препараты применялись как с использованием традиционного полусухого метода (протравливатель ПС-10), так и с помощью разработанного оборудования для обработки семян горячим туманом. Гуминовые препараты имели разные показатели по содержанию гуминовых веществ и кислотности, дозы брались с учетом рекомендаций производителей. Также использовалась обработка семян горячим туманом.

Проращивание семян осуществлялось между фильтровальной бумагой в лабораторных условиях в соответствии с пунктом 3.8.2. ГОСТа 12038-84⁶. Семена раскладывались в растильнях в четырехкратной повторности по 100 шт между слоями увлажненной фильтровальной бумаги: три слоя на дне растильни, одним слоем прикрывались семена. Данные лабораторных

Т а б л и ц а 1
Table 1

Схема лабораторного опыта
Laboratory experiment char

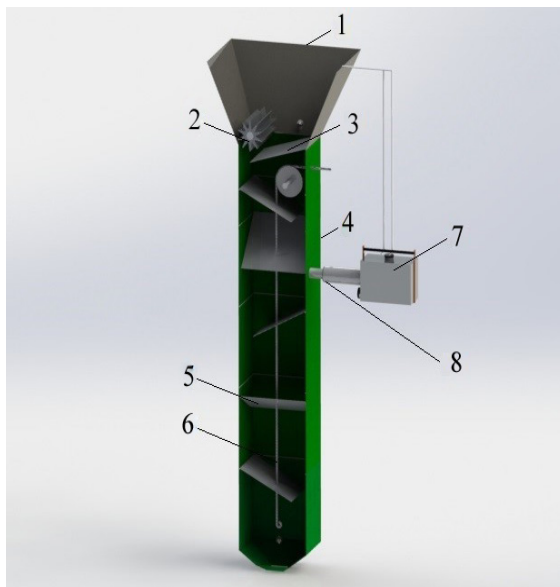
Показатель / Parameter	Контроль / Control	«Экорост» / “Ecorost”	«АгроВерм» / “AgroVerm”	Пар (вода) / Steam (water)	«Экорост» (пар) / “Ecorost” (steam)	«АгроВерм» (пар) / “AgroVerm” (steam)
Кислотность рН сол., ед. рН / Acidity pH sol., unit pH	—	8,1	8,5	—	8,1	8,5
Содержание гуминовых кислот, г/л / Content of humic acids, g/l	—	30	12	—	30	12
Дозы гуминовых препаратов в расчете на 1 т семян, мл / Doses of humic preparations per 1 ton of seeds, ml	—	200	200	—	200	200

⁶ ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести (с Изменениями № 1, 2).

исследований подвергались математической обработке с использованием надстройки к Excel для статистической оценки и анализа результатов полевых и лабораторных опытов AgCSTAT, разработанной ФГБНУ «Ставропольский научно-исследовательский институт сельского хозяйства».

Устройство для обработки семян горячим туманом представлено на рисунке 1 и состоит из бункера для семян 1, дозирующего аппарата с приводным ребристым валиком 2 и с подвижным днищем 3, смесительной камеры 4 с наклонными лотками 5 и механизмом регулировки угла лотков 6, генератора горячего тумана 7 марки BF-150. Разработанное устройство имеет следующие технические характеристики: производительность по зерну до 10 т/ч, расход рабочего раствора до 5 л/ч, расход топлива до 2 л/ч, удельный расход рабочего раствора до 0,5 л/т.

В процессе работы устройства для обработки семян горячим туманом семена из бункера 1 попадают в пространство между ребристым валиком 2 и подвижным днищем 3. Дозированные семена поступают в камеру обработки 4, где движутся по наклонным лоткам 5, образуя нисходящий поток, увлекая за собой теплый поток аэрозоля гуминовых препаратов температурой 50–60 °С, подаваемый генератором горячего тумана 7 через сопло 8. При движении зерна в камере 4 для обработки семян горячим туманом зерно под действием силы тяжести многократно пересыпается с одного наклонного лотка 5 на другой, проводя некоторое время в свободном полете. Благодаря такой схеме подачи семян, многократному их перемешиванию и контакту с аэрозолем гуминовых препаратов при пересыпании с лотка на лоток эффективность обработки возрастает. В ре-



Р и с. 1. Модель устройства для обработки семян горячим туманом: 1 – бункер; 2 – приводной ребристый валик; 3 – подвижное днище бункера; 4 – смесительная камера; 5 – наклонные лотки; 6 – механизм регулировки угла лотков; 7 – генератор горячего тумана; 8 – сопло генератора

F i g. 1. Model of the device for treating seeds with hot mist: 1 – bin; 2 – driving ribbed roll; 3 – moving bin bottom; 4 – mixing chamber; 5 – inclined trays; 6 – tray angle adjustment mechanism; 7 – hot mist generator; 8 – generator nozzle

зультате разницы температур холодных семян ($\approx 12^{\circ}\text{C}$) и аэрозоля (более 50°C) происходит фазовый переход аэрозоля в жидкость, что способствует образованию на поверхности семян тонкой пленки гуминовых препаратов. Высокая температура аэрозоля обеспечивает тепловую обработку семян и способствует активации физиологических процессов зерна.

В связи с тем, что эффективность аэрозольной обработки семян рабочим раствором гуминовых препаратов зависит от интенсивности теплообменных процессов, проходящих в смесительной камере протравливания установки в процессе обработки семян, оценивались скорость и температура аэрозоля рабочего раствора гуминовых препаратов при помощи термоанемометра марки ИСП–МГ4 (рис. 2).

Качество обработки семян аэрозолем рабочего раствора гуминовых пре-

паратов определялось путем исследования температуры и влажности зерна на выходе из смесительной камеры. Для контроля температуры зерна и аэрозоля гуминовых препаратов применялся тепловизор марки RGK TL-80, определение влажности проводилось при помощи влагомера зерна WILE 55.

Результаты исследования

Экспериментальные исследования проводились при температуре окружающего воздуха около $+12^{\circ}\text{C}$, влажность воздуха составляла около 62 %, зерно имело начальную температуру $+12^{\circ}\text{C}$, влажность составляла 13,5 %. Установка для обработки семян горячим туманом работала с производительностью около 10 т/ч, расход топлива генератора горячего тумана составлял 40 г/мин, дозирование водного раствора гуминовых препаратов осуществлялось изменением подачи раствора в форсунку.



Р и с. 2. Исследование параметров горячего тумана на различных участках камеры обработки устройства

F i g. 2. Investigation of the parameters of hot mist at different areas of the device processing chamber

Таблица 2
Table 2

Влияние способов обработки гуминовыми препаратами на посевные качества семян различных сортов ячменя ярового

Influence of methods of treatment with humic preparations on sowing qualities of seeds of different varieties of spring barley

Показатель / Parameter	Контроль (вода) / Control (water)	«Экорост» (вода) / «Ecorost» (water)	«АгроВерм» (вода) / «Agro Verm» (water)	Аэрозоль Без гуматов / Aerosol with- out humates	«Экорост» (аэрозоль) / «Ecorost» (aerosol)	«АгроВерм» (аэрозоль) / «Agro Verm» (aerosol)	HCP ₀₅ / LSD ₀₅
«Зазерский 85» / «Zazersky 85»							
Энергия прорастания, % / Germinating energy, %	79	84	82	80	91	88	2,14
Всхожесть, % / Viability, %	88	95	93	90	96	95	2,05
Сырая масса ста проростков, г / Wet weight of one hundred seedlings, g	9,59	9,89	9,77	9,63	10,10	9,97	0,18
«Владимир» / «Vladimir»							
Энергия прорастания, % / Germinating energy, %	83	89	88	85	93	90	1,98
Всхожесть, % / Viability, %	92	95	95	93	98	97	1,87
Сырая масса ста проростков, г / Wet weight of one hundred seedlings, g	10,12	10,59	10,56	10,15	10,68	10,66	0,24
«Маргер» / «Margaret»							
Энергия прорастания, % / Germinating energy, %	89	93	91	90	94	94	0,73
Всхожесть, % / Viability, %	92	95	95	94	98	97	2,11
Сырая масса ста проростков, г / Wet weight of one hundred seedlings, g	10,32	10,63	10,46	10,41	10,89	10,71	0,16
11/1 – 05 h 37 (линия «Аннабель × Эльф») / 11/1 – 05 h 37 (line «Anabell × Elf»)							
Энергия прорастания, % / Germinating energy, %	91	94	94	89	95	95	0,92
Всхожесть, % / Viability, %	96	98	97	95	100	99	1,93
Сырая масса ста проростков, г / Wet weight of one hundred seedlings, g	11,02	11,10	11,07	10,89	11,24	11,31	0,18

В ходе проведения контрольных измерений температуры зерна тепловизором RGK TL-80 установлено, что температура зерна после обработки составила 14 °С, влажность зерна составляла 13,8 %.

При анализе таблицы 2 установлено, что на всех вариантах опыта, кроме обработки семян водяным паром, полученные данные статистически значительно превосходили контроль.

Наблюдения показали, что по вариантам опыта наблюдается разная динамика темпов прорастания семян. Полученные результаты свидетельствуют, что в целом обработка семян гуматами способствовала повышению посевных качеств независимо от способа обработки семян. Отмечена тенденция сортовой отзывчивости на обработку семян гуминовыми препаратами. Однако наиболее высокие показатели были отмечены при использовании аэрозоля гумата «Экорост». Применение обработки семян ячменя аэрозолем «Экорост» позволило повысить энергию прорастания и всхожесть сорта «Зазерский 85» относительно контроля на 15,2 % и 9,1 %, сорта «Владимир» – на 12,0 % и 6,5 %, сорта «Маргрет» – на 5,6 % и 6,5 %, гибридной линии «Аннабель × Эльф» – на 4,4 % и 4,2 % соответственно. Несколько уступала ему обработка семян аэрозолем гумата «АгроВерм», что можно объяснить более низким содержанием гуминовых кислот в препарате («Экорост» – 30 г/л, «АгроВерм» – 12 г/л).

Сравнительный анализ эффективности применения гуминовых препаратов при предпосевной обработке семян тест-культуры аэрозолем и традиционным полусухим методом показал, что использование разработанного оборудования позволило повысить эффективность предпосевной обработки семян. Применение гумата «Экорост» в форме аэрозоля в среднем по сортам ячменя ярового позволило повысить энергию прорастания семян относительно тра-

диционного способа на 2,9 %, всхожесть – на 2,4 %, применение аэрозоля гумата «Агроверм» – на 2,7 % и 2,2 % соответственно.

Результаты исследований показывают, что использование гуминовых препаратов в форме аэрозольных паров усиливает их биологическую активность, что проявляется в увеличении силы роста и биометрических показателей проростков. Сырая масса ста проростков на вариантах с применением пара гуминовых препаратов существенно превосходила как контроль, так и варианты с использованием гуматов в традиционном способе обработки семян. На сорте «Зазерский 85» применение аэрозоля гумата «Экорост» повысило данный показатель относительно контроля на 5,32 %, на сорте «Владимир» – на 5,53 %, на сорте «Маргрет» – на 5,52 %, на гибридной линии «Аннабель × Эльф» – на 2,00 %.

Данный эффект очень важен при возделывании сельскохозяйственных культур, особенно при экстремальных условиях в весенний период, так как он обеспечивает интенсивное развитие всходов растений после посева.

Проведение предпосевной обработки семян горячим туманом гуминовых препаратов способствует интенсивному накоплению массы ростков и улучшает интенсивность и направленность обмена веществ. Усиление процессов развития на ранних этапах вегетации оказывает решающее влияние на дальнейшие стадии развития растений.

Таким образом, анализ результатов экспериментальных исследований показал, что прорастание семян тест-культуры свидетельствует об эффективности использования аэрозольного способа предпосевной обработки семян и разрабатываемого оборудования.

Обсуждение и заключение

В ходе проведения лабораторных исследований установлено, что обработка семян ячменя ярового гуминовыми препаратами оказывает положитель-

ный эффект как на посевные, так и на урожайные качества семенного материала. Наилучший результат был получен при обработке семенного материала с низкими посевными качествами, которые получают при уборке семенных участков в годы с неблагоприятными условиями: при дефиците тепла, обильных осадках, а также при нарушении технологий уборки и подготовки семян.

Применение разработанного устройства для обработки семян горячим туманом позволяет снизить энергетические затраты (в стоимостном выражении на 18,6 % в сравнении с протравливателем

ПС-10) на обработку семян и увеличить ее эффективность за счет использования высокодисперсного горячего тумана гуминовых препаратов. Кроме того, устройство имеет высокую надежность из-за небольшого количества движущихся деталей.

В ходе проведения лабораторных исследований было установлено, что применение разработанного устройства позволило активизировать продукционные процессы тест-культуры на ранних фазах онтогенеза: повысились посевные и урожайные качества семян, сохранность растений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Aguiar, N. O.** Metabolic Profile and Antioxidant Responses during Drought Stress Recovery in Sugarcane Treated with Humic Acids and Endophytic Diazotrophic Bacteria / N. O. Aguiar, L. O. Medici, F. L. Olivares [et al.]. – DOI 10.1111/aab.12256 // *Annals of Applied Biology*. – 2016. – Vol. 168, Issue 2. – Pp. 203–213. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/aab.12256> (дата обращения: 08.04.2020).
2. **Canellas, L. P.** Humic and Fulvic Acids as Biostimulants in Horticulture / L. P. Canellas, F. L. Olivares, N. O. Aguiar [et al.]. – DOI 10.1016/j.scienta.2015.09.013 // *Scientia Horticulturae*. – 2015. – Vol. 196. – Pp. 15–27. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423815301771?via%3Dihub> (дата обращения: 08.04.2020).
3. **Костенко, М. Ю.** Анализ применения различных видов гуматов и способов их использования при возделывании картофеля / М. Ю. Костенко, И. Н. Горячкина, В. С. Тетерин [и др.] // *Вестник РГАТУ*. – 2018. – № 3 (39). – С. 88–93. – URL: http://vestnik.rgatu.ru/archive/2018_3.pdf (дата обращения: 08.04.2020). – Рез. англ.
4. **Sun, Q.** Different Chemical Activation of Humic Acid from Weathered Coal Affect the Growth and Development of Tomatoes and Cabbages / Q. Sun, L. Xia, G. Yu [et al.]. – DOI 10.1088/1755-1315/170/2/022137 // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2018. – Vol. 70, Issue 2. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/170/2/022137> (дата обращения: 08.04.2020).
5. **Nikitina, I. M.** Humic Acids of Solid Fossil Fuels – Perspectives for Application in Technology and Environment Protection / I. M. Nikitina, S. A. Epshtein, N. A. Fomenko [et al.] // *Eurasian Mining*. – 2016. – № 2. – Pp. 33–36. – URL: <http://www.rudmet.ru/journal/1592/article/27334/?language=en> (дата обращения: 08.04.2020).
6. **Перминова, И. В.** Гуминовые вещества – вызов химикам XXI века / И. В. Перминова // *Химия и жизнь*. – 2008. – № 1. – С. 50–55. – URL: <https://www.hij.ru/read/issues/2008/january/> (дата обращения: 08.04.2020).
7. **Chen, X.** The Use of Humic Acid Urea Fertilizer for Increasing Yield and Utilization of Nitrogen in Sweet Potato / X. Chen, M. Kou, Z. Tang [et al.]. – DOI 10.17221/24/2017-PSE // *Plant, Soil and Environment*. – 2017. – Vol. 63, Issue 5. – Pp. 201–206. – URL: <https://www.agriculturejournals.cz/web/pse.htm?volume=63&firstPage=201&type=publishedArticle> (дата обращения: 08.04.2020).

8. **Olk, D. C.** Humic Products in Agriculture: Potential Benefits and Research Challenges – A Review / D. C. Olk, D. L. Dinnes, J. R. Scoresby [et al.]. – DOI 10.1007/s11368-018-1916-4 // Journal of Soils and Sediments. – 2018. – Vol. 18, Issue 8. – Pp. 2881–2891. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11368-018-1916-4#citeas> (дата обращения: 08.04.2020).
9. **Da Piedade, M. A.** Mixed Rhizobia and Herbaspirillum Seropedicae Inoculations with Humic Acid-Like Substances Improve Water-Stress Recovery in Common Beans / M. A. Da Piedade, F. L. Olivares, L. O. Medici [et al.]. – DOI 10.1186/s40538-017-0090-z // Chemical and Biological Technologies in Agriculture. – 2017. – Vol. 4. – URL: <https://chembioagro.springeropen.com/articles/10.1186/s40538-017-0090-z#citeas> (дата обращения: 08.04.2020).
10. **Pei, R.** Effects of Application of Humic Acid on Yield, Nitrogen Use Efficiency of Summer Maize / R. Pei, J. Wang, T. Yuan [et al.]. – DOI 10.3864/j.issn.0578-1752.2017.11.023 // Scientia Agricultura Sinica. – 2017. – Vol. 50, Issue 11. – Pp. 2189–2198. – URL: <http://www.chinaagrisci.com/CN/10.3864/j.issn.0578-1752.2017.11.023> (дата обращения: 08.04.2020).
11. **Idrees, M.** Potassium Humate and NPK Application Rates Influence Yield and Economic Performance of Potato Crops Grown in Clayey Loam Soils / M. Idrees, M. A. Anjum, J. I. Mirza. – DOI 10.25252/SE/18/51384 // Soil and Environment. – 2018. – Vol. 37, Issue 1. – Pp. 53–61.
12. **Shehata, S. A.** Quality and Shelf-Life of Onion Bulbs Influenced by Biostimulants / S. A. Shehata, K. F. Abdelgawad, M. M. El-Mogy. – DOI 10.1080/19315260.2017.1298170 // International Journal of Vegetable Science. – 2017. – Vol. 23, Issue 4. – Pp. 362–371. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19315260.2017.1298170> (дата обращения: 08.04.2020).
13. **Dos Santos, L. H.** Carbon of Humic Substances in Soil Aggregates Cultivated with Onion under No-Tilland Conventional Tillage Systems / L. H. dos Santos, A. Loss, L. Canton [et al.] // Idesia. – 2018. – Vol. 36, Issue 1. – Pp. 15–25.
14. **Гармаш, Н. Ю.** Методические подходы к оценке качества гуминовых препаратов / Н. Ю. Гармаш, Г. А. Гармаш // Агрохимический вестник. – 2012. – № 4. – С. 17–19. – URL: <https://www.agrochemv.ru/ru/nomer/2012/4> (дата обращения: 08.04.2020). – Рез. англ.
15. **Бышов, Н. В.** Результаты полевого эксперимента применения незерновой части урожая в качестве удобрения под озимые культуры / Н. В. Бышов, А. Н. Бачурин, И. Ю. Богданчиков [и др.] // Вестник РГАТУ. – 2014. – № 1 (21). – С. 80–84. – URL: http://vestnik.rgatu.ru/archive/1_2014.pdf (дата обращения: 08.04.2020).
16. **Шогенов, Ю. Х.** Влияние низкоинтенсивного локального лазерного излучения на посевные качества семян / Ю. Х. Шогенов, А. Ю. Измаилов, Ю. М. Романовский [и др.] // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2016. – № 5. – С. 33–35. – URL: <http://www.vestnik-rsn.ru/vrsn/article/view/284> (дата обращения: 08.04.2020).
17. **Вербицкая, Н. В.** Использование препарата гуминовой природы для предпосевной обработки семян пшеницы / Н. В. Вербицкая, Е. П. Кондратенко, О. М. Соболева // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 3 (103). – С. 128–132. – URL: <https://vestnik.kuzstu.ru/index.php?page=article&id=2669> (дата обращения: 08.04.2020).
18. **Патент № 2682885 Российская Федерация, МПК A01C 1/06 (2006.01).** Устройство для протравливания семян : № 2018106747 : заявл. 22.02.2018 : опубл. 22.03.2019 / Бышов Н. В. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева». – 6 с. : ил. – URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2682885C1_20190322.pdf (дата обращения: 08.04.2020). – Рез. англ.

Поступила 08.10.2019; принята к публикации 18.11.2019; опубликована онлайн 30.06.2020

Об авторах:

Тетерина Ольга Анатольевна, соискатель кафедры технологий металлов и ремонта машин ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева» (390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0329-8573>, olia.teterina@mail.ru

Тетерин Владимир Сергеевич, старший научный сотрудник отдела технического обеспечения сельскохозяйственного производства ИТОСХ – филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (390025, Россия, г. Рязань, ул. Щорса, д. 38/11), кандидат технических наук, Researcher ID: G-7742-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8116-723X>, labio-giant@mail.ru

Митрофанов Сергей Владимирович, ведущий научный сотрудник отдела информационных технологий в сельскохозяйственном производстве ИТОСХ – филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (390025, Россия, г. Рязань, ул. Щорса, д. 38/11), кандидат сельскохозяйственных наук, Researcher ID: G-7781-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0657-7148>, f-mitrofanoff2015@yandex.ru

Костенко Михаил Юрьевич, профессор кафедры технологии металлов и ремонта машин ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева» (390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), доктор технических наук, Researcher ID: G-9926-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3733-3717>, km340010@rambler.ru

Рембалович Георгий Константинович, заведующий кафедрой технологии металлов и ремонта машин ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева» (390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), доктор технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3356-2168>, rgk.rgatu@yandex.ru

Новиков Николай Николаевич, врио директора ИТОСХ – филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (390025, Россия, г. Рязань, ул. Щорса, д. 38/11), кандидат сельскохозяйственных наук, Researcher ID: G-7758-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3117-3759>, novikov-nn.vnims@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

О. А. Тетерина – проведение лабораторных исследований, подготовка начального варианта текста; В. С. Тетерин – подготовка начального варианта текста и формулирование выводов; С. В. Митрофанов – проведение лабораторных исследований и проведение критического анализа экспериментальных исследований; М. Ю. Костенко – научное руководство, формулирование основной концепции исследования; Г. К. Рембалович – проведение критического анализа экспериментальных исследований; Н. Н. Новиков – литературный и патентный анализ, редактирование текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Aguiar N.O., Medici L.O., Olivares F.L., et al. Metabolic Profile and Antioxidant Responses during Drought Stress Recovery in Sugarcane Treated with Humic Acids and Endophytic Diazotrophic Bacteria. *Annals of Applied Biology*. 2016; 168(2):203-213. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1111/aab.12256>
2. Canellas L.P., Olivares F.L., Aguiar N.O., et al. Humic and Fulvic Acids as Biostimulants in Horticulture. *Scientia Horticulturae*. 2015; 196:15-27. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.013>
3. Kostenko M.Y., Goryachkina I.N., Teterin V.S., et al. Analysis of the Application of Different Types of Humates in the Pre-Plant Processing of Potatoes. *Vestnik RGATU = RSATU Bulletin*. 2018; (3):88-93. Available at: http://vestnik.rgatu.ru/archive/2018_3.pdf (accessed 08.04.2020). (In Russ.)
4. Sun Q., Xia L., Yu G., et al. Different Chemical Activation of Humic Acid from Weathered Coal Affect the Growth and Development of Tomatoes and Cabbages. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018; 70(2). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/170/2/022137>
5. Nikitina I.M., Epshtein S.A., Fomenko N. A., et al. Humic Acids of Solid Fossil Fuels – Perspectives for Application in Technology and Environment Protection. *Eurasian Mining*. 2016; (2):33-36. Available at: <http://www.rudmet.ru/journal/1592/article/27334/?language=en> (accessed 08.04.2020). (In Eng.)

6. Perminova I.V. Humic Substances Are a Challenge to 21st Century Chemists. *Khimiya i zhizn* = Chemistry and Life. 2008; (1):50-55. Available at: <https://www.hij.ru/read/issues/2008/january/> (accessed 08.04.2020). (In Russ.)
7. Chen X., Kou M., Tang Z., et al. The Use of Humic Acid Urea Fertilizer for Increasing Yield and Utilization of Nitrogen in Sweet Potato. *Plant, Soil and Environment*. 2017; 63(5):201-206. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17221/24/2017-PSE>
8. Olk D.C., Dinnes D.L., Scoresby J.R., et al. Humic Products in Agriculture: Potential Benefits and Research Challenges – A Review. *Journal of Soils and Sediments*. 2018; 18(8):2881-2891. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-018-1916-4>
9. Da Piedade M.A., Olivares F.L., Medici L.O., et al. Mixed Rhizobia and Herbaspirillum Seropedicae Inoculations with Humic Acid-Like Substances Improve Water-Stress Recovery in Common Beans. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 2017; 4. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1186/s40538-017-0090-z>
10. Pei R., Wang J., Yuan T., et al. Effects of Application of Humic Acid on Yield, Nitrogen Use Efficiency of Summer Maize. *Scientia Agricultura Sinica*. 2017; 50(11):2189-2198. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2017.11.023>
11. Idrees M., Anjum M.A., Mirza J.I. Potassium Humate and NPK Application Rates Influence Yield and Economic Performance of Potato Crops Grown in Clayey Loam Soils. *Soil and Environment*. 2018; 37(1):53-61. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.25252/SE/18/51384>
12. Shehata S.A., Abdelgawad K.F., El-Mogy M.M. Quality and Shelf-Life of Onion Bulbs Influenced by Biostimulants. *International Journal of Vegetable Science*. 2017; 23(4):362-371. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/19315260.2017.1298170>
13. Dos Santos L.H., Loss A., Canton L., et al. Carbon of Humic Substances in Soil Aggregates Cultivated with Onion under No-Tillage Conventional Tillage Systems. *Idesia*. 2018; 36(1):15-25. (In Eng.)
14. Garmash N.Yu., Garmash G.A. Investigation of Growth Regulators, Micro-and Humic Fertilizers. *Agrokhimicheskii vestnik* = Agrochemical Bulletin. 2012; (4):17-19. Available at: <https://www.agrochemv.ru/ru/nomer/2012/4> (accessed 08.04.2020). (In Russ.)
15. Byshov N.V., Bachurin A.N., Bogdanchikov I.Yu., et al. The Results of a Field Experiment in the Application of Non-Grain Part of the Crop as Fertilizer for Winter Crops. *Vestnik RGATU* = RSATU Bulletin. 2014; (1):80-84. Available at: http://vestnik.rgatu.ru/archive/1_2014.pdf (accessed 08.04.2020). (In Russ.)
16. Shogenov Yu.H., Izmaylov A.Yu., Romanovskiy Yu.M., et al. Low-Intensity Local Laser Radiation Effect on Crop Quality of Seed. *Vestnik rossiyской selskokhozyaystvennoy nauki* = Bulletin of the Russian Agricultural Sciences. 2016; (5):33-35. Available at: <http://www.vestnik-rsn.ru/vrsn/article/view/284> (accessed 08.04.2020). (In Russ.)
17. Verbitskaya N.V., Kondratenko E.P., Soboleva O.M. Using the Preparations of Humic Nature for Preseeding Treatment of Wheat Seeds. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2014; (3):128-132. Available at: <https://vestnik.kuzstu.ru/index.php?page=article&id=2669> (accessed 08.04.2020). (In Russ.)
18. Seed Dresser: Patent 2682885 Russian Federation. No. 2018106747; appl. 22.02.2018; publ. 22.03.2019. Bulletin No. 9. 6 p. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU2682885C1_20190322.pdf (accessed 08.04.2020). (In Russ.)

Received 08.10.2019; revised 18.11.2019; published online 30.06.2020

About the authors:

Olga A. Teterina, PhD Candidate of Metal Technology and Machine Repair Chair, Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev (1 Kostychev St., Ryazan 390044, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0329-8573>, olia.teterina@mail.ru



Vladimir S. Teterin, Senior Researcher of Agricultural Industry Technical Support Department, Institute of Agricultural Technical Support – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (38/11 Shchors St., Ryazan 390025, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: G-7742-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8116-723X>, labio-giant@mail.ru

Sergey V. Mitrofanov, Leading Researcher of Department of Information Technologies in Agricultural Production, Institute of Agricultural Technical Support – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (38/11 Shchors St., Ryazan 390025, Russia), Ph.D. (Agriculture), Researcher ID: G-7781-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0657-7148>, f-mitrofanoff2015@yandex.ru

Mikhail Yu. Kostenko, Professor of Metal Technology and Machine Repair Chair, Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev (1 Kostychev St., Ryazan 390044, Russia), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: G-9926-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3733-3717>, km340010@rambler.ru

Georgiy K. Rembalovich, Head of Metal Technology and Machine Repair Chair, Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev (1 Kostychev St., Ryazan 390044, Russia), D.Sc. (Engineering), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3356-2168>, rgk.rgatu@yandex.ru

Nikolay N. Novikov, Interim Director of Institute of Agricultural Technical Support – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (38/11 Shchors St., Ryazan 390025, Russia), Ph.D. (Agriculture), Researcher ID: G-7758-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3117-3759>, novikov-nn.vnims@yandex.ru

Contribution of the authors:

O. A. Teterina – laboratory studies, writing the draft; V. S. Teterin – preparation of the initial text version and drawing conclusions; S. V. Mitrofanov – laboratory studies and critical analysis of experimental studies; M. Yu. Kostenko – scientific management, formulation of the basic research concept; G. K. Rembalovich – critical analysis of experimental studies; N. N. Novikov – literature and patent analysis, text editing.

All authors have read and approved the final manuscript.



Повышение стойкости к ударным воздействиям композитных узлов сельхозмашин применением упруговязкопластичных жидкостей

М. В. Астахов, Е. В. Славкина*

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

(г. Калуга, Россия)

**e.v.slavkina@gmail.com*

Введение. Применение композитных материалов в сельскохозяйственном машиностроении известно как один из зарекомендованных способов снижения массы конструкции и защиты от коррозии. К основным недостаткам таких изделий можно отнести их низкую стойкость к ударным нагрузкам, возникающим во время эксплуатации. Целью данной работы является разработка стеклокомпозитной многослойной конструкции борта прицепа, способной выдерживать наряду со статически приложенными силами ударные нагрузки без включения дополнительных армирующих металлических элементов в зоны предполагаемых ударов.

Материалы и методы. Для повышения ударопрочности изделия после проведенного анализа современных конструкторских решений предложено применение упруговязкопластичной неньютоновской жидкости на основе полисиликона путем введения в силовой элемент в качестве дополнительного слоя с целью компенсации ударных воздействий.

Результаты исследования. На основании проведенного лабораторного тестирования с применением статистической обработки полученных данных определены основные механические характеристики неньютоновской жидкости (полисиликона) при испытаниях на удар (плотность, коэффициент Пуассона, модуль Юнга, модуль сдвига), построены графики полученных зависимостей. Температура исследуемых образцов полисиликона не оказывала значительного влияния на их механические свойства. Установлено: начиная со значения относительной деформации 0,042, за время удара полисиликон проявляет линейно-упругие свойства.

Обсуждение и заключение. На основании полученных механических характеристик сделаны выводы о стойкости к ударным нагрузкам полисиликона как составной части элемента борта прицепа. Предложен вариант компоновки конструктивного решения борта прицепа как многослойного сэндвич-элемента с внешними частями из полимерного композитного материала с внутренним наполнением стеклопластиковыми сотами и полисиликоном, помещенным в крупные ячейки.

Ключевые слова: ударная нагрузка, испытания на ударный изгиб, сэндвичевая композитная конструкция, полисиликон, дилатантная жидкость, полимерный композитный материал, ударная вязкость

Для цитирования: Астахов, М. В. Повышение стойкости к ударным воздействиям композитных узлов сельхозмашин применением упруговязкопластичных жидкостей / М. В. Астахов, Е. В. Славкина. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202002.268-286 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 2. – С. 268–286.

© Астахов М. В., Славкина Е. В., 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 Shock Resistance of Agricultural Composite Units Using Visco-Elastic Fluids

M. V. Astakhov, E. V. Slavkina*

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

*e.v.slavkina@gmail.com

Introduction. The use of composite materials in agricultural engineering is known as one of the recommended ways to reduce the weight of the structure and protect against corrosion. The main disadvantages of such products are their low resistance to shock loads that occur during operation. The aim of this study is to develop a glass composite multi-layer structure of the trailer side, capable of withstanding shock loads along with statically applied forces, without including additional reinforcing metal elements in the zones of the possible impacts.

Materials and Methods. To increase the impact resistance of the product (after an analysis of modern design solutions) the use of visco-elastic non-Newtonian fluids based on polysilicon by introducing an additional layer into the power element to compensate for impact effects is proposed.

Results. On the basis of laboratory testing using statistical processing of the obtained data, the basic mechanical characteristics of non-Newtonian fluid (polysilicon) during impact tests (density, Poisson's ratio, Young's modulus, shear modulus) are determined, and graphs of the obtained dependencies are constructed. The temperature of the tested polysilicon samples did not significantly affect their mechanical properties. It is established that starting from the value of relative deformation 0.042, during the impact polysilicon shows linearly elastic properties.

Discussion and Conclusion. Based on the received mechanical characteristics, the conclusions about resistance to shock loads of polysilicon as a component of a trailer board element are made. The variant of arrangement of the trailer board structural solution as a multilayer sandwich element with external parts made of polymer composite material with internal filling with fiberglass cells and polysilicon placed in large cells is offered.

Keywords: shock loading, impact bending tests, sandwich composite construction, polysilicon, dilatant fluid, polymer composite material, impact viscosity

For citation: Astakhov M.V., Slavkina E.V. Improving the Shock Resistance of Agricultural Composite Units Using Visco-Elastic Fluids. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(2):268-286. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.268-286>

Введение

Для уменьшения массы и увеличения коррозионной стойкости деталей и узлов машин, используемых в сельскохозяйственном производстве, в частности в кормопроизводстве, все чаще применяются полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе различного вида нитей, тканей, рогож с пропиткой синтетическими смолами.

Одним из основных недостатков подобного типа конструкций является небольшая стойкость к ударным воздействиям, сосредоточенным на малой

площади. Наиболее широко распространенным вариантом компенсации таких нагрузок в настоящее время является применение комбинированных технологических решений, где наряду с основной композитной частью узла используются детали, в которых при помощи клеевых, неразборных или разборных дискретных соединений крепятся усиливающие металлические элементы в зонах предполагаемых ударов.

Этот способ приводит не только к увеличению массы композитного узла, но и усложняет технологию из-

готовления, эксплуатацию машины, а также снижает эффективность ПКМ как коррозионностойкого материала.

В качестве примера рассмотрим боковой борт кузова прицепа, применяемого в кормопроизводстве для перевозки полужидких и сыпучих грузов, конструкцию которого было предложено модернизировать [1].

Композитная сэндвич-оболочка борта (рис. 1), изготовленная из нескольких слоев стеклоткани с наполнителем в виде стеклокомпозитных сот, была предназначена к использованию, согласно техническим условиям по эксплуатации (ТУ), только для сыпучих и полужидких грузов. Во время полевых испытаний ТУ были нарушены (погрузка твердых предметов с задачей им ускорения), возникли удары о борт, которые привели к местной потере устойчивости борта и расплющиванию стекловолокна в зоне контакта с твердой частью груза.

Предложение усилить борт металлическими листами является деградирующим и приводит к ухудшению многих параметров. Было необходимо применить более прогрессивное конструктивное решение.

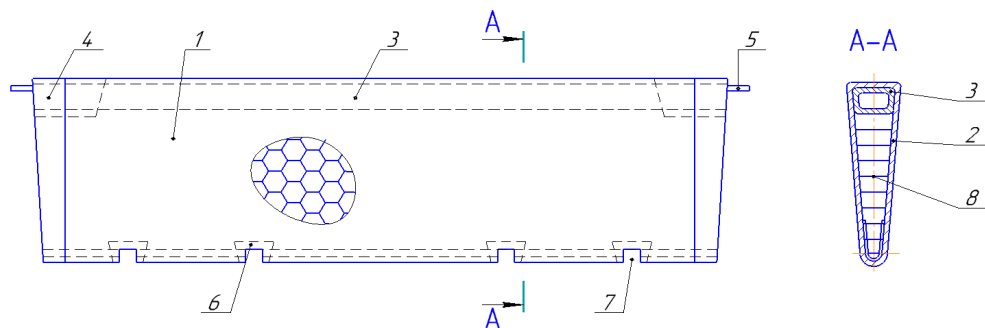
Поэтому целью данного исследования является разработка метода усиления сэндвичевой композитной конструкции, состоящей из листов ПКМ, соединенных сотовым наполнителем, без металлического листового подкрепления для компенсации ударных нагрузок.

Обзор литературы

С целью улучшения способности эффективно сопротивляться ударным воздействиям в композитных конструкциях узлов и деталей сельскохозяйственной техники в настоящее время применяют несколько методов.

Так, для повышения ударопрочности элементов узлов и деталей машин, выполненных из полимерных композиционных материалов, наряду с двумерным (листовым) наполнителем, применяют наполнители на основе трехмерного расположения нитей, что ведет к частичному увеличению массы изделия, но полностью не обеспечивает местной прочности материала при сосредоточенной на малой площади большой ударной нагрузке [2].

Предлагается, в частности для сельскохозяйственного машиностроения, применять алюминиевые компози-



Р и с. 1. Борт прицепной тележки для тяжелых тракторов: 1, 2 – оболочки борта, выполненные из стеклоткани с пропиткой из синтетической смолы; 3 – композитный силовой профиль; 4, 5 – стальные концевые обоймы с пальцами для фиксации с торцевыми бортами; 6, 7 – петли крепления борта к платформе; 8 – сотовый наполнитель

F i g. 1. Trailer bogie board for heavy tractors: 1, 2 – side casing made of fiberglass with impregnation of synthetic resin; 3 – composite power profile; 4, 5 – steel end clips with fingers for fixation with end sides; 6, 7 – hinges for fastening the side to the platform; 8 – cell core

ты с металлической матрицей (АММС) с высокой ударной жесткостью и прочностью, но не учитывается стоимость данного материала при больших объемах производства [3].

Подбираются оптимальные сочетания типов матриц и наполнителей для изготовления капота трактора на основе экспериментальных работ, в частности и на ударные воздействия. Исследования, проведенные для узла машины, который не испытывает экстремальных силовых внешних воздействий, корректны, но не решают вопрос о проектировании на основе композиционных материалов высоконагруженных элементов сельскохозяйственной техники, испытывающих сильные удары (типа бортов прицепов тяжелых тракторов) [4; 5].

Результаты ряда работ основаны на предположении о повышении ударопрочности при применении корунда в качестве наполнителя для ПКМ, выполненного из стеклопластика [6; 7]. Были представлены материалы о проведении статических испытаний подобного композита и стало известно, что предел его прочности падает приблизительно на 30 % при добавлении порошка корунда. Было предположено, что микрочастица корунда при достижении материалом матрицы определенной деформации играет роль концентратора напряжений и становится местом начала роста трещины [7]. Поэтому повышение ударопрочности методом, предложенным П. Валашеком и коллегами, представляется сомнительным [6].

В монографии У. Вайды подробно рассматриваются способы конструирования композитных узлов транспортных машин, где в основном упор делается на совершенствование армирования наполнителя по трем измере-

ниям. Потеря устойчивости волокна при ударе, расплющивание, появление квазитрещин и изменение формы не ставятся во главу угла [8].

Испытаниям на стойкость к расслоению полимерно-матричных композитов посвящена работа Т. Фиглуса и соавторов, где основное внимание уделено разработке методов испытаний, но не представлены технологические и конструкционные решения предотвращения разрушающих деформаций при сосредоточенных ударах по поверхности ПКМ [9].

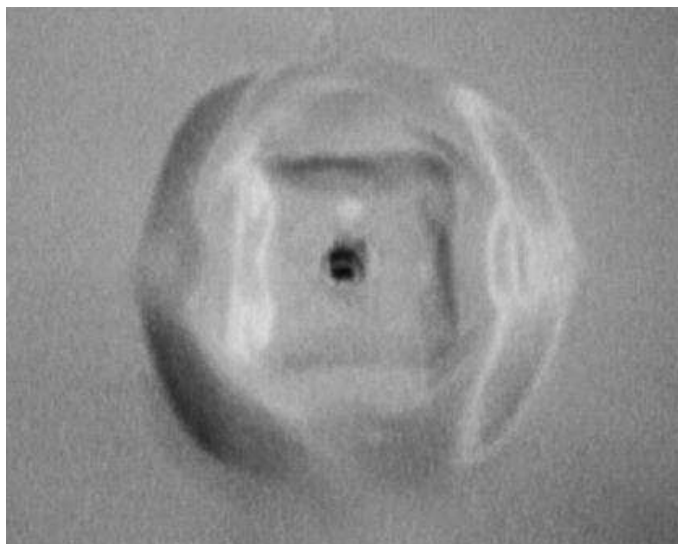
В совершенно другой области, в военном деле, рассматривается стойкость композитных бронежилетов с прослойкой из неньютоновской жидкости при ударе пули, выпущенной из пистолета¹.

Применяются останавливающие пулю комбинации кевларовых пластин и слоев неньютоновской жидкости, химический состав которой не раскрывается. Подчеркивается, что при ударе пули о такую конструкцию жидкость в месте удара затвердевает, а остальная часть, будучи вязкопластической, передает часть энергии удара на кевлар, и деформация бронежилета становится, в отличие от обычных жестких бронежилетов, большей по площади, но меньшей по глубине (в сторону тела человека) (рис. 2).

Идея поглощать энергию удара с помощью ее перераспределения слоем неньютоновской жидкости в машиностроительных конструкциях, в частности в узлах сельскохозяйственных машин, представляется актуальной, так как плотность таких жидкостей гораздо меньше плотности как усиленных композитов, так и стальных листов, подкрепляющих место ударов, а стоимость вполне соизмерима с последними².

¹ Неньютоновская жидкость в качестве брони [Электронный ресурс]. URL: <https://top-war.ru/73725-nenyutonovskaya-zhidkost-v-kachestve-broni.html> (дата обращения: 14.04.2020); «Жидкому» бронежилету быть! [Электронный ресурс]. URL: <https://warspot.ru/9049-zhidkomu-bronezhiletu-byt> (дата обращения: 14.04.2020).

² Пульс цен: полидиметилсилоксан [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pulscen.ru/price/040451-dimetilsiloksan> (дата обращения: 14.04.2020).



Р и с. 2. Место удара пули о кевларовый бронежилет со слоем неньютоновской жидкости: квадрат – кевларовая пластина, первой принимающая удар; овальное пятно – зона затвердевания неньютоновской жидкости

F i g. 2. Point of impact of a bullet against a Kevlar vest with a layer of non-Newtonian fluid: square – Kevlar plate, the first receiving impact; oval spot – zone of hardening of non-Newtonian fluid

Материалы и методы

Для компенсации ударных воздействий на сэндвичевый композитный борт транспортного средства выбрано композиционное вещество – упруговязкопластическая неньютоновская жидкость на основе полисиликона, которая в момент ударного на нее воздействия в месте приложения динамических сил приобретает упругие свойства, а в состоянии покоя является вязкопластической. К подобному типу жидкостей относится дилатантная жидкость, имеющая коммерческое название Silly Putty (SP), – материал, созданный компанией Corning Incorporated на основе силиконовых полимеров, который состоит из 65 % полидиметилсилоксана (PDMS), 17 % диоксида кремния (кристаллический кварц), 9 % тиксотрола ST (про-

изводное касторового масла), 4 % диметилсилоксана (гидрокси-концевой полимер с борной кислотой), 1 % глицерина и 1 % диоксида титана.

В ряде работ рассмотрены некоторые характеристики дилатантных жидкостей, созданных на основе полисиликонов: вязкость, магнитные свойства и проводимость при добавлении различных частиц, а также их влияние на поведение дилатанта в целом³ [10; 11]. Однако большинство физических и механических свойств являются неизученными, как и возможность взаимодействия полисиликона с различными материалами [12; 13].

Для их исследования необходимо провести экспериментальное лабораторное тестирование: пикнометрическим, пьезоэлектрическим, силовым

³ Астарита Дж., Марруччи Дж. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей. М.: Мир, 1978. 312 с.

методами; испытаниями образцов композитных сэндвичевых параллелепипедов, пустотелых и наполненных неньютоновской жидкостью SP, до разрушения с помощью маятникового копра; статистическими методами обработки полученных результатов.

Результаты исследования

Сельскохозяйственные машины, применяемые в кормопроизводстве, особенно предназначенные для эксплуатации вне помещения, подвержены воздействию температуры, которая, предположительно, может меняться от -25°C до $+40^{\circ}\text{C}$.

При этом исследуемое вещество, заполняющее внутреннюю полость конструкционного элемента, не должно резко менять свой объем (разбухать или усыхать). Поэтому очень важно изучить изменение плотности SP в зависимости от температуры.

Для нахождения плотности полисиликона SP были проведены экспериментальные исследования пикнометрическим методом при изменении температуры SP от $+40^{\circ}\text{C}$ до -25°C .

На основании статистической обработки результатов экспериментов сделаны следующие выводы:

1. Плотность SP не зависит от температуры и равна $\rho = 1\,195,27\text{ кг/м}^3$.

2. При воздействии температуры в пределах от $+40^{\circ}\text{C}$ до -25°C изменение объема образцов SP практически соответствовало изменению объема стеклопластикового сосуда, в котором находился полисиликон.

Как отмечалось в работах исследователей, в момент удара жидкость SP принимала упругое состояние, то есть ее деформация в месте удара в течение ограниченного промежутка времени начинала линейно зависеть от внешних сил, иными словами, за время поглощения энергии удара полисиликон SP, предположительно, подчинялся закону Гука, а после удара приобретал вязкопластическое состояние [10; 11].

Компенсация энергии удара путем ее аккумуляции в объеме полисиликона в виде энергии упругой деформации происходила за время удара, что в дальнейших проектировочных расчетах не позволяет применить гипотезу о том, что модуль Юнга материала, испытывающего удар, постоянен как до удара, так и после него.

Таким образом, для решения прикладной задачи создания компенсатора ударов в композитных конструкциях сельхозмашин важно исследовать механические свойства полисиликона SP, возникающие только в момент удара, когда рассматриваемая дилатантная жидкость превращается в твердое упругое вещество, поведение которого в данный момент времени можно оценить на основе понятий теории упругости и определить: предел прочности, модули продольной и поперечной упругости, коэффициент Пуассона.

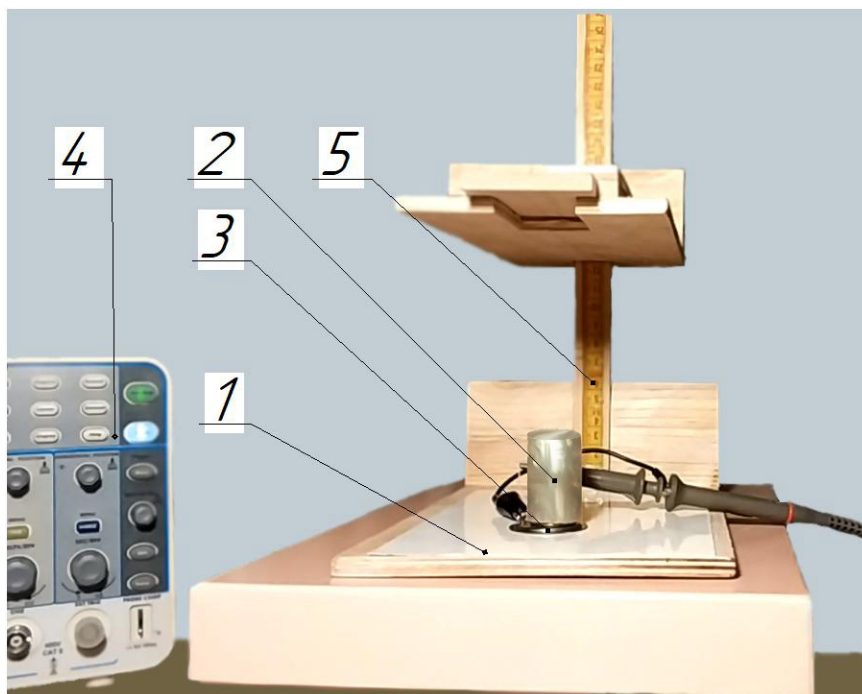
Для нахождения некоторых из вышеперечисленных механических характеристик и величины потенциальной энергии деформации дилатантной жидкости SP при ударе проведены экспериментальные исследования на удар свободно падающим стальным шаром о плоскую поверхность цилиндрического образца из полисиликона SP (рис. 3).

Образцы полисиликона SP имели следующие характеристики: масса – $0,02\text{ кг}$; форма – цилиндр с диаметром основания $0,02\text{ м}$ и высотой $0,035\text{ м}$.

Падение шара осуществлялось с высоты $h = 0,15\text{ м}$. Шары стальные полированные имели массу m : 5 ; 10 ; 20 ; 50 ; 100 ; 200 ; 500 ; $1\,100\text{ г}$.

С заданной высоты шары падали на предварительно сформованный цилиндр полисиликона SP, опирающийся своим основанием на пьезодатчик ЗП-3, подключенный к осциллографу OWON SDS6062. Температура полисиликона была постоянной и равнялась $+25^{\circ}\text{C}$.

В момент удара полисиликон SP принимал упругое состояние, шар от-



Р и с. 3. Установка для испытания образца полисиликона SP на удар стальным шаром: 1 – платформа для установки шара на нужную высоту; 2 – цилиндрический образец из полисиликона SP; 3 – пьезодатчик; 4 – осциллограф; 5 – миллиметровая шкала

Fig. 3. Installation for testing a specimen of SP polysilicon on impact with a steel ball: 1 – platform for installation of a ball at the necessary height; 2 – cylindrical sample from SP polysilicon; 3 – piezo sensor; 4 – oscillograph; 5 – millimeter scale

скакивал от него, на осциллограф передавался сигнал удара (кривая зависимости напряжения U , В, от времени t , с).

В процессе экспериментальных исследований велась видеосъемка, при которой осуществлялся замер изменений геометрической формы образцов полисиликона SP. Результаты замеров частично представлены в таблице 1.

Энергия удара шара mgh (где g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; h – высота падения шара, м) передавалась деформирующимся полисиликоном на пьезодатчик, который воспринимал эту энергию в виде энергии электрического поля.

$$W_3 = \frac{c \cdot \Delta U^2}{2}, \quad (1)$$

где c – емкость цепи «пьезодатчик – осциллограф», Ф; U – напряжение цепи, В.

При ударе шаром о пьезодатчик без полисиликона замерялось напряжение электрического поля U' . Тогда $\Delta U = U' - U$ будет показывать приращение напряжения за счет изменения емкости пьезодатчика c_n при условии, что емкость оставшейся части электрической цепи не меняется.

В результате формулу (1) можно представить в виде:

$$W_3 = \frac{c_n \cdot \Delta U^2}{2}. \quad (2)$$

Работу внешних сил при ударе, равном энергии W_3 упругого деформирования

Процессы и машины агроинженерных систем

Механические и электрические характеристики исследования деформации полисиликона SP при ударе

Mechanical and electrical characteristics of the study of deformation of SP polysilicon upon impact

Масса груза m , г / Weight of the cargo m , g	Среднее значение напряжения при ударе на полисиликон U , В / Average impact stress on polysilicon U , V	Среднее значение напряжения при ударе на пьезодатчик без полисиликона U' , В / Average impact stress on a piezo sensor without polysilicon U' , V	Разница напряжений $\Delta U = U' - U$, В / Voltage difference $\Delta U = U' - U$, V	Энергия электрического поля, Дж $W_э = \frac{c_n \cdot \Delta U^2}{2}$ / Electric field energy, J $W_э = \frac{c_n \cdot \Delta U^2}{2}$	Изменение диаметра цилиндра после удара Δd , мм / Change of cylinder diameter after impact Δd , mm	Изменение высоты цилиндра после удара Δl , мм / Change of cylinder height after impact Δl , mm
5	7,87	61,4	53,53	$2,44 \cdot 10^{-6}$	0	0
10	13,48	64,0	50,52	$2,17 \cdot 10^{-6}$	0	0
20	18,04	76,0	57,60	$2,82 \cdot 10^{-6}$	0,3	0,5
50	24,40	98,4	74,00	$4,66 \cdot 10^{-6}$	0,5	0,8
100	32,40	140,6	108,20	$9,95 \cdot 10^{-6}$	0,8	1,1
200	43,60	224,0	180,40	$27,54 \cdot 10^{-6}$	1,0	1,3
500	44,68	474,0	429,32	$156,44 \cdot 10^{-6}$	1,2	1,6
1 100	48,20	974,0	925,72	$728,85 \cdot 10^{-6}$	1,7	2,7

ния цилиндра из полисиликона, можно вывести на основании известной формулы Клайперона без коэффициента 0,5, так как работа осуществляется за небольшой промежуток времени, то есть она не является работой статистически приложенных сил (3).

$$W_M = \int \frac{N^2 dl}{EA}, \quad (3).$$

где N – внутренняя продольная сила сжатия цилиндра из полисиликона SP; H ; l – длина цилиндра, м; E – модуль Юнга (модуль продольной упругости) полисиликона во время удара, Па; $A = 025 \cdot \pi \cdot d^2$ – площадь поперечного сечения цилиндра из полисиликона, м²; d – диаметр цилиндра.

Решив интеграл (3) как определенный на отрезке от 0 l или способом Симпсона, получим:

$$W_M = \frac{N^2 l}{EA}, \quad (4)$$

откуда, подставив в (4) выражение (2), будем иметь:

$$W_M = W_э \Rightarrow E = \frac{N^2 l}{W_M A}. \quad (5)$$

По данным таблицы 1 и результатам, подсчитанным по формулам (2), (5), построены графики $\Delta l = f(N)$, $\Delta U = f(m)$, на основе которых можно получить ксическую зависимость $\sigma = E\varepsilon$ для полисиликона SP в момент удара (рис. 4–6), где: $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ – относи-

тельная деформация полисиликона; σ – нормальное напряжение в поперечном сечении относительно вертикальной оси образца SP.

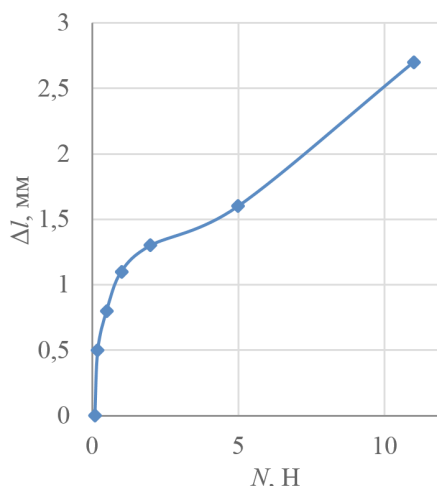
Из графика на рисунке 6 видно, что, начиная со значения $\varepsilon = 0,042$, модуль Юнга не изменяется, а состояние полисиликона SP является линейно-упругим.

Так, например, при падении шара массой $m = 1,1$ кг, падающего с высоты $h = 0,15$ м на полисиликон SP с указан-

ными выше размерами, модуль Юнга последнего вычисляется по формулам (2), (5) при условии, что замеренная емкость пьезодатчика $c_n = 1,7 \cdot 10^{-9}$ Ф.

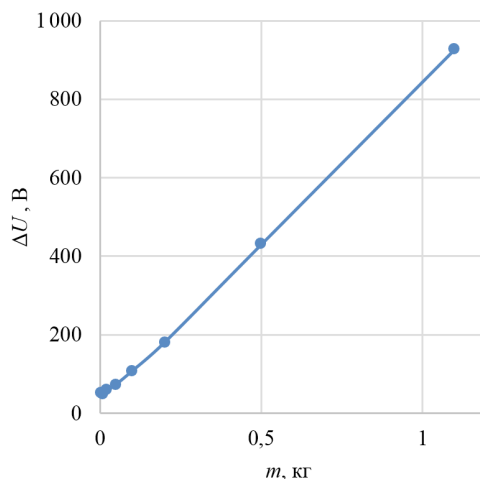
$$E = \frac{11^2 \cdot 0,031}{728854 \cdot 10^{-9} \cdot 0,00346} = 15 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

что в два раза выше модуля Юнга каучука и приблизительно равно модулю



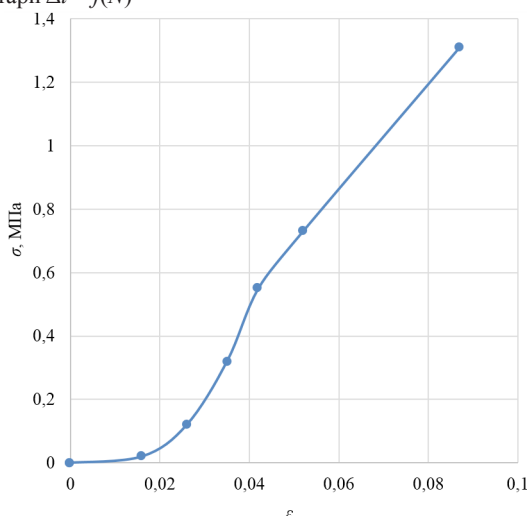
Р и с. 4. График $\Delta l = f(N)$

F i g. 4. Graph $\Delta l = f(N)$



Р и с. 5. График $\Delta U = f(m)$

F i g. 5. Graph $\Delta U = f(m)$



Р и с. 6. График $\sigma = f(\varepsilon)$

F i g. 6. Graph $\sigma = f(\varepsilon)$

Юнга плотной резины с наполнителем из сажи.

Для упругого состояния полисиликона SP на основании данных таблицы 1 построен график изменения коэффициента Пуассона ν в зависимости от массы падающего груза (рис. 7) при условии, что $\nu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}$, где $\varepsilon' = \frac{\Delta d}{d}$, $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$.

В случае сдвига полисиликона модуль поперечной упругости G определяется по формуле:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (6)$$

а его зависимость от массы шара $G = f(m)$ представлена на рисунке 8

Для рассмотренной выше деформации полисиликона SP при массе шара $m = 1,1$ кг и $\nu = 0,977$ (рис. 7), $G = 3,79 \cdot 10^6$ Па.

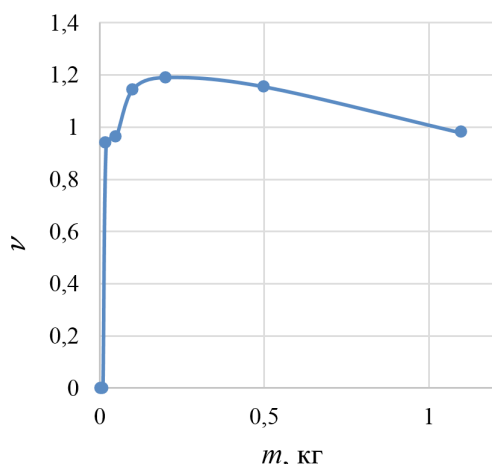
Следует заметить, что рассмотренные механические характеристики полисиликона SP справедливы только в упругом его состоянии, то есть за время деформации при ударе твердого тела о поверхность образца.

Очевидно, что слой полисиликона SP должен плотно прилегать к вну-

треннему слою стеклокомпозитного борта и принимать внешнюю нагрузку от ударов твердых частиц перевозимого груза. При этом очень важно располагать слой полисиликона так, чтобы его затвердевшая при ударе часть опиралась на упругое основание конструкции, которое можно создать в виде трехслойной сэндвич-плиты, представляющей внутреннюю перегородку борта. Конструктивное решение его поперечного сечения исходит из технологических возможностей сборки борта и должно учитывать, что в ненагруженном состоянии полисиликон SP является дилатантной жидкостью, обладающей вязкопластическими свойствами и способностью принимать форму сосуда, в который она помещена.

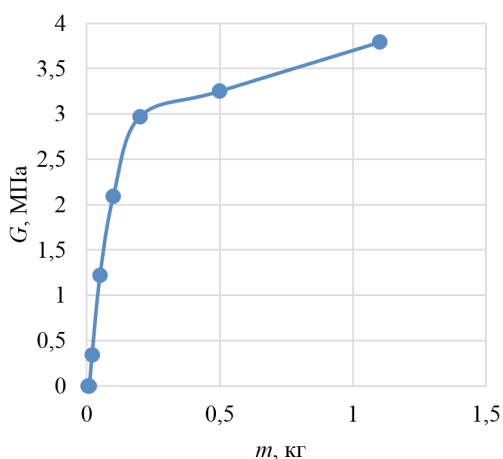
Для уточнения конструктивно-технологических решений было проведено лабораторное тестирование на удар модели композитного борта с полисиликоновым наполнителем и без наполнителя.

Ударные нагрузки, испытываемые композитным бортом транспортного средства во время его эксплуатации, согласно ТУ, направлены обычно по нормали к внутренней поверхности борта. Поэтому его моделью во время



Р и с. 7. График $\nu = f(m)$

F i g. 7. Graph $\nu = f(m)$



Р и с. 8. График $G = f(m)$

F i g. 8. Graph $G = f(m)$

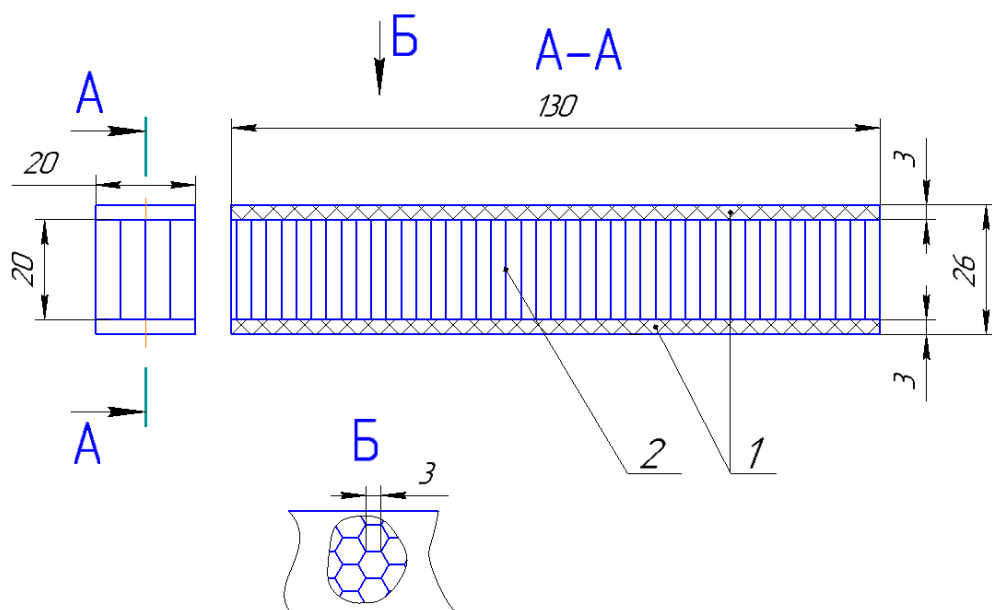
лабораторного тестирования может служить композитный сэндвич-параллелепипед, состоящий из внешней и внутренней пластин ПКМ на основе стеклоткани, соединенных сотовым заполнителем (рис. 9).

В качестве испытательного стенда для лабораторного тестирования образцов был выбран маятниковый копер МК-300 с пневмоподъемом молота. Максимальная энергия маятника 450 Дж. Результаты испытаний фиксировались на аналоговой шкале и микропроцессорном блоке ПО-4Т, с помощью которого автоматически определялась работа удара.

Лабораторное тестирование проводилось согласно ГОСТам для десяти групп образцов⁴. Первые две группы (1 и 2) представляли собой: пустоте-

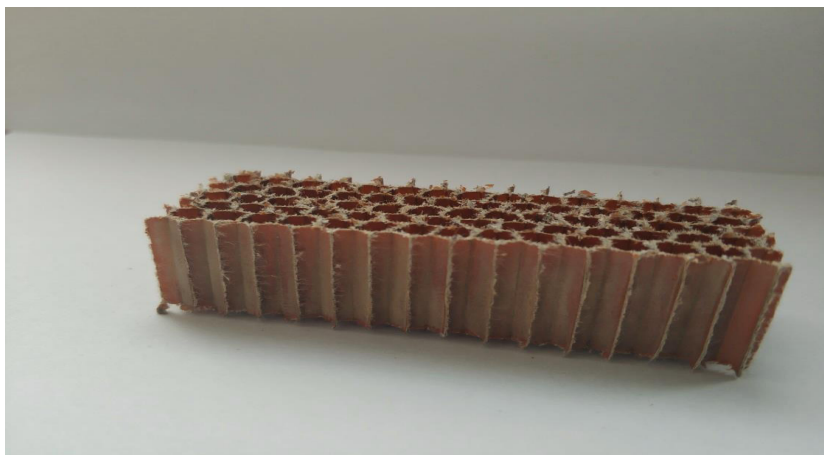
лый параллелепипед из папиросной бумаги, служащий формой для полисилоконового параллелепипеда, и такой же бумажный параллелепипед, но заполненный полисилоконом SP; вторые две группы (3, 4) (рис. 10) изготавливались на основе стеклопластиковых сот, пропитанных эпоксидной смолой, смешанной с дибутилфталатом и полиэтиленполиамином, причем образцы группы 4 имели четыре продольных сквозных отверстия в стенках сот.

Третьи две группы (5, 6) представляли соты, заполненные полисилоконом SP, причем группа 6, как и группа 4, имела продольные отверстия, которые необходимо было ввести, учитывая то, что, согласно работе К. С. Боланда и коллег, длинные молекулы полисилокона SP до удара запутаны и имеют слабые водо-



Р и с. 9. Композитный сэндвич-параллелепипед для сравнительных испытаний борта:
1 – пластины из ПКМ на основе стеклоткани; 2 – соты из стеклотканевого препрега (размеры в мм)
F i g. 9. Composite sandwich parallelepiped for comparative tests of the side: 1 – PCM plates based on fiberglass; 2 – cells made of fiberglass prepreg (dimensions in mm)

⁴ ГОСТ 10708-82. Копры маятниковые. Технические условия (с Изменениями N 1, 2); ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах (с Изменениями N 1, 2).



Р и с. 10. Стеклопластиковые соты с пропиткой эпоксидной смолой (образец группы 3)

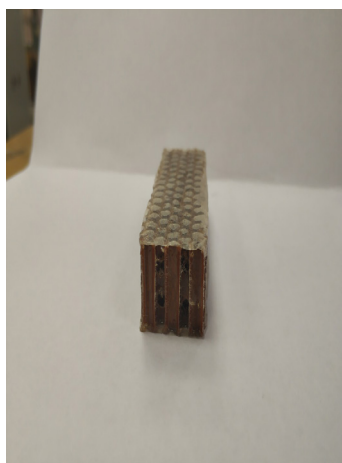
F i g. 10. Fiberglass cells with impregnated with epoxy resin (group sample 3)

родные связи, а во время удара распрямляются [13]. Можно предположить, что такие распрямленные длинные молекулы ведут себя во время удара, как балки на упругом основании, поэтому расположение полисиликона SP по длине образца в продольных отверстиях может привести к большому поглощению энергии удара. Соты верхней и нижней частей образцов были заклеены папи-

росной бумагой (рис. 11) во избежание утечек полисиликона SP.

Группы 7, 8 моделировали варианты борта прицепа без полисиликона. Группа 7 представляла собой пустотелые стеклопластиковые параллелепипеды, группа 8 – параллелепипеды, заполненные стеклопластиковыми сотами.

Последняя группа образцов (9, 10) повторяла конструкцию образцов 7, 8



a)



b)

Р и с. 11. Стеклопластиковые соты, заполненные полисиликоном SP, с продольными отверстиями

F i g. 11. Fiberglass cells filled with SP polysilicon with longitudinal holes

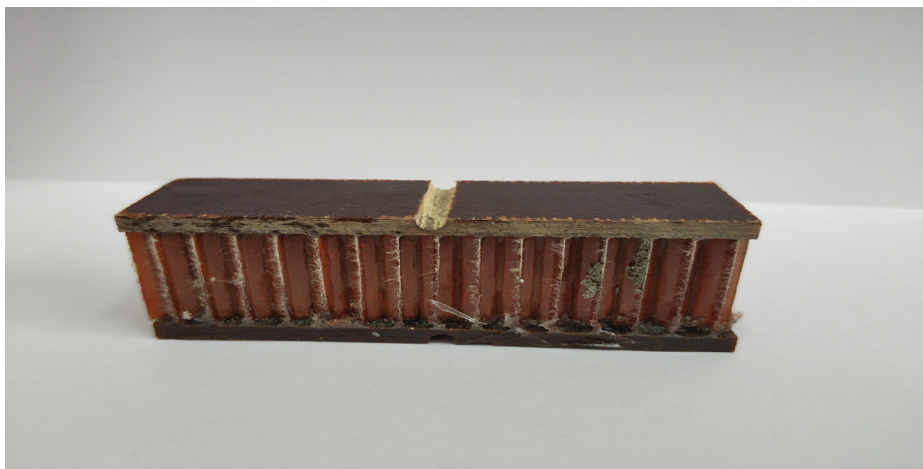
соответственно, но заполненных поли-
силиконом SP (рис. 12).

На рисунке 12 верхняя пластина
стеклопластика подпилена для умень-
шения работы маятника копра при уда-
ре. Разрушение образца из группы 10
показано на рисунке 13.

Способность материала сопротив-
ляться ударным нагрузкам характе-
ризуется ударной вязкостью, которая

определяется отношением величины
работы, затраченной на разрушение
образца, к площади его поперечного
сечения в месте излома.

Все испытанные образцы имели
одинаковые размеры внешнего контура
поперечного сечения, поэтому о стой-
кости к удару можно судить по вели-
чине работы маятникового копра при
их разрушении. Результаты испытаний



Р и с. 12. Образцы для испытаний на удар сэндвичевой сотовой конструкции с заполнением полисиликоном SP

F i g. 12. Impact test specimens of sandwich cells structure filled with SP polysilicon



Р и с. 13. Разрушение образца из группы 8 при ударе маятником копра

F i g. 13. Destruction of a sample from group 8 upon impact by a copra pendulum

десяти групп образцов после соответствующей статистической обработки представлены в таблице 2.

Обсуждение и заключение

На основе анализа результатов испытаний на ударную вязкость композитных конструкций с полисиликоном SP и без него можно сделать следующие выводы:

1. Полисиликон SP в месте удара приобретает механические характери-

стики плотной резины, то есть играет роль упругой прокладки между прилегающими частями конструкции, а после удара становится вязкопластической жидкостью с малой жесткостью.

2. Появление распрямленных длинных молекул в полисиликоне SP во время удара предполагает возникновение упругого слоя SP достаточно большой площади, который перераспределяет

Таблица 2

Table 2

Результаты испытаний на удар

The results of the impact tests

Номер группы / Group number	Описание групп / Description of groups	Математическое ожидание работы по разрушению образца на копке, Дж / Mathematical expectation of sample destruction work with piling machine, J
	Пустой копер без образца / Empty piling machine without sample	0,59
1	Параллелепипед из папиросной бумаги без заполнения полисиликоном SP / Parallelepiped of cigarette paper without SP polysilicon filling	0,67
2	Параллелепипед из папиросной бумаги, заполненный полисиликоном SP / Parallelepiped of cigarette paper filled with SP polysilicon	2,53
3	Соты без продольных отверстий, не заполненные полисиликоном SP / Cells without longitudinal holes not filled with SP polysilicon	3,62
4	Соты с продольными отверстиями, не заполненные полисиликоном SP / Cells with longitudinal holes not filled with SP polysilicon	3,62
5	Соты без продольных отверстий, заполненные полисиликоном SP / Cells without longitudinal holes filled with SP polysilicone	4,73
6	Соты с продольными отверстиями, заполненные полисиликоном SP / Cells with longitudinal holes filled with SP polysilicone	6,77
7	Стеклопластиковый параллелепипед пустотелый / Fiberglass hollow parallelepiped	74,17
8	Стеклопластиковый параллелепипед, заполненный сотами / Fiberglass parallelepiped filled with cells	97,95
9	Стеклопластиковый параллелепипед, заполненный полисиликоном SP / Glass fiberglass parallelepiped filled with SP polysilicon	118,31
10	Стеклопластиковый параллелепипед, заполненный стеклопластиковыми сотами и полисиликоном SP / Fiberglass parallelepiped filled with fiberglass cells and SP polysilicon	106,28

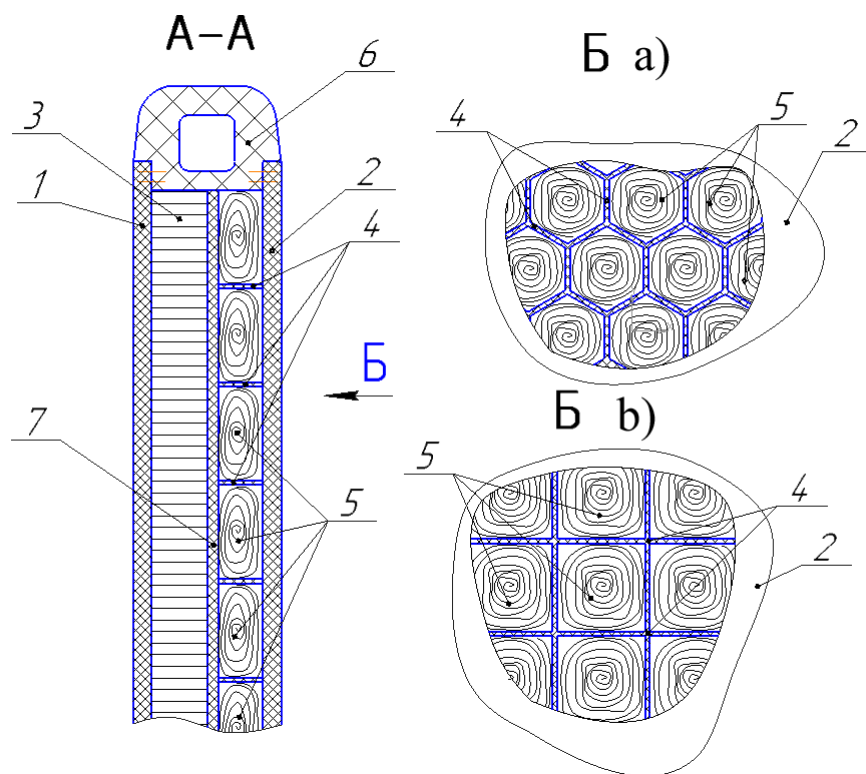
энергию упругой деформации на несущее основание, а значит необходимо конструирование поддерживающей опоры для слоя полисиликона.

3. Для эффективного «затвердевания» полисиликона SP при ударе следует расположить его слой между упругими конструктивными элементами, которые кроме передачи нагрузок должны выполнять функции стенок сосудов, для ограничения течения дилатантной жидкости (полисиликона SP)

в случае отсутствия ударных нагрузок.

Основываясь на этих выводах и на материалах, имеющихся в работах М. В. Астахова, можно рекомендовать следующую конструкцию поперечного сечения А-А борта транспортного средства (рис. 14), вид спереди для которого представлен на рисунке 1 [14; 15].

Так как в ненагруженном состоянии полисиликон SP обладает текучестью, его необходимо заключить в контейнеры, изготовленные из полиэтиленовой или



Р и с. 14. Конструктивное решение сечения А-А борта прицепа, представленного на рисунке 1:
а) расположение полисиликона в больших шестигранных ячейках; б) расположение полисиликона в прямоугольных (квадратных) ячейках; 1 – пластина из ПКМ внешней части борта; 2 – пластина из ПКМ внутренней части борта; 3 – мелкие стеклопластиковые соты; 4 – крупные шестигранные или квадратные соты; 5 – полисиликон SP; 6 – верхний силовой профиль из ПКМ; 7 – внутренняя перегородка из ПКМ

F i g. 14. Constructive solution of the section A-A of the side of the trailer shown in Figure 1:
а) location of polysilicon in large hexagonal cells; б) location of polysilicon in rectangular (square) cells; 1 – PCM plate on the outer side of the board; 2 – PCM plate on the inside of the side; 3 – small fiberglass cells; 4 – large hexagonal or square cells; 5 – polysilicon SP; 6 – upper power profile from RMB; 7 – internal partition from PCM

полистирольной пленки, повторяющие форму либо большой шестигранной, либо прямоугольной ячейки. Размеры ячеек (длина и ширина) ориентировочно не должны быть меньше длины продольного отверстия в образце (рис. 9), так как распрямление длинных молекул полисиликона SP повышает его ударную вязкость (табл. 2), а мелкие соты ограничивают такое распрямление.

Стальные концевые обоймы и петли присоединения борта к грузовой платформе прицепа следует закрепить в пластинах 1 и 2 (рис. 14) крепежными элементами [16].

Из-за того, что боковые удары твердыми телами о композитный борт при загрузке прицепа полужидким или сыпучим грузом сообщают конструкции энергию меньшую, чем при ударе сво-

бодно падающим вниз телом, коэффициент динамичности k_d , найденный по

известной формуле $k_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{f_{ст}}}$,

где $f_{ст}$ – статический изгиб борта в месте удара, будет определять динамическое напряжение «в запас».

Так как при статическом приложении внешних сил полисиликон SP не влияет на изгибную жесткость борта, последний можно рассчитать на прочность как многослойную анизотропную прямоугольную пластинку с дискретным шарнирным опиранием в местах крепления к платформе и торцевым бортам, нагруженную линейно переменной по высоте борта и постоянной по его длине нормально распределенной нагрузкой.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Патент № 1745600 СССР, МПК B62D 33/027, B62D 29/04. Откидной борт платформы грузового транспортного средства : заявл. 28.02.1990 : опубл. 07.07.1992 / Астахов М. В., Дикарев В. В., Русый Е. В. ; патентообладатель Украинский институт инженеров водного хозяйства. – 4 с.
2. Karaduman, N. S. Textile Reinforced Structural Composites for Advanced Applications / N. S. Karaduman, Y. Karaduman, H. Ozdemir [et al.] // Textiles for Advanced Applications. – 2017. – URL: <https://www.intechopen.com/books/textiles-for-advanced-applications/textile-reinforced-structural-composites-for-advanced-applications> (дата обращения: 14.04.2020).
3. Mavhungu, S. T. Aluminum Matrix Composites for Industrial Use: Advances and Trends / S. T. Mavhungu, E. T. Akinlabi, M. A. Onitiri [et al.]. – DOI 10.1016/j.promfg.2016.12.045 // International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing, SMPM. – 2017. – Vol. 7. – Pp. 178–182. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978916302086?via%3Dihub> (дата обращения: 14.04.2020).
4. Becenen, N. Mechanical Properties of Plastic Matrix Composite Materials Used in Tractor Bonnets / N. Becenen, B. Eker, M. Sahin. – DOI: 10.1177/0731684410386990 // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2010. – Vol. 29, Issue 24. – Pp. 3637–3644. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0731684410386990> (дата обращения: 14.04.2020).
5. Misirli, C. An Investigation on Plastic Matrix Composite Materials / C. Misirli, N. Becenen, M. Sahin. – DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.555.406 // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 555. – Pp. 406–412. – URL: <https://www.scientific.net/AMM.555.406> (дата обращения: 14.04.2020).
6. Valasek, P. Epoxy Resin Filled with Primary and Secondary Raw Material – Useable in Agriculture // P. Valasek, J. Kejval, M. Muller. – DOI 10.17221/23/2013-RAE // Research in Agricultural Engineering. – 2014. – Vol. 60, Issue 4. – Pp. 165–171. – URL: <https://www.agriculturejournals.cz/web/rae.htm?volume=60&firstPage=165&type=publishedArticle> (дата обращения: 14.04.2020).

7. **Сорокина, И. И.** Перспективы применения полимерных композитных материалов с добавлением нанокристаллических порошков оксида алюминия в конструировании и ремонте сельскохозяйственной техники / И. И. Сорокина, М. В. Астахов // Труды ГОСНИТИ. – 2012. – Т. 109, № 1. – С. 9–13.

8. **Vaidya, U.** Composites for Automotive, Truck and Mass Transit / U. Vaidya. – Lancaster : DEStech Publications, 2011. – 419 p. – ISBN 978-1-932078-79-4. – URL: https://www.researchgate.net/publication/288004403_Composites_for_Automotive_Truck_and_Mass_Transit (дата обращения: 14.04.2020).

9. **Figlus, T.** Impact of Application of Selected Composite Materials on the Weight and Vibroactivity of the Upper Gearbox Housing / T. Figlus, M. Koziol, L. Kuczynski. – DOI 10.3390/ma12162517 // Materials. – 2019. – Vol. 12, Issue 16. – Pp. 2517. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/16/2517> (дата обращения: 14.04.2020).

10. **Cross, R.** Elastic and Viscous Properties of Silly Putty // R. Cross. – DOI 10.1119/1.4732086 // American Journal of Physics. – 2012. – Vol. 80, Issue 10. – Pp. 870–875. – URL: <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.4732086> (дата обращения: 14.04.2020).

11. **Cross, R.** Elastic Properties of Plasticine, Silly Putty, and Tennis Strings / R. Cross. – DOI 10.1119/1.4767481 // The Physics Teacher. – 2012. – Vol. 50, Issue 9. – Pp. 527–529. – URL: <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.4767481> (дата обращения: 14.04.2020).

12. **Golinelli, N.** Mechanical Behavior of Magnetic Silly Putty: Viscoelastic and Magnetorheological Properties / N. Golinelli, A. Spaggiari, E. Dragoni. – DOI 10.1177/1045389X15591655 // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. – 2017. – Vol. 28, Issue 8. – Pp. 953–960. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1045389X15591655> (дата обращения: 14.04.2020).

13. **Boland, C. S.** Sensitive Electromechanical Sensors Using Viscoelastic Graphene-Polymer Nanocomposites / C. S. Boland, U. Khan, G. Ryan [et al.]. – DOI 10.1126/science.aag2879 // Science. – 2016. – Vol. 354, Issue 6317. – Pp. 1257–1260. – URL: <https://science.sciencemag.org/content/354/6317/1257> (дата обращения: 14.04.2020).

14. **Астахов, М. В.** Применение тонкостенных конструкций в сельскохозяйственном машиностроении / М. В. Астахов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2003. – № 7. – С. 25–27.

15. **Астахов, М. В.** Композиционные материалы в сельскохозяйственном машиностроении / М. В. Астахов, Т. В. Таганцев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2004. – № 9. – С. 42–44.

16. **Патент № 182601 Российская Федерация, МПК F16B.** Крепежный элемент для соединения деталей из слоистых полимерных композиционных материалов на основе стеклотканей и матриц из синтетических смол с металлическими частями конструкции : заявл. 11.05.17 : опубл. 23.08.18 / Астахов М. В. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Астахов М. В., Сорокина И. И., Грачева Е. В. – 6 с.

Поступила 13.11.2019; принята к публикации 16.12.2019; опубликована онлайн 30.06.2020

Об авторах:

Астахов Михаил Владимирович, профессор кафедры колесных машин и прикладной механики Калужского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана» (248600, Россия, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2), доктор технических наук, Publons ID: <https://publons.com/researcher/3506719/mikhail-astakhov/>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8675-1611>, mvastahov@gmail.com

Славкина Екатерина Викторовна, ассистент кафедры колесных машин и прикладной механики Калужского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана» (248600, Россия, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2), Publons ID: <https://publons.com/researcher/3500176/ekaterina-slavkina>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5889-5957>, e.v.slavkina@gmail.com



Заявленный вклад соавторов:

М. В. Астахов – постановка задачи, научное руководство, обсуждение результатов, анализ литературных источников; Е. В. Славкина – изготовление образцов, проведение лабораторных испытаний, статистическая обработка данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Folding Board of the Truck Platform. Patent 1745600 USSR. Appl. 28.02.1990; publ. 07.07.1992. Bulletin No. 25. 4 p. (In Russ.)
2. Karaduman N.S., Karaduman Y., Ozdemir H., et al. Textile Reinforced Structural Composites for Advanced Applications. *Textiles for Advanced Applications*. 2017. Available at: <https://www.intechopen.com/books/textiles-for-advanced-applications/textile-reinforced-structural-composites-for-advanced-applications> (accessed 14.04.2020). (In Eng.)
3. Mavhungu S.T., Akinlabi E.T., Onitiri M.A., et al. Aluminum Matrix Composites for Industrial Use: Advances and Trends. In: International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing, SMPM. 2017; 7:178-182. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.045>
4. Becenen N., Eker B., Sahin M. Mechanical Properties of Plastic Matrix Composite Materials Used in Tractor Bonnets. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2010; 29(24):3637-3644. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/0731684410386990>
5. Misirli C., Becenen N., Sahin M. An Investigation on Plastic Matrix Composite Materials. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 555:406-412. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.555.406>
6. Valasek P., Kejval J., Muller M. Epoxy Resin Filled with Primary and Secondary Raw Material – Useable in Agriculture. *Research in Agricultural Engineering*. 2014; 60(4):165-171. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17221/23/2013-RAE>
7. Sorokina I.I., Astakhov M.V. Prospects of Application of Polymer Composite Materials with Addition of Nanocrystalline Powders of Aluminium Oxide in Design and Repair of Agricultural Machinery. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2012; 109(1):9-13. (In Russ.)
8. Vaidya U. Composites for Automotive, Truck and Mass Transit. Lancaster: DEStech Publications; 2011. 419 p. Available at: https://www.researchgate.net/publication/288004403_Composites_for_Automotive_Truck_and_Mass_Transit (accessed 14.04.2020). (In Eng.)
9. Figlus T., Koziol M., Kuczynski L. Impact of Application of Selected Composite Materials on the Weight and Vibroactivity of the Upper Gearbox Housing. *Materials*. 2019; 12(16):2517. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12162517>
10. Cross R. Elastic and Viscous Properties of Silly Putty. *American Journal of Physics*. 2012; 80(10):870-875. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1119/1.4732086>
11. Cross R. Elastic Properties of Plasticine, Silly Putty, and Tennis Strings. *The Physics Teacher*. 2012; 50(9):527-529. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1119/1.4767481>
12. Golinelli N., Spaggiari A., Dragoni E. Mechanical Behavior of Magnetic Silly Putty: Viscoelastic and Magnetorheological Properties. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2017; 28(8):953-960. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/1045389X15591655>
13. Boland C.S., Khan U., Ryan G., et al. Sensitive Electromechanical Sensors Using Viscoelastic Graphene-Polymer Nanocomposites. *Science*. 2016; 354:1257-1260. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aag2879>
14. Astakhov M.V. Application of Thin-Walled Structures in Agricultural Engineering. *Traktory i selkhozmachiny = Tractors and Agricultural Machinery*. 2003; (7):25-27. (In Russ.)

15. Astakhov M.V., Tagantsev T.V. Composite Materials in Agricultural Engineering. *Traktory i sel'hoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2004; (9):42-44. (In Russ.)
16. Fixing Element for Joining Parts Made of Laminated Polymer Composite Materials Based on Glass Fabrics and Synthetic Resin Matrixes with Metal Parts of Construction: Patent 182601 Russian Federation. Appl. 11.05.17; publ. 23.08.18. Bulletin No. 24. 6 p.

Received 13.11.2019; revised 16.12.2019; published online 30.06.2020

About the authors:

Mikhail V. Astakhov, Professor of Chair of Wheeled Machines and Applied Mechanics, Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University (2 Bazhenov St., Kaluga 248600, Russia), D.Sc. (Engineering), Publons ID: <https://publons.com/researcher/3506719/mikhail-astakhov/>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8675-1611>, mvastahov@gmail.com

Ekaterina V. Slavkina, Assistant of Chair of Wheeled Machines and Applied Mechanics, Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University (2 Bazhenov St., Kaluga 248600, Russia), Publons ID: <https://publons.com/researcher/3500176/ekaterina-slavkina>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5889-5957>, e.v.slavkina@gmail.com

Contribution of the authors:

M. V. Astakhov – task definition, scientific guidance, discussion of results, analysis of scientific literature; E. V. Slavkina – sample production, laboratory testing, statistical data processing.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

УДК 621.31:004.942

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202002.287-299



Синтез структуры технологических процессов

С. Ю. Калякулин^{1*}, В. В. Кузьмин¹, Э. В. Митин¹,
С. П. Сульдин¹, Т. Б. Тюрбеева²

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

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

*rim-tm@mail.ru

Введение. Целью работы является повышение уровня автоматизации разработки технологической документации за счет решения задачи синтеза структуры технологических процессов.

Материалы и методы. Проведенный авторами обзор состояния вопроса разработки структуры технологических процессов в автоматизированном режиме показал сложность его формализации из-за большого количества факторов, которые необходимо учитывать при его разработке. На основании этого был разработан алгоритм, позволяющий решать поставленную задачу на основе синтеза технологических процессов.

Результаты исследования. В данной статье установлены связи между параметрами структуры технологических процессов на основе формирования множества допустимых переходов. Привлечены соотношения между параметрами структуры. Разработан обобщенный алгоритм на основе синтеза.

Обсуждение и заключение. Задачи, решаемые в данной статье, позволяют сделать шаг вперед в повышении уровня автоматизации расчета параметров в системах автоматизированного проектирования. Реализация разработанного на основе синтеза алгоритма проектирования технологических процессов позволит повысить общий уровень автоматизации проектирования технологического процесса.

Ключевые слова: структура, синтез, переходы, модели, бинарное отношение, алгоритм, метод.

Для цитирования: Калякулин, С. Ю. Синтез структуры технологических процессов / С. Ю. Калякулин, В. В. Кузьмин, Э. В. Митин [и др.]. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202002.287-299 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 2. – С. 287–299.

Synthesis of the Structure of Technological Processes

S. Yu. Kalyakulin^{a*}, V. V. Kuzmin^a, E. V. Mitin^a, S. P. Suldin^a,
T. B. Tyurbееva^b

^aNational Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

^bMoscow State University of Technology "STANKIN" (Moscow, Russia)

*rim-tm@mail.ru

Introduction. The purpose of the study is to increase the level of automation of the technical documentation development through solving a problem of synthesis of the structure of technological processes.

Materials and Methods. The authors reviewed the current status of the issue of developing the automated structure for technological processes that have shown the complexity of its formalization because of a considerable quantity of tasks which must be considered in developing. The algorithm for solving these tasks based on synthesis of technological processes has been developed.

Results. The authors identified the relations between the parameters of the structure of technological processes based on the formation of many admissible transitions. The generalized algorithm on the basis of the synthesis is developed.

Discussion and Conclusion. The tasks solved in this article allow increasing the level of automation of calculation of the parameters in systems of automated designing. The implementation of the algorithm for designing technological processes, which is developed on the basis of synthesis, allows increasing the general level of automation of designing technological processes.

Keywords: structure, synthesis, transition, models, binary relation, algorithm, method

For citation: Kalyakulin S.Yu., Kuzmin V.V., Mitin E.V., et al. Synthesis of the Structure of Technological Processes. *Инженерные технологии и системы* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(2):287-299. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.287-299>

Введение

Процесс разработки документации технологического процесса (ТП) состоит из двух этапов: 1) разработки структуры ТП и 2) расчета параметров. Первый этап, включающий в себя разработку операций и переходов, слабо автоматизирован из-за плохой формализации этого процесса и многовариантности возможных применяемых решений. Используются сегодня системы автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) при разработке структуры ТП используют эвристические методы, которые не всегда являются гарантированно точными. Используемые алгоритмы основаны на небольшом количестве типовых технологических процессов,

наиболее часто применяемых на практике. Прикладные алгоритмы препятствуют дальнейшему развитию систем и их более широкому применению за счет наибольшей адаптации. Структура, разработанная на основе типовых алгоритмов, в большинстве случаев требует ручной корректировки, что приводит к уменьшению степени автоматизации. Ввод исходной информации для проектирования структуры ТП осуществляется чрез диалоговое окно, в которое оператору необходимо ввести наиболее полную информацию об изделии и средствах производства. Анализируя входную информацию, система предлагает типовой алгоритм структуры ТП, который оператор может принять и при необходимости провести корректировку.

Если система не обладает алгоритмом, предназначенным для конкретной ситуации, эффективность проектирования структуры заметно снижается. Решение данной проблемы является важной задачей на пути полной автоматизации разработки технологического процесса и цифровизации производства.

Обзор литературы

Проектирование структуры ТП на основе синтеза является одним из вариантов повышения уровня автоматизации проектирования ТП с использованием унифицированных САПР ТП. На сегодняшний день основным принципом проектирования является диалоговый, а сами системы САПР ТП служат автоматизированной базой данных, из которой технолог получает необходимую информацию и компилирует технологический процесс.

Частичное решение данной проблемы рассмотрено в работе О. В. Миловзорова, в которой автор предлагает новую методику автоматизированного проектирования ТП на основе расширенной трактовки понятия обобщенной структуры, включающей операции, переходы и информационные модели детали [1]. Для решения поставленной задачи автор использовал САПР ТП T-FLEX Технология. Инструментом для создания прототипов ТП служили унифицированные шаблоны текстов переходов с привязкой к соответствующим технологическим элементам.

В работе А. Г. Лютова и соавторов рассмотрен вопрос интеллектуального управления производственным процессом, который создает условия для изменения технологических параметров и структуры задачи обработки и анализа знаний, переходов и операций [2]. Авторами предложен новый метод представления знаний на основе XML-схем. Предлагаемый подход к структурному синтезу ТП позволяет значительно сократить время на подготовку, генерацию и корректировку управляющих

программ для оборудования с числовым программным управлением.

Разработке моделей и методики автоматизации проектирования структуры технологических операций для токарных станков посвящена работа С. Г. Митина [3]. Автор разрабатывает модели генерации вариантов структур технологических операций для оборудования токарной группы, которые включают в себя модель процедуры рационального размещения режущего инструмента по позициям оборудования; модель объединения комплектов сети Петри в варианты операций; модель установления порядка выполнения технологических переходов. Кроме этого, автор разрабатывает методики отсева нерациональных вариантов структур технологических операций, выбора рациональных вариантов структур технологических операций. По мнению автора, предложенные модели и методики позволяют формализовать проектные процедуры для оформления рациональных структур технологических операций для токарных станков.

Работка структурного представления о технологических процессах на основе онтологии и объектно-ориентированных сред рассматривается в работе В. А. Игруши и С. С. Сосинской [4]. Авторами исследуются этапы построения онтологии для описания построения технологических процессов в их связи с диаграммой бизнес-процессов, целесообразность совместного использования онтологии и объектно-ориентированных баз данных, эффективность применения программного продукта ANTLER для автоматизированного преобразования из одного представления в другое.

Автоматизации выбора структуры технологических процессов посвящен ряд работ, в которых авторы разрабатывают методику автоматизированного выбора баз, что является наиболее трудно формализуемой задачей при проек-

тировании ТП [5–7]. Автоматизации выбора баз для корпусных деталей на многоцелевых станках посвящены работы Д. Е. Максимовского [8; 9].

Автоматизация синтеза структуры ТП может быть полезна в любых отраслях современного машиностроительного производства [10], в том числе при проектировании сложных механизмов, таких как промышленные роботы [11–14].

Материалы и методы

В статье рассматривается синтез структуры ТП как способ автоматизации проектирования технологических процессов. Технологическая подготовка производства включает в себя этап проектирования технологического процесса в системах САПР ТП, в которых могут быть применены результаты, изложенные в данной статье.

В основе полученных научных результатов лежат фундаментальные положения выбора технологических баз, методики разработки алгоритмических структур, теории графов и построения математических моделей, методологии проектирования ТП.

Результаты исследования

Синтез технологического процесса подразумевает объединение различных элементов технологического процесса (операций и переходов), полученных в результате анализа (разделения) в единую систему. Система в свою очередь представляет множество элементов, связанных между собой и образующих единое целое.

Рассмотрим понятие «система» как технологический процесс обработки деталей, а «синтез» как исходные элементы, представляющие собой переходы, объединенные в ТП.

Структура параметров технологического процесса, включающие в себя множество составляющих элементов, представлены на рисунке 1.

Синтез технологических процессов ориентирован на решение алгоритми-

ческих задач выбора структуры S и расчета параметров t [10]:

1) выбор исходного множества M технологических переходов, необходимых для обработки данной детали в заданной производственной системе;

2) выявление отношений и установление связей на множестве M технологических переходов, последующим их упорядочиванием и объединением в операции;

3) расчет параметров t для операций и переходов.

Рассмотрим элементы синтеза ТП механической обработки (МО) при решении указанных задач.

Элементы модели M_1 включают в себя виды поверхностей и средства производства (технологические предметы). Например, технологическое оборудование, применяемое приспособление, мерительный и режущий инструмент.

Основная задача, выполняемая на переходах, заключается в придании необходимым поверхностям заготовки формы, максимально приближенной и соответствующей всем показателям точности детали, представленной на чертеже.

Математическая модель, отражающая множество допустимых переходов имеет вид:

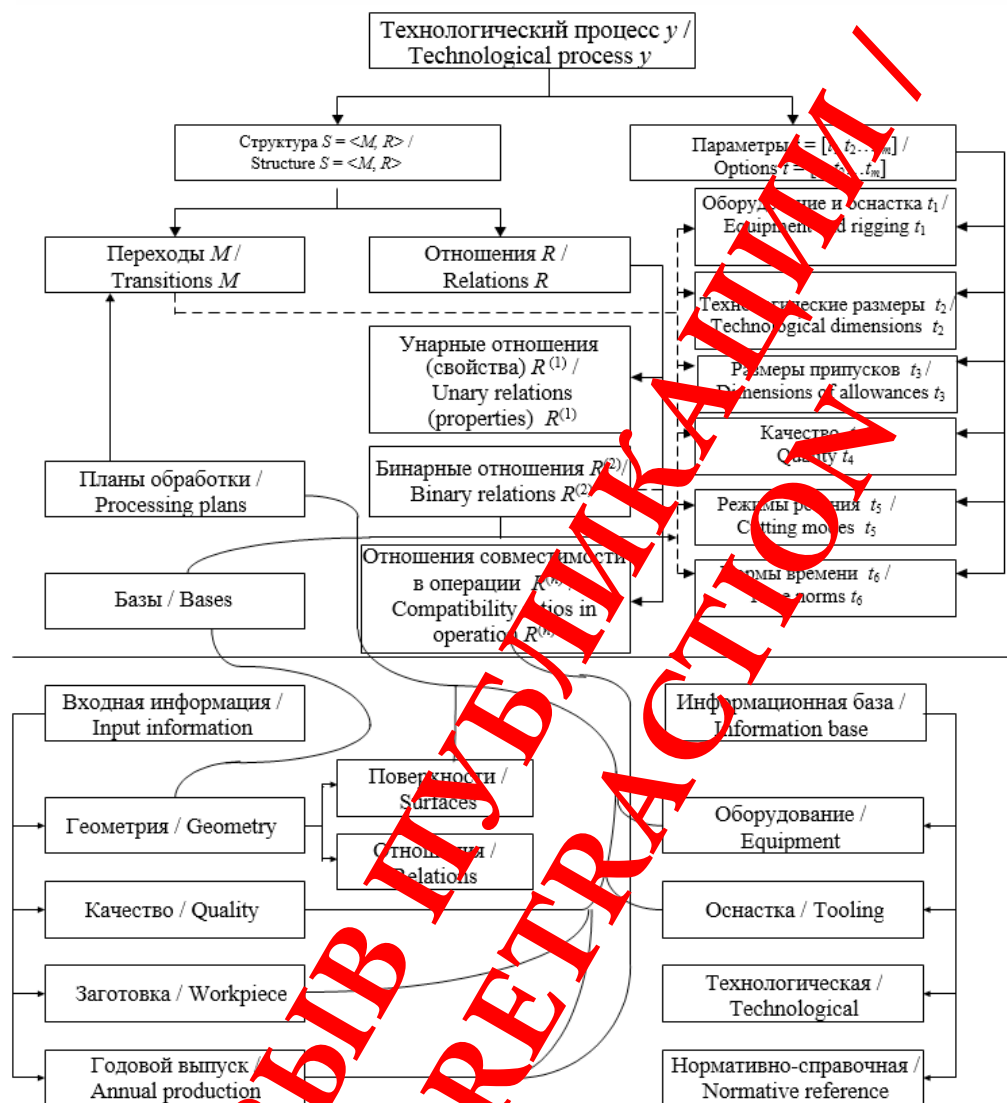
$$M_1 = \langle M_1, R_1 \rangle, \quad (1)$$

где M_1 – множество поверхностей и средств производства; R_1 – множество отношений на M_1 .

Объединим множество M_1 в подмножества:

$$M_1 = M_{1.1} \cup M_{1.2} \cup M_{1.3} \cup M_{1.4}, \quad (2)$$

где $M_{1.1}$ – множество поверхностей детали после механической обработки и поверхности заготовки; $M_{1.2}$ – множество технологического оборудования; $M_{1.3}$ – множество инструментов; $M_{1.4}$ – множество методов обработки (точение



Р и с. 1. Составные элементы синтеза технологического процесса механической обработки

Fig. 1. Composite elements of the synthesis of the machining process

черновое, фрезерование черновое, шлифование окончательное и т. д.).

Рассмотрим множество отношений $R_1 = \{R_1^{(1)}, R_2^{(2)}, \dots, R_n^{(n)}\}$ на M_1 .

$R_1^{(1)}$ – унарные отношения, к которым относится набор параметров исходного множества M_1 . Характеристики технологических предметов (виды

поверхностей и средства производства) для множеств $M_{1,1}$, $M_{1,2}$, $M_{1,3}$, $M_{1,4}$ отражены в таблице 1.

$R_2^{(2)}$ – бинарные отношения, к которым относятся: $R_{2,1}^{(2)}$ – «обрабатываемая поверхность – методы обработки»; $R_{2,2}^{(2)}$ – «обрабатываемая поверхность – вид технологического оборудования»;

Характеристики технологических предметов
Characteristics of technological objects

Предметы / Subject	Характеристики / Characteristics				
Поверхности / Surfaces	тип поверхности / type of surface	параметры / parameters	точность / accuracy	твёрдость / hardness	шероховатость / roughness
Станки / Machine tools	тип станка / machine type	рабочая зона / work zone	точность / accuracy	производительность / productivity	тип метода / method type
Инструмент / Tool	тип инструмента / tool type	геометрия / geometry	тип метода / method type	тип станка / machine type	–
Методы / Methods	тип метода / method type	параметры / parameters	точность / accuracy	тип поверхности / type of surface	–

$R_{2,3}^{(2)}$ – «обрабатываемая поверхность – применяемый инструмент».

На рисунке 3 показана геометрическая интерпретация бинарного отношения «обрабатываемая поверхность – методы обработки», а на рисунке 4 бинарного отношения «обрабатываемая поверхность – вид технологического оборудования». К тернарным отношениям $R^{(3)}$ относится совместное использование «технологическое оборудование – метод обработки – применяемый инструмент».

$R^{(4)}$ – элемент отношения, включающий в себя свойство четверки быть технологическим переходом и, соответственно, включать в себя обрабатываемые поверхности, виды технологического оборудования, применяемые инструменты, методы обработки.

Помимо явной формы представления отношений (исходные) множество $R^{(n)}$ модели M можно задать, используя правила вывода P (выводимые).

К группе выводимых относятся отношения технологических переходов.

Из исходных (унарных) отношений сформируем правила вывода отношений $R^{(2)}$ и $R^{(3)}$.

1. Два предмета $(m_i \in M_1) \wedge (m_j \in M_1)$ находятся в отношении $m_i R^{(2)} m_j$, если типы $[m_i = m_j]$ и выполняется условие:

параметры $F[m_i, m_j] = 1$, где $[m, \text{тип}]$ – значение типа предмета. Например, два предмета ($m_i =$ «точение» и $m_j =$ «внешняя цилиндрическая») находятся в бинарном отношении «метод обработки – обрабатываемая поверхность» при условии, что их параметры имеют одинаковый тип (тип поверхности) и выполняется условие согласования:

$$F(D_{\min} \leq D_i \leq D_{\max}) = 1, \quad (3)$$

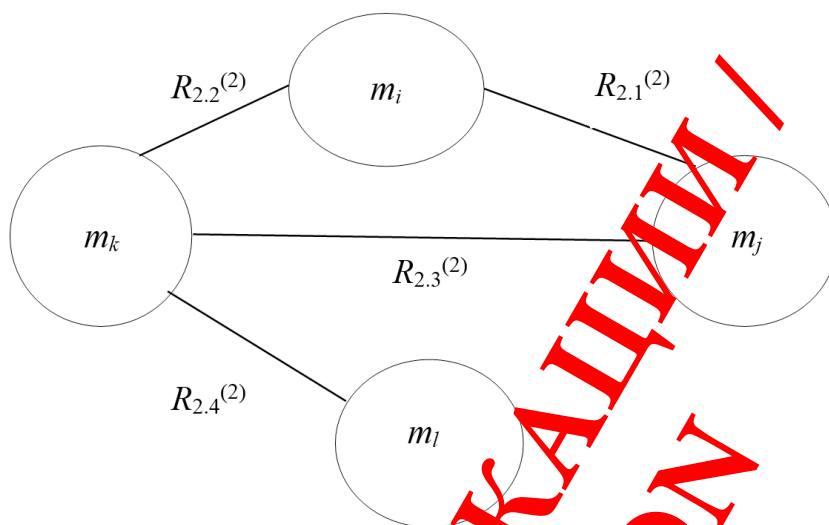
где $F(x) = 1$, если соотношение x выполняется, и $F(x) = 0$ – в противном случае; D_{\min}, D_{\max} – параметры предмета m_j ; D_i – параметр предмета m_i .

2. Если $m_i R^{(2)} m_j$ и $m_j R^{(2)} m_k$, то $m_i R^{(2)} m_k$.
3. Элементы m_i, m_j, m_k, m_l находятся в отношении $(m_i, m_j, m_k, m_l) R^{(4)}$, если бинарные отношения выполняются попарно: $(m_i, m_j) R_{2,1}^{(2)}$, $(m_j, m_k) R_{2,2}^{(2)}$, $(m_k, m_l) R_{2,3}^{(2)}$, $(m_i, m_l) R_{2,4}^{(2)}$.

Изобразим геометрическую интерпретацию отношения $R^{(2)}$ в виде графа, представленного на рисунке 2.

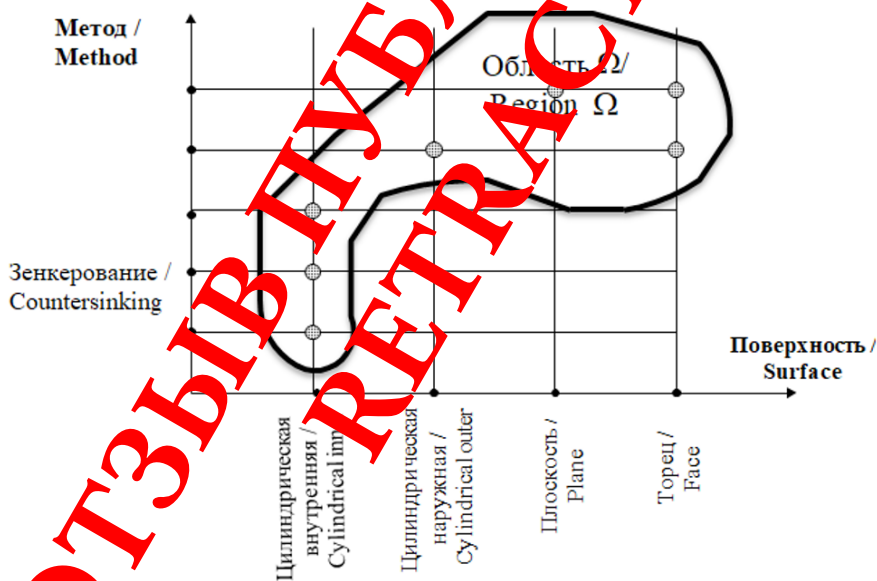
Технологический переход рассматривается как упорядоченная четверка (m_i, m_j, m_k, m_l) предметов, которые находятся между собой в отношении $R^{(4)}$ (отношение согласования) [10].

На рисунках 3, 4 показаны геометрические модели интерпретации би-



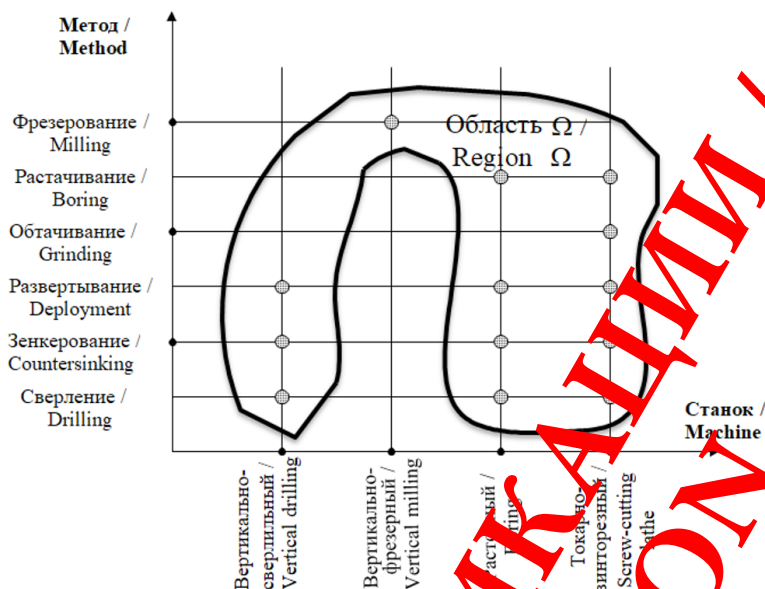
Р и с. 2. Граф бинарных отношений

F i g. 2. Graph of binary relations



Р и с. 3. Бинарное отношение «метод обработки – обрабатываемая поверхность»

F i g. 3. Binary relation "method – the processed surface"



Р и с. 4. Бинарное отношение «технологическое оборудование – метод обработки»
F i g. 4. Binary relation «method – machine»

нарных отношений «метод обработки – обрабатываемая поверхность» и «технологическое оборудование – метод обработки».

На основе построенных геометрических моделей отношений разработаем алгоритм синтеза структуры технологического процесса (рис. 5).

Блок-схема алгоритма синтеза показана на рисунке 5.

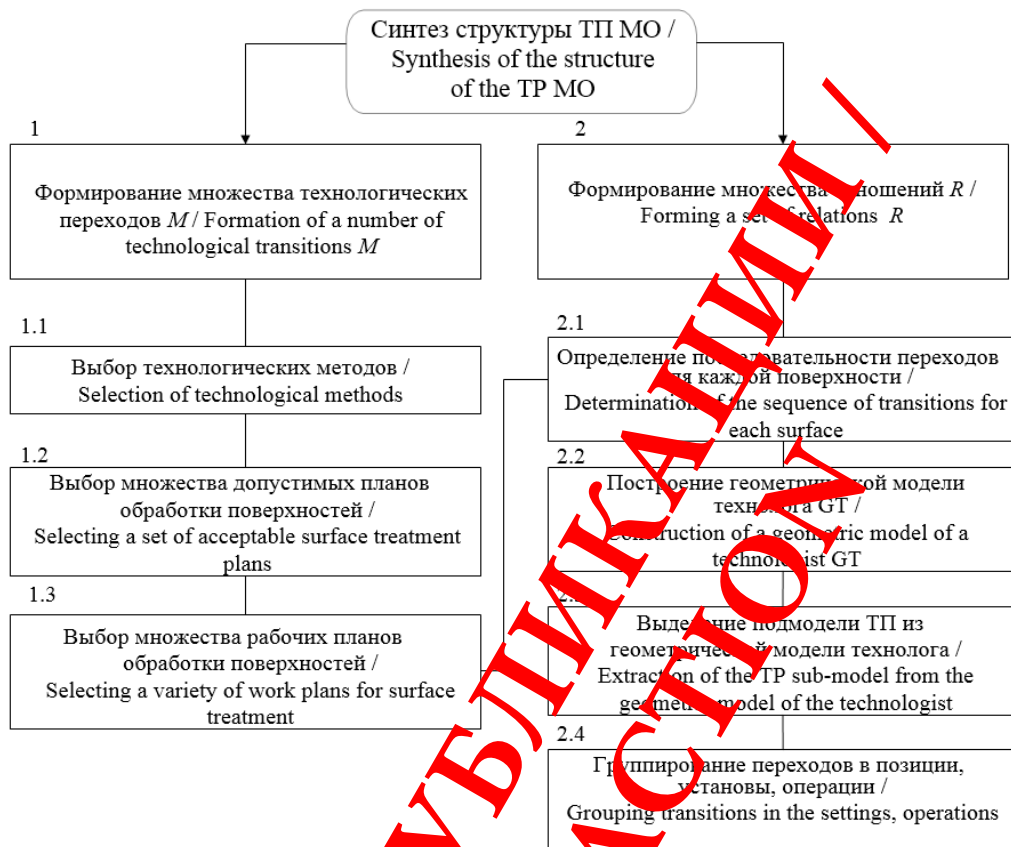
Рассмотрим представленные операторы более подробно. Множество технологических методов. Оператор 2.1) определяющеее парой «наименование технологического перехода – наименование этапа обработки», отвечает за достижение обрабатываемой поверхностью соответствия всем заданным требованиям точности, представленным на конструкторском чертеже детали, начиная от подготовки до окончательной обработки. Например: указанная на чертеже детали шероховатость $Ra = 3,2$ при обработке отверстия втулки может

быть достигнута следующими технологическими методами: «зенкерование – чистовой этап» или «развертывание – чистовой этап».

Упорядочивание технологических переходов в технологический процесс выполняется с помощью операторов 2.2–2.4.

Геометрическая модель обрабатываемой заготовки технолога GT определяет возможные варианты обработки поверхностей детали с использованием различных схем базирования, технологического оборудования, инструмента, оснастки и создается с помощью оператора 2.2.

Далее в геометрической модели технолога GT происходит выделение подмоделей структуры технологического процесса (оператор 2.3), которая позволяет упорядочить технологические переходы в технологический процесс и провести некоторую задачу оптимизации на графах.



Р и с. 5. Алгоритм синтеза структуры технологического процесса

F i g. 5. Synthesis algorithm of structure of technological process

Оператор 2.4 группирует технологические переходы на основе решения задач оптимизации на графах. Состав структуры группировки подсистемы в большой степени зависят от выбранных методов проектирования.

Самыми универсальными подсистемами проектирования ТП являются подсистемы, реализующие метод синтеза структуры ТП и формализующие этапы проектирования.

Обсуждение и заключение

На основе выявленных связей раскрыто понятие структуры ТП, которая представлена в виде совокупности

бинарных отношений на множестве технологических переходов, вследствие чего разработана математическая модель, позволяющая производить моделирование комплектов технологических баз при обработке на металлообрабатывающих станках с учетом требований к качеству изделия с последующей оптимизацией полученных результатов. Установленные связи позволили алгоритмизировать основные этапы автоматизации разработки структуры ТП деталей в автоматизированном производстве. Разработан алгоритм синтеза структуры технологического процесса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Миловзоров, О. В.** Реализация принципов синтеза технологических процессов из обобщенной структуры на базе системы T-FLEX Технология / О. В. Миловзоров // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2015. – № 54. – С. 133–138.
2. **Лютюв, А. Г.** Интеллектуальное управление процессами технологической подготовки машиностроительного производства / А. Г. Лютюв, Ю. В. Рябов, Р. И. Шайдуллин [и др.]. – DOI 10.14529/ctcr170312 // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 117–124. – URL: <https://vestnik.susu.ru/ctcr/article/view/6068> (дата обращения: 27.04.2020). – Рез. англ.
3. **Митин, С. Г.** Модели и методики автоматизации процедур разработки структур технологических операций, реализуемых на оборудовании токарной группы / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-2-11 // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 2. – С. 119–130. – URL: <https://izvuz.tn.phzgu.ru/tn11218> (дата обращения: 27.04.2020). – Рез. англ.
4. **Игруша, В. А.** Формализация описания технологических процессов изготовления деталей машиностроения на основе онтологии и объектно-ориентированных баз данных / В. А. Игруша, С. С. Сосинская. – DOI 10.18287/2223-9537-2017-7-1-77-88 // Онтология проектирования. – 2017. – № 1. – С. 77–88. – URL: http://www.ontology-of-designing.ru/article/2017_1%282%29/6_Igrusha.pdf (дата обращения: 27.04.2020). – Рез. англ.
5. **Новиков, О. А.** Методика выбора технологических баз при проектировании технологических процессов механической обработки / О. А. Новиков, С. В. Байбаков // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. – 2009. – № 4. – С. 73–75.
6. **Байбаков, С. В.** Система комплексной автоматизации технологической подготовки производства / С. В. Байбаков // Программные продукты и системы. – 2010. – № 1. – С. 28. – URL: <http://www.swsys.ru/index.php?page=article&id=243> (дата обращения: 27.04.2020). – Рез. англ.
7. **Калякулин, С. Ю.** Проектирование структур технологических процессов на основе синтеза / С. Ю. Калякулин, В. В. Кузьмин, Э. В. Митин [и др.]. – DOI 10.15507/0236-2910.028.201801.077-084 // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 1. – С. 77–84. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/ru/articles2/57-18-1/384-10-15507-0236-2910-028-201801-077-084> (дата обращения: 27.04.2020). – Рез. англ.
8. **Кузьмин, В. В.** Выбор технологических баз на основе решения прямой задачи размерного анализа / В. В. Кузьмин, Д. Е. Максимовский // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2012. – № 2. – С. 64–69. – URL: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/590> (дата обращения: 27.04.2020).
9. **Maksimovskii, D. E.** Automation of Process Design by Design-Technological Parameterization / D. E. Maksimovskii. – DOI 10.3103/S1068798X1109019X // Russian Engineering Research. – 2011. – Vol. 31, Issue 9. – Pp. 870–872. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068798X1109019X> (дата обращения: 27.04.2020).
10. **Kalyakulin, S. Yu.** Algorithm for Calculating the Parameters of the Initial Blank in the SITEP MO Automated Design System / S. Yu. Kalyakulin. – DOI 10.3103/S1068798X14110082 // Russian Engineering Research. – 2014. – Vol. 34, Issue 11. – Pp. 713–715. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103%2FS1068798X14110082> (дата обращения: 27.04.2020).
11. **Кузнецов, П. М.** Цифровизация процессов восстановления дробильно-измельчительного оборудования / П. М. Кузнецов, Л. Л. Хорошко. – DOI 10.25018/0236-1493-2019-10-0-195-205 // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 10. – С. 195–205. – URL: <http://giab-online.ru/catalog/12886> (дата обращения: 27.04.2020). – Рез. англ.
12. **Цырков, А. В.** Проектно-операционное управление в машиностроительном производстве / А. В. Цырков, П. М. Кузнецов, Г. А. Цырков [и др.]. – DOI 10.15507/0236-2910.028.201804.511-522 // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 4. – С. 511–522. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/ru/articles2/76-18-4/564-10-15507-0236-2910-028-201804-3> (дата обращения: 27.04.2020). – Рез. англ.



13. Бутко, А. О. Построение информационных моделей в интегрированных системах // А. О. Бутко, П. М. Кузнецов // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу. – 2019. – № 3. – С. 20–25. – URL: http://izdat.ntkompas.ru/editions/for_readers/archive/article_detail.php?SECTION_ID=160&ELEMENT_ID=24794 (дата обращения: 27.04.2020).

14. Москвин, В. К. Привод технологического робота токарного роботизированного комплекса / В. К. Москвин, П. М. Кузнецов // Технология машиностроения. – 2018. – № 11. – С. 45–48. – URL: http://www.ic-tm.ru/info/11_254 (дата обращения: 27.04.2020).

Поступила 18.11.2019; принята к публикации 20.01.2020; опубликована онлайн 30.06.2020

Об авторах:

Калякулин Сергей Юрьевич, доцент кафедры технологии машиностроения Рузавского института машиностроения ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), кандидат технических наук, Researcher ID: V-53405-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0644-7746>, rim-tm@mail.ru

Кузьмин Владимир Владимирович, профессор кафедры технологии машиностроения Рузавского института машиностроения ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), доктор технических наук, Researcher ID: V-53405-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6318-8563>, kvv2607@yandex.ru

Митин Эдуард Валерьевич, доцент кафедры технологии машиностроения Рузавского института машиностроения ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), кандидат технических наук, Researcher ID: V-53383-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9899-3420>, rimnauka@rambler.ru

Сульдин Сергей Петрович, заведующий кафедрой технологии машиностроения Рузавского института машиностроения ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), кандидат технических наук, доцент, Researcher ID: V-53381-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8159-6322>, instanok@mail.ru

Тюрбеева Татьяна Борисовна, доцент кафедры информационных технологий и вычислительных систем ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (127994, Россия, г. Москва, Баковский пер., д. 1), кандидат технических наук, Researcher ID: V-5050-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6693-5974>, turbееv@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

С. Ю. Калякулин – разработка алгоритма структуры технологических процессов на основе синтеза; В. В. Кузьмин – научное руководство, постановка задачи исследования; Э. В. Митин – анализ литературных данных; С. П. Сульдин – разработка моделей технологических процессов; Т. Б. Тюрбеева – написание текста статьи, построение графа бинарных отношений.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Milovzorov V. Implementation of the Principles of Synthesis of Technological Processes from a Generalized Structure based on the T-Flex Technology System. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta* = Ryazan State Radio Engineering University Bulletin. 2015; (54):133-138. (In Russ.)
2. Lutov A.S., Ryabov Yu.V., Shaydullin R.I., et al. Intellectual Control of Processes of Technological Preparation of Machine-Building Production. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Kompyuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* = South Ural State University Bulletin. Series: Computer Technology, Automatic Control, Radio Electronics. 2017; 17(3):117-124. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.14529/ctcr170312>

3. Mitin S.G., Bochkarev P.Yu. Models and Methods of Automation of Procedures for Development of Structures of Technological Operations Implemented on the Equipment of the Large Group. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = University Proceedings. Volga Region. Engineering Sciences. Computer Science. 2018; (2):119-130. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2018-2-11>
4. Igrusha V.A., Sosinskaya S.S. Formalization of Description of Technological Processes for Manufacturing of Machine-Building Parts on the Basis of Ontology and Object-Oriented Databases. *Ontologiya proektirovaniya* = Ontology of Designing. 2017; (1):77-88. (In Russ.) DOI: <http://doi.org/10.18287/2223-9537-2017-7-1-77-88>
5. Novikov O.A., Baybakov S.V. Methods for Selecting Technological Bases when Designing Machining Processes. *Upravlenie kachestvom v neftegazovom komplekse* = Quality Management in Oil and Gas Complex. 2009; (4):73-75. (In Russ.)
6. Baybakov S.V. Complex Automation System of Process Planning. *Programmnye produkty i sistemy* = Software & Systems. 2010; (1):28. Available at: <http://www.swsys.ru/index.php?page=article&id=2437&lang=> (accessed 27.04.2020). (In Russ.)
7. Kalyakulin S.Yu., Kuzmin V.V., Mitin E.V., et al. Designing the Structure of Technological Processes Based on Synthesis. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(1):77-84. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.201801.077-084>
8. Kuzmin V.V., Maksimovskiy D.E. Choice of Technological Bases on the Basis of the Decision of a Direct Problem of the Dimensional Analysis. *Vestnik MSTU "STANKIN"* = MSTU STANKIN Bulletin. 2012; 2:64-69. Available at: <http://www.stankinjournal.ru/articles/52/> (In Russ.) (accessed 27.04.2020). (In Russ.)
9. Maksimovskiy D.E. Automation of Process Design by Design-Technological Parameterization. *Russian Engineering Research*. 2011; 1(9):870-871. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X1109019X>
10. Kalyakulin S.Yu. Algorithm for Calculating the Parameter of the Initial Blank in the SITEP MO Automated Design System. *Russian Engineering Research*. 2014; 3(11):713-715. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X14110082>
11. Kuznetsov P.M., Khoroshko L.L. Optimization of Crushing and Milling Equipment Reconditioning. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* = Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). 2019; (10):195-205. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-10-0-195-205>
12. Tsytkov A.V., Kuznetsov P.M., Tsytkov G.A., et al. Project and Operations Management of Machine-Building Production. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(4):511–522. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.511-522>
13. Butko A.O., Kuznetsov P.M. Building Information Models in Integrated Systems. *Oboronnnyy kompleks – nauchno-tekhnicheskiy progressu Rossii* = Defense Complex to Scientific and Technical Progress of Russia. 2019; (3):20-25. Available at: http://izdat.ntkompas.ru/editions/for_readers/archive/article_detail.php?SECTION_ID=60&ELEMENT_ID=24794 (accessed 27.04.2020). (In Russ.)
14. Moskvina V.K., Kuznetsov P.M. Drive of a Technological Robot of a Turning Robotic Complex. *Tekhnologiya mashinostroyeniya* = Engineering Technology. 2018; (11):45-48. Available at: http://www.ic-tm.ru/info/11_254 (accessed 27.04.2020). (In Russ.)

Received 18.11.2019; revised 20.01.2020; published online 30.06.2020

About the authors

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



Vladimir V. Kuzmin, Professor of Chair of Mechanical Engineering Technology of Ruza-
yevka Institute of Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya
St., Saransk 430005, Russia), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: V-5405-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6318-8563>, kvv2607@yandex.ru

Eduard V. Mitin, Associate Professor of Chair of Mechanical Engineering Technology of Ru-
zayevka Institute of Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya
St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: V-5387-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9899-3420>, rimnauka@rambler.ru

Sergey P. Suldin, Head of Chair of Mechanical Engineering Technology of Ruzaevka Institute of
Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005,
Russia), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Researcher ID: V-5387-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8159-6322>, rimstanok@mail.ru

Tatiana B. Tyurbueva, Associate Professor of Chair of Information Technology and Computer Sys-
tems, Moscow State University of Technology "STANKIN" (1 Vadkovskiy Prospekt, Moscow 127994, Rus-
sia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: V-5050-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6693-5974>,
turbuev@mail.ru

Contribution of the authors:

S. Yu. Kalyakulin – development of an algorithm for the structure of technological processes based on
synthesis; V. V. Kuzmin – scientific management, research agenda setting; E. V. Mitin – literature analysis;
S. P. Suldin – process modeling development; T. B. Tyurbueva – writing the paper, building a binary rela-
tionship graph.

All authors have read and approved the final manuscript.

ОТЗЫВ ПУБЛИКАЦИИ
RETRACTION



Быстрая оценка энтропии длинных кодов с зависимыми разрядами на микроконтроллерах с малым потреблением и низкой разрядностью (обзор литературы по снижению размерности задачи)

А. И. Иванов^{1*}, А. Г. Банных²

¹АО «Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт» (г. Пенза, Россия)

²ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» (г. Пенза, Россия)

*bio.ivan.penza@mail.ru

Введение. Целью работы является снижение требований к разрядности и производительности процессоров доверенной вычислительной среды при оценке энтропии длинных кодов с зависимыми разрядами.

Материалы и методы. Используются процедуры тестирования, рекомендованные национальными стандартами России. Используется переход от анализа обычных длинных кодов к расстояниям Хэмминга между случайными кодами «Чужой» и кодом образа «Свой».

Результаты исследования. Показано, что переход к представлению данных нормальным законом распределения в пространстве расстояний Хэмминга делает связь между математическим ожиданием и энтропией практически линейной. Построены низкоразрядные таблицы, связывающие первые статистические моменты распределения расстояний Хэмминга с энтропией длинных кодов. При вычислениях показатель коррелированности разрядов исследуемых кодов может изменяться в широких пределах.

Обсуждение и заключение. Вычисление математического ожидания и стандартного отклонения легковывполнимы на малоразрядных микроконтроллерах с низким потреблением. Пользуясь синтезированными таблицами, от младших статистических моментов расстояний Хэмминга удастся легко переходить к энтропии длинных кодов. Задача вычисления энтропии многократно ускоряется в сравнении с процедурами Шеннона и становится реализуемой на дешевых малоразрядных процессорах.

Ключевые слова: микроконтроллеры с малым потреблением, тестирование нейронных сетей, энтропия длинных кодов, зависимые разряды, код

Для цитирования: Иванов, А. И. Быстрая оценка энтропии длинных кодов с зависимыми разрядами на микроконтроллерах с малым потреблением и низкой разрядностью (обзор литературы по снижению размерности задачи) / А. И. Иванов, А. Г. Банных. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202002.300-312 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 2. – С. 300–312.

Rapid Estimation of the Entropy of Long Codes with Dependent Bits on Low-Power, Low-Bit Microcontrollers (Review of Literature on Reducing the Dimension of a Problem)

A. I. Ivanov^{a*}, A. G. Bannykh^b

^a*Penza Research Electrotechnical Institute (Penza, Russia)*

^b*Penza State University (Penza, Russia)*

**bio.ivan.penza@mail.ru*

Introduction. The aim of the work is to reduce the requirements for bit depth and processor performance of a trusted computing environment when estimating the entropy of long codes with dependent bits.

Materials and Methods. Testing procedures recommended by the Russia national standards are used. The transition from the analysis of ordinary long codes to Hamming distances between random Alien codes and the Own image code is used.

Results. It is shown that the transition to the presentation of data by the normal distribution law in the space of Hamming distances makes the relationship between mathematical expectation and entropy almost linear. Low-bit tables are constructed that relate the first statistical moments of the distribution of Hamming distances to the entropy of long codes. In calculations, the correlation index of the digits of the studied codes can vary widely.

Discussion and Conclusion. The calculation of the mathematical expectation and standard deviation is easily feasible on low-discharge low-power microcontrollers. The use of the synthesized tables makes it possible to pass easily from the lower statistical moments of the Hamming distances to the entropy of long codes. The task of calculating entropy is accelerated many times in comparison with Shannon's procedures and becomes feasible on cheap low-bit processors.

Keywords: low-power microcontrollers, testing of neural networks, the entropy of long codes, dependent bits, code

For citation: Ivanov A.I., Bannykh A.G. Rapid Estimation of the Entropy of Long Codes with Dependent Bits on Low-Power, Low-Bit Microcontrollers (Review of Literature on Reducing the Dimension of a Problem). *Inzhenerernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(2):300-312. DOI <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.300-312>

Введение

Цифровая экономика должна базироваться на безопасных облачных сервисах обработки личных и корпоративных данных. Сегодня безопасность облачных сервисов строится на применении парольной аутентификации. К сожалению, человек не может запоминать длинные пароли из случайных символов для своей безопасной работы в интернет-облаках.

Для того чтобы избавить человека от необходимости запоминать длинный пароль доступа, в США, Канаде и странах Евросоюза пытаются применять так называемые «нечеткие

экстракторы» [1–3]. Из-за того, что «нечеткие экстракторы» используют классические коды обнаружения и исправления ошибок с 20-кратной избыточностью, пароли, сцепленные с биометрией, оказываются короткими. Так, код пароля для папиллярного рисунка отпечатка пальца составляет примерно 16 бит, или 2 случайных символа в 8-битной кодировке. Очевидно, что вычисление энтропии пароля из двух случайных символов легко выполняется по Шеннону.

В России эта проблема решается использованием больших искусственных нейронных сетей, которые заранее

обучаются преобразовывать биометрические данные человека в длинный код его пароля доступа. При этом обучение выполняется автоматически алгоритмом ГОСТа Р 52633.5-2011¹. За один бит кода пароля пользователя отвечает один нейрон нейросети, по этой причине нейросетевые преобразователи биометрии обычно строят под длину кода в 256 бит. Наиболее распространенные сегодня операционные системы Linux, Windows, Android воспринимают пароли длиной не больше 256 бит (32 случайных знака в 8-битной кодировке). Нейросетевые преобразователи биометрия-код выгодно строить под максимально возможную длину пароля доступа, характерную для той или иной операционной системы. По этой причине нейросетевую технологию защиты иногда называют «высоконадежной»². Хакер, ничего не знающий о биометрическом образе пользователя «Свой», вынужден перебирать все состояния очень длинного кода доступа [4].

Как правило, после получения длинного личного ключа пользователя или его длинного пароля доступа запускается некоторый криптографический протокол выполнения аутентификации. Криптографические протоколы принято считать надежными, если энтропия блока шифротекста длиной в 256 бит будет составлять ровно 256 бит. Если энтропия оказывается больше или меньше, то криптосхема защиты информации может оказаться дефектной. Эти соображения с некоторой натяжкой можно перенести на защиту криптографического ключа «нечеткими экстракторами» или размещением его данных в параметрах обученной нейронной сети. Знание энтропии состояний кода ключа оказывается эффективным контрольным параметром при

анализе уровня защиты от попыток его подбора.

В случае, если разрядность кода доступа мала, то расчет энтропии этих кодов можно выполнить по Шеннону. В частности, при кодах длиной 16 бит «нечеткого экстрактора» энтропию следует вычислять по следующей формуле [2; 3]:

$$H(x_1, x_2, \dots, x_{16}) = - \sum_{i=1}^{65536} p_i \cdot \log_2(p_i), \quad (1)$$

где p_i – вероятность появления одного из $2^{16} = 65\,536$ состояний кодов.

Для того чтобы оценить вероятность появления 2^{16} состояний кода, необходимо иметь базу из 2^{16+4} папиллярных рисунков отпечатков пальцев «Чужой». Собрать базу из почти миллиона рисунков отпечатков пальцев сложно, но технически возможно. По этой причине процедуры вычисления энтропии по Шеннону для «нечетких экстракторов» вполне применимы.

Положение коренным образом меняется, если мы переходим к кодам длиной в 256 бит:

$$H(x_1, x_2, \dots, x_{256}) = - \sum_{i=1}^{2^{256}} p_i \cdot \log_2(p_i). \quad (2)$$

Для прямых оценок очень малых вероятностей появления 2^{256} состояний кода потребуются использовать базу из 2^{256+4} биометрических образов «Чужой». Технически невозможно создать и использовать столь большую тестовую базу.

Обзор литературы

Для решения проблемы больших тестовых баз и сложных вычислений энтропии по Шеннону в России разра-

¹ ГОСТ Р 52633.5-2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа.

² ГОСТ Р 52633.3-2011. Защита информации. Техника защиты информации. Тестирование стойкости средств высоконадежной биометрической защиты к атакам подбора.

ботан стандарт ГОСТ Р 52633.5³. По рекомендациям этого стандарта требуется применение малых тестовых баз образов «Чужой» объемом от 21 до 64 примеров.

Применение стандарта дает экспоненциальное снижение объема тестовой выборки. Этот выигрыш обусловлен тем, что стандарт рекомендует переходить от анализа обычных кодов в пространство расстояний Хэмминга:

$$h = \sum_{i=1}^{256} \begin{bmatrix} "c_i" \\ \oplus \\ "x_i" \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $"c_i"$ – дискретное состояние i -го разряда кода «Свой»; $"x_i"$ – дискретное состояние i -го разряда случайного кода образа «Чужой»; \oplus – операция сложения по модулю 2. Если пространство обычных 256-битных кодов имеет огромное число состояний, то пространство расстояний Хэмминга будет иметь всего 257 состояний, наблюдается экспоненциальное снижение размерности задачи.

По малой выборке от 21 до 64 опытов можем вычислить математическое ожидание $E(h)$ и стандартное отклонение $\sigma(h)$. Знание о значениях этих двух статистических моментов позволяет оценить вероятность угадывания кода «Свой» P_2 . Оценка вероятности выполняется в рамках гипотезы нормальности:

$$P_2 \approx \frac{1}{\sigma(h)\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^1 \exp \left\{ \frac{-(E(h)-u)^2}{2(\sigma(h))^2} \right\} \cdot du. \quad (4)$$

В этом случае энтропия нейросетового преобразователя оценивается следующим образом:

$$H("x_1, x_2, ..., x_{256}") \approx -\log_2(P_2). \quad (5)$$

Применение тройки преобразований (3), (4), (5) позволяет уйти от экспоненциальной вычислительной сложности оценок энтропии длинных кодов по Шеннону⁴. Более того, эта совокупность вычислительных процедур обеспечивает линейную вычислительную сложность и снимает проблемы привлечения процессоров, поддерживающих 32- и 64-разрядные вычисления⁵ [5].

Кроме того, отпадает необходимость тратить значительные объемы памяти на хранение больших объемов тестовой базы образов «Чужой». Достаточно помнить порядка 30 тестовых образов «Чужой». Столь малое число образов «Чужой» может быть использовано как образы-родители. Их морфинг-скрещиванием могут быть получены сотни тысяч синтетических тестовых образов-потомков с помощью процедур, регламентируемых национальным стандартом ГОСТ Р 52633.2-2010⁶. В одном поколении морфинг-скрещиванием удастся увеличивать число естественных тестовых примеров «Чужой» примерно в 20 раз, соответственно, для получения больших тестовых баз приходится размножать данные в нескольких поколениях [6–9]. Процедуры размножения данных применимы и к примерам образа «Свой» в рамках бутстрап-идео-

³ ГОСТ Р 52633.5-2011. Защита информации...

⁴ Быстрые алгоритмы тестирования нейросетевых механизмов биометрико-криптографической защиты информации / А. Ю. Малыгин [и др.]. Пенза: Изд-во Пензенского государственного университета, 2006. 161 с. URL: <https://scholar.google.ru/citations?user=iEZ66cUAAAAJ&hl=ru> (дата обращения: 29.04.2020).

⁵ Нейросетевая защита персональных биометрических данных / под ред. Ю. К. Язова. М.: Радиотехника, 2012. 157 с. URL: <http://www.radiotec.ru/book/170> (дата обращения: 29.04.2020).

⁶ ГОСТ Р 52633.2-2010. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к формированию синтетических биометрических образов, предназначенных для тестирования средств высоконадежной биометрической аутентификации.

логии, заполнения пустых интервалов реальных гистограмм распределения⁷.

К сожалению, применение морфинг-размножения биометрических образов в нескольких поколениях приводит к их вырождению. В частности, возникают дефекты «кошмара Дженкина» [10–12] и дефекты вырождения корреляционных матриц⁸. Крайне важным является то, что, применяя специальное программное обеспечение, удастся практически полностью устранить дефекты размножения данных в первых нескольких поколениях⁹.

Материалы и методы

Еще одним направлением работ, связанных с упрощением вычислений, является симметризация корреляционных связей в длинном коде с зависимыми разрядами. Идея метода сводится к замене изначально асимметричной корреляционной матрицы на ее симметричный аналог:

$$\begin{bmatrix} 1 & r_1 & r_2 & \cdots & r_n \\ r_1 & 1 & r_{n+1} & \cdots & r_{2n-2} \\ r_2 & r_{n+1} & 1 & \cdots & r_{3n-3} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_n & r_{2n-2} & r_{3n-3} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 1 & \tilde{r} & \tilde{r} & \cdots & \tilde{r} \\ \tilde{r} & 1 & \tilde{r} & \cdots & \tilde{r} \\ \tilde{r} & \tilde{r} & 1 & \cdots & \tilde{r} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \tilde{r} & \tilde{r} & \tilde{r} & \cdots & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где параметр симметричной матрицы \tilde{r} вычисляется простым усреднением модулей всех коэффициентов корреляции исходной асимметричной матрицы:

$$\tilde{r} \approx E(|r_i|) \approx \frac{2}{n^2 - 2n} \cdot \sum_{i=1}^{0,5n^2-n} |r_i|. \quad (7)$$

При росте размерностей задачи (число нейронов в нейросети: 32, 64, 128, 256) ошибка приближения (7) быстро падает. По этой причине оценивать энтропию можно через вычисления показателя средней коррелированности (7) [13; 14]. Результаты в этом направлении исследований отражены в работах [15–18].

Очевидно, что при рассматриваемых классах преобразований крайне важным является то, насколько быстро сходятся вычислительные процессы и как быстро снижаются ошибки приближений. Эти вопросы рассматриваются в работах [19–22].

Первоначально задача вычисления энтропии длинных кодов с зависимыми разрядами рассматривалась как некоторая достаточно быстрая и эффективная процедура тестирования. Однако в 2009 г. с привлечением рассматриваемых в данной статье процедур была итерационно решена обратная задача нейросетевой биометрии. Через быстрое вычисление энтропии удалось извлечь знания из нейросети. Это послужило началом работ, улучшающих процедуры вычисления энтропии в контексте решения обратных задач нейросетевой биометрии [23–26].

⁷ Качалин С. В., Иванов А. И. Заполнение пробелов биометрических данных генетическим алгоритмом размножения реальных примеров образа «Свой» без использования «мутаций» // Компьютерные науки и информационные технологии: материалы Международной науч. конф. (30 июня–03 июля 2014 г.). Саратов: Изд-во «Наука», 2014. С. 154–157.

⁸ Туреев С. В., Малыгина Е. А., Солопов А. И. Методика формирования тестовых баз для проверки качества обучения нейросетевых преобразователей биометрия-код // Сборник научных статей по материалам I Всероссийской науч.-техн. конф. «Безопасность информационных технологий» (24 апреля 2019 г.). Пенза, 2019. С. 90–101.

⁹ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019662112 «Саморазвивающийся эмбрион-архив тестовой базы биометрических образов «чужой» / А. В. Безяев [и др.]. Дата государственной регистрации: 17.09.2019.

Результаты исследования

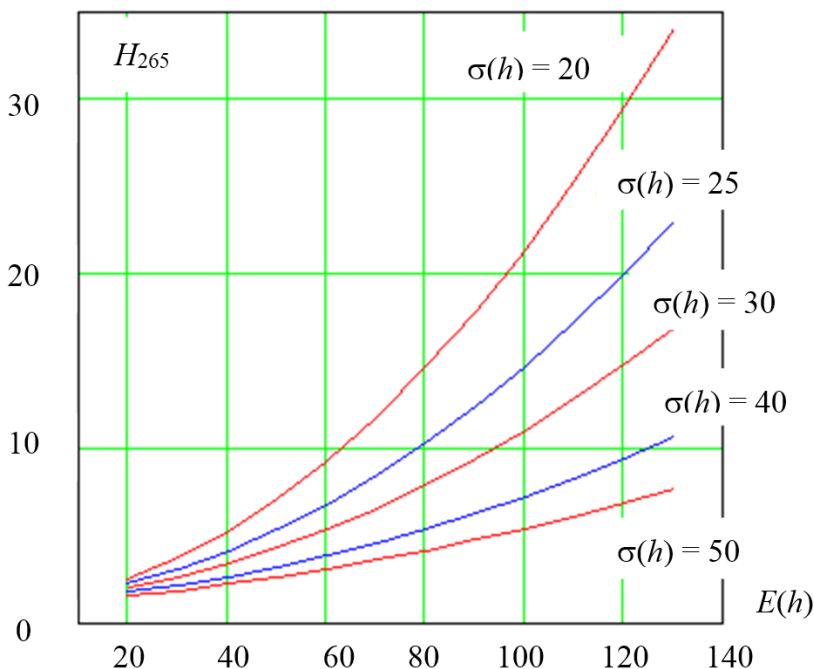
Одной из проблем нейросетевой биометрии является необходимость использования малогабаритной физической и криптографически защищенной доверенной вычислительной среды [27]. Как правило, доверенную вычислительную среду приходится создавать с использованием малопотребляющих, низкоразрядных микроконтроллеров при ограниченном объеме памяти. Система биометрико-криптографической защиты оказывается надежной, только если все криптографические операции над данными и нейросетевые операции будут выполняться внутри доверенной малогабаритной вычислительной среды.

Последнее означает, что на малопотребляющих, низкоразрядных процессорах нужно уметь точно вычислять интегралы вероятности (4). Вычислить подобный интеграл на компьютерах

с 32- или 64-разрядной арифметикой несложно. При вычислении интеграла (4) на 4-, 8-разрядном микроконтроллере без привлечения специализированных программ (MathCAD, MatLAB, Maple и т. д.) возникают проблемы из-за низкой разрядности двоичных чисел и отсутствия поддержки повышения точности (разрядности) вычислений, обычно применяемой в типовом программном обеспечении математических пакетов.

Проведенные исследования показали, что если при 32-разрядных вычислениях зафиксировать стандартное отклонение расстояний Хэмминга $\sigma(h)$ и изменять только математическое ожидание расстояний Хэмминга $E(h)$, то мы получим почти линейную связь с оцениваемой энтропией (рис. 1).

При использовании малоразрядных процессоров экономически выгодно применять таблицы преобразований



Р и с. 1. Почти линейная связь энтропии с математическим ожиданием расстояний Хэмминга при фиксированном стандартном отклонении

F i g. 1. Almost linear relationship between entropy and mathematical expectation of Humming distances at fixed standard deviation

с шагом записи данных $20 + 10 \cdot i$, где строчный индекс i меняется от 0 до 13 для математического ожидания расстояний Хэмминга $E(h)$. Таблицы должны быть двухмерными, например, иметь 30 столбцов для значений стандартного отклонения $\sigma(h)$, изменяющегося на единицу. В ячейках двухмерной таблицы должны лежать значения энтропии номограммы, отображенной на рисунке 1.

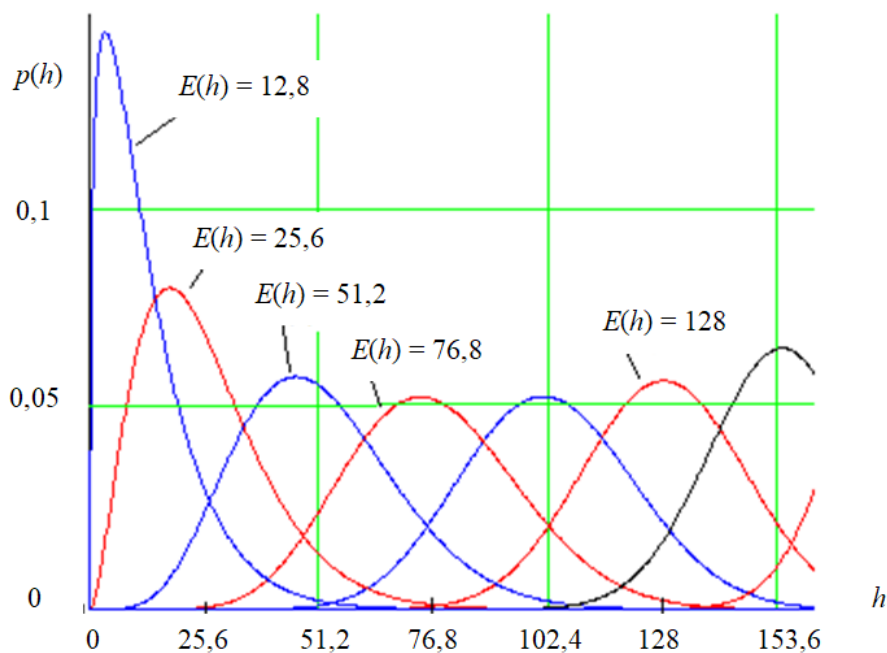
Еще одним важным моментом является использование таблиц поправок значений энтропии DH_{256} , которые компенсируют ошибку от проявления асимметрии закона распределения расстояний Хэмминга $p(h)$.

Из рисунка 2 видно, что при значениях математического ожидания $E(h)=12,8, E(h)=25,6$ распределение расстояний Хэмминга становится существенно асимметричным [28; 29]. Это означает, что номограмма данных рисунка 1

при малых значениях математических ожиданий нуждается в значительных поправках DH_{256} . Вычисление поправок выполняется путем нормирования расстояний Хэмминга, приводящего все возможные состояния к интервалу от 0 до 1. В итоге получается 8-разрядная двоичная таблица преобразований. Далее под заданное значение асимметрии подбираются два параметра бета-распределения. Уже в пространстве бета-распределений по формуле, аналогичной формуле (4), находится вероятность ошибок второго рода на 32-разрядной вычислительной машине:

$$P_2 = \int_0^{\frac{1}{256}} \frac{1}{B(\beta_1, \beta_2)} \cdot \tilde{h}^{\beta_1-1} \cdot (1 - \tilde{h})^{\beta_2-1} \cdot d\tilde{h}, \quad (8)$$

где β_1, β_2 – параметры бета-распределения, обеспечивающие нуж-



Р и с. 2. Распределение расстояний Хэмминга для одинаково коррелированных данных $\tilde{r} = 0,33$ и монотонно изменяющихся значений математического ожидания

F i g. 2. Distribution of Humming distances for equally correlated data $\tilde{r} = 0.33$ and monotonically changing values of mathematical expectation



ный показатель асимметрии полученного распределения Хэмминга;

$$B(\beta_1, \beta_2) = \int_0^1 x^{\beta_1-1} \cdot (1-x)^{\beta_2-1} \cdot dx - \text{бета}$$

функция; $\tilde{h} = h/256$ – нормированное расстояние Хэмминга.

Это и позволяет в конечном итоге синтезировать вторую таблицу поправок DH_{256} для малых значений математического ожидания для $E(h) < 70$ бит.

Обсуждение и заключение

Таким образом, использование стандартизованных в России нейросетевых преобразователей биометрии в длинный код позволяет снизить вычислительную сложность оценки энтропии с экспоненциальной вычислительной сложности до линейной и одновременно экспоненциально снизить объем памяти, необходимой для хранения тестовых образов «Чужой». Кроме того, в новых условиях перехода в пространство расстояний Хэмминга удастся сделать вычисление интегралов вероятности табличным (4), (8) (используются две таблицы размерами 12×30 и 7×30 , которые хранят 8-битные значения энтропии и ее поправок).

Следует отметить, что биометрические приложения являются одними из самых глубокопроработанных и стандартизованных приложений искусственного интеллекта. Формально это обусловлено тем, что международный

технический комитет по стандартизации ISO/IEC JTC 1/SC 37 (Биометрия) создан в 2002 г., а технический комитет ISO/IEC JTC 1/SC 42 (Искусственный интеллект) создан только в 2017 г. По этой причине международных стандартов по биометрии на текущий момент разработано и находится в разработке 160, тогда как стандартов по искусственному интеллекту разработано и находится в разработке только 11.

Все, что изложено в данной статье, проверено только на биометрических данных, однако авторы уверены в том, что нейросетевое распознавание биометрических образов является частным случаем распознавания образов произвольной природы нейросетевым искусственным интеллектом. При этом перенос достигнутого уровня тестирований и доверия биометрических приложений корректен только в том случае, когда применяются «широкие» нейронные сети, стандартизованные пакетом отечественных стандартов с номерами ГОСТов Р 52633.хх-20хх. Нейронные сети других классов, в том числе сверточные нейронные сети «глубокого» обучения, тестировать с применением быстрых алгоритмов вычисления энтропии нельзя¹⁰. Как следствие, доверие к ним должно быть значительно ниже, чем доверие к отечественным стандартизованным нейросетевым конструкциям.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Juels, A. A Fuzzy Commitment Scheme / A. Juels, M. Wattenberg. – DOI 10.1145/319709.319714 // CCS'99: Proceedings of the 6th ACM Conference on Computer and Communications Security. – 1999. – Pp. 28–36. – URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/319709.319714> (дата обращения: 29.04.2020).
2. Ramírez-Ruiz, J. A. Cryptographic Keys Generation Using Finger Codes / J. A. Ramírez-Ruiz, C. F. Pfeiffer, J. Nolasco-Flores. – DOI 10.1007/11874850_22 // Advances in Artificial Intelligence – IB-ERAMIA-SBIA. – 2006. – Pp. 178–187. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/11874850_22 (дата обращения: 29.04.2020).

¹⁰ Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвиль А. Глубокое обучение. М.: ДМК Пресс, 2017. 652 с.

3. Ушмаев, О. В. Алгоритмы защищенной верификации на основе бинарного представления топологии отпечатка пальцев / О. В. Ушмаев, В. В. Кузнецов // Информатика и ее применения. – 2012. – Т. 6, № 1. – С. 132–140. – URL: http://www.ipiran.ru/journal/issues/2012_01_eng/ (дата обращения: 29.04.2020). – Рез. англ.
4. Иванов, А. И. Протоколы биометрико-криптографического рукопожатия: защита распределенного искусственного интеллекта интернет-вещей нейросетевыми методами / А. И. Иванов, П. А. Чернов / Системы безопасности. – 2018. – № 6. – С. 50–59. – URL: http://cs.groteck.ru/SS_6_2018/index.html?pn=&pageNumber= (дата обращения: 29.04.2020).
5. Ivanov, A. Statistical Description of Output States of the Neural Network “Biometrics-code” Transformers / A. Ivanov, B. Akhmetov, V. Funtikov [et al.] // Progress in Electromagnetics Research Symposium : PIERS Proceedings. – Moscow, 2012. – Pp. 62–65. – URL: <https://piers.org/pierspublications/PIERS2012MoscowFinalProgram.pdf> (дата обращения: 29.04.2020).
6. Ахметов, Б. С. Дополнение нечетких биометрических данных морфинг-размножением примеров родителей в нескольких поколениях примеров потомков / Б. С. Ахметов, С. В. Качалин, А. И. Иванов // Вестник КазНТУ. – 2014. – № 4 (104). – С. 194–199. – URL: https://official.satbayev.university/download/document/7138/ВЕСТНИК-2014_№4.pdf (дата обращения: 29.04.2020). – Рез. англ.
7. Малыгин, А. Ю. Требования к синтетическим базам биометрических образов и генераторам для их формирования / А. Ю. Малыгин, В. В. Федулаев, Д. Н. Надеев [и др.] // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2007. – № 12. – С. 60–64. – URL: <http://www.radiotec.ru/article/3747> (дата обращения: 29.04.2020). – Рез. англ.
8. Akhmetov, B. Morph-Reproduction Examples of Parents in Several Generations of Examples Descen / B. Akhmetov, A. Ivanov, A. Malyghin [et al.] // International Conference on Global Trends in Academic Research. – Lumpur, 2014. – Pp. 188–190. – URL: <https://globalilluminators.org/conferences/icmrp-2014-kuala-lumpur-malaysia/icmrp-full-paper-proceeding-2014/> (дата обращения: 29.04.2020).
9. Волчихин, В. И. Регуляризация вычисления энтропии выходных состояний нейросетевого преобразователя биометрия-код, построенная на размножении малой выборки исходных данных / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, А. Г. Банных. – DOI 10.21685/2072-3059-2017-4-2 // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 4. – С. 14–23. – URL: https://izvuz_tn.pnzgu.ru/tu2417 (дата обращения: 29.04.2020).
10. Akhmetov, B. Solving the Inverse Task of Neural Network Biometrics without Mutations and Jenkins “Nightmare” in the Implementation of Genetic Algorithms / B. Akhmetov, S. Kachalin, A. Ivanov [et al.] // International Conference “Computational and Informational Technologies in Science, Engineering and Education”. – 2015. – URL: <http://conf.ict.nsc.ru/citech-2015/en/reportview/261166> (дата обращения: 29.04.2020).
11. Качалин, С. В. Алгоритм генетического обращения матриц нейросетевых функционалов без дефектов «кошмара» Дженкина / С. В. Качалин // Евразийский Союз Ученых. – 2015. – № 4 (13). – С. 59–62. – URL: <https://euroasia-science.ru/tehnicheskije-nauki/алгоритм-генетического-обращения-ма/> (дата обращения: 29.04.2020).
12. Качалин, С. В. Направленное морфинг-размножение биометрических образов, исключаящее эффект вырождения их популяции / С. В. Качалин, А. И. Иванов // Вопросы радиоэлектроники. – 2015. – № 1. – С. 76–85.
13. Надеев, Д. Н. Связь энтропии выходных состояний нейросетевых преобразователей биометрия-код с коэффициентами парной корреляции / Д. Н. Надеев, В. А. Фунтиков, А. И. Иванов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2012. – № 3. – С. 74–77. – URL: <http://www.radiotec.ru/article/10426> (дата обращения: 29.04.2020). – Рез. англ.
14. Ахметов, Б. С. Моделирование длинных биометрических кодов, воспроизводящих корреляционные связи выходных данных нейросетевого преобразователя / Б. С. Ахметов, В. И. Волчихин, С. В. Куликов [и др.] // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2012. – № 3. – С. 40–43. – URL: <http://www.radiotec.ru/article/10418> (дата обращения: 29.04.2020). – Рез. англ.
15. Bezyaev, V. On the Issue of Modeling Long Biometric Codes with Dependent Bit States / V. Bezyaev, I. Serikov, A. Kruchinin [et al.] // Progress in Electromagnetics Research Symposium : PIERS Proceedings. – Moscow, 2012. – Pp. 62–65. – URL: <https://piers.org/pierspublications/PIERS2012MoscowAbstracts.pdf> (дата обращения: 29.04.2020).



16. **Ivanov, A. I.** Reducing the Size of a Sample Sufficient for Learning Due to the Symmetrization of Correlation Relationships Between Biometric Data / A. I. Ivanov, P. S. Lozhnikov, Yu. I. Serikova. – DOI 10.1007/s10559-016-9838-x // *Cybernetics and Systems Analysis*. – 2016. – Issue 52. – Pp. 379–385. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10559-016-9838-x> (дата обращения: 29.04.2020).
17. **Волчихин, В. И.** Быстрый алгоритм симметризации корреляционных связей биометрических данных высокой размерности / В. И. Волчихин, Б. Б. Ахметов, А. И. Иванов // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2016. – № 1. – С. 3–7. – URL: https://izvuz_tn.pnzgu.ru/tn1116 (дата обращения: 29.04.2020).
18. **Ivanov, A. I.** Simplification of Statistical Description of Quantum Entanglement of Multidimensional Biometric Data Using Symmetrization of Paired Correlation Matrices / A. I. Ivanov, A. V. Bezuyaev, A. I. Gazin // *Journal of Computational and Engineering Mathematics*. – 2017. – Vol. 4, Issue 2. – Pp. 3–13. – URL: <https://jcem.susu.ru/jcem/article/view/110> (дата обращения: 29.04.2020).
19. **Качалин, С. В.** Оценка устойчивости алгоритмов обучения больших искусственных нейронных сетей биометрических приложений / С. В. Качалин // *Вестник СибГАУ*. – 2014. – № 3 (55). – С. 68–72. – URL: <https://vestnik.sibsau.ru/vestnik/897/> (дата обращения: 29.04.2020). – Рез. англ.
20. **Иванов, А. И.** Номограммы оценки погрешности, коэффициентов корреляции, вычисленных на малых выборках биометрических данных / А. И. Иванов, Ю. И. Серикова // *Вопросы радиоэлектроники*. – 2015. – № 12. – С. 123–130.
21. **Волчихин, В. И.** Компенсация методических погрешностей вычисления стандартных отклонений и коэффициентов корреляции, возникающих из-за малого объема выборок / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, Ю. И. Серикова // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2016. – № 1. – С. 45–49. – URL: https://izvuz_tn.pnzgu.ru/tn9116 (дата обращения: 29.04.2020).
22. **Иванов, А. И.** Корректировка методической погрешности вычисления статистических моментов четвертого порядка для малых выборок биометрических данных / А. И. Иванов, Ю. И. Серикова, А. Г. Банных // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. – 2016. – № 4 (20). – С. 108–114. – URL: <https://mss.pnzgu.ru/mss416> (дата обращения: 29.04.2020).
23. **Akhmetov, B.** Evaluation of Multidimensional Entropy on Short Strings of Biometric Codes with Dependent Bits / B. Akhmetov, A. Ivanov, V. Funtikov // *Progress in Electromagnetics Research Symposium : PIERS Proceedings*. – Moscow, 2012. – Pp. 66–69. – URL: <https://piers.org/pierspublications/PIERS2012MoscowFinalProgram.pdf> (дата обращения: 29.04.2020).
24. **Иванов, А. И.** Биометрическая аутентификация личности: обращение матриц нейросетевых функционалов в пространстве метрики Хемминга / А. И. Иванов, Е. А. Малыгина // *Вопросы защиты информации*. – 2015. – № 1. – С. 23–29. – URL: http://izdat.ntckompas.ru/editions/magazine_news/detail.php?ELEMENT_ID=20164&SECTION_ID=155&ID=184 (дата обращения: 29.04.2020).
25. **Волчихин, В. И.** Оценка эффекта ускорения вычислений, обусловленного поддержкой квантовой суперпозиции при корректировке выходных состояний нейросетевого преобразователя биометрии в код / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, А. В. Безяев [и др.]. – DOI 10.21685/2072-3059-2017-1-4 // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2017. – № 1. – С. 43–55. – URL: https://izvuz_tn.pnzgu.ru/tn4117 (дата обращения: 29.04.2020).
26. **Волчихин, В. И.** Нейросетевая молекула: решение обратной задачи биометрии через программную поддержку квантовой суперпозиции на выходах сети искусственных нейронов / В. И. Волчихин, А. И. Иванов. – DOI 10.15507/0236-2910.027.201704.518-529 // *Вестник Мордовского университета*. – 2017. – Т. 27, № 4. – С. 518–529. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/56-17-4/358-10-15507-0236-2910-027-201704-04> (дата обращения: 29.04.2020). – Рез. англ.
27. **Гулов, В. П.** Перспектива нейросетевой защиты облачных сервисов через биометрическое обезличивание персональной информации на примере медицинских электронных историй болезни (краткий обзор литературы) / В. П. Гулов, А. И. Иванов, Ю. К. Язов [и др.]. – DOI 10.12737/article_5947d5509f0411.58967456 // *Вестник новых медицинских технологий*. – 2017. – Т. 24, № 2. – С. 220–225. – URL: <https://naukaru.ru/en/nauka/article/17188/view> (дата обращения: 29.04.2020). – Рез. англ.
28. **Иванов, А. И.** Оценка вероятности ошибок биометрической аутентификации на малых выборках, использующая гипотезу бета-распределения расстояний Хемминга / А. И. Иванов, А. В. Безяев, А. В. Елфимов [и др.] // *Специальная техника*. – 2017. – № 1. – С. 48–51.

29. **Ivanov, A. I.** A Simple Nomogram for Fast Computing the Code Entropy for 256-Bit Codes That Artificial Neural Networks Output / A. I. Ivanov, P. S. Lozhnikov, A. G. Bannykh // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1260, Issue 2. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1260/2/022003/meta> (дата обращения: 29.04.2020).

Поступила 15.01.2020; принята к публикации 20.02.2020; опубликована онлайн 30.06.2020

Об авторах:

Иванов Александр Иванович, начальник лаборатории биометрических и нейросетевых технологий АО «Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт» (440000, Россия, г. Пенза, ул. Советская, д. 9), доктор технических наук, доцент, Researcher ID: R-4514-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3475-2182>, bio.ivan.penza@mail.ru

Банных Андрей Григорьевич, аспирант кафедры информационной безопасности систем и технологий ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» (440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4776-5273>, ibst@pnzgu.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. И. Иванов – формулирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов; А. Г. Банных – проведение численного эксперимента, синтез таблиц для быстрого вычисления энтропии длинных кодов на малоразрядных процессорах.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Juels A., Wattenberg M. A Fuzzy Commitment Scheme. In: CCS'99: Proceedings of the 6th ACM Conference on Computer and Communications Security; 1999. Pp 28-36. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1145/319709.319714>
2. Ramírez-Ruiz J.A., Pfeiffer C.F., Nolasco-Flores J. Cryptographic Keys Generation Using Fingerprint Codes. *Advances in Artificial Intelligence – IBERAMIA-SBIA*. 2006; Pp. 178–187. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/11874850_22
3. Ushmaev O.S., Kuznetsov V.V. Secured Biometric Verification Based on Fingerprint Topology Binary Representation. *Informatika i eyo primeneniya* = Informatics and Applications. 2012; 6(1):132-140. Available at: http://www.ipiran.ru/journal/issues/2012_01_eng/ (accessed 29.04.2020). (In Russ.)
4. Ivanov A.I., Chernov P.A. Protocols of Biometric Cryptological Handshaking: Protecting Artificial Intelligence of the Internet of Things by Neural Network Methods. *Sistemy bezopasnosti* = Safety Systems. 2018; (6):50-59. Available at: http://cs.groteck.ru/SS_6_2018/index.html?pn=&pageNumber= (accessed 29.04.2020). (In Russ.)
5. Ivanov A., Akhmetov B., Funtikov V., et al. Statistical Description of Output States of the Neural Network “Biometrics-code” Transformers. In: Progress in Electromagnetics Research Symposium: PIERS Proceedings. Moscow; 2012. Pp. 62-65. Available at: <https://piers.org/pierspublications/PIERS2012MoscowFinalProgram.pdf> (accessed 29.04.2020). (In Eng.)
6. Akhmetov B.S., Kachalin S.V., Ivanov A.I. Supplement Fuzzy Biometric Morphing Reproduction Examples of Parents in Several Generations of Descendants Examples. *Vestnik KazNTU* = Vestnik KazNTU. 2014; (4):194-199. Available at: https://official.satbayev.university/download/document/7138/ВЕСТНИК-2014_№4.pdf (accessed 29.04.2020). (In Russ.)
7. Malygin A.Yu., Fedulaev V.V., Nadeev D.N., et al. Requirements for Synthetic Bases of Biometric Images and Generators for Their Formation. *Neyrokompyutery: razrabotka, primeneniye* = Neurocomputers. 2007; (12):60-64. Available at: <http://www.radiotec.ru/article/3747> (accessed 29.04.2020). (In Russ.)



8. Akhmetov B., Ivanov A., Malyghin A., et al. Morph-Reproduction Examples of Parents in Several Generations of Examples Descen. In: International Conference on Global Trends in Academic Research. Lumpur; 2014. Pp. 188-190. Available at: <https://globalilluminators.org/conferences/icmrp-2014-kualalumpur-malaysia/icmrp-full-paper-proceeding-2014/> (accessed 29.04.2020). (In Eng.)
9. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Bannykh A.G. Regularizing Calculations of the Output Entropy of a Neural Network "Biometrics-Code" Converter though Multiplication of a Small Sample of Original Data. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = University Proceedings. Volga Region. Engineering Sciences. 2017; (4):14-23. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2017-4-2>
10. Akhmetov B., Kachalin S., Ivanov A., et al. Solving the Inverse Task of Neural Network Biometrics without Mutations and Jenkins "Nightmare" in the Implementation of Genetic Algorithms. In: International Conference "Computational and Informational Technologies in Science, Engineering and Education". 2015. Available at: <http://conf.ict.nsc.ru/citech-2015/en/reportview/261166> (accessed 29.04.2020). (In Eng.)
11. Kachalin S.V. Algorithm of Genetic Circulation of Neural Network Functional Matrices without Jenkins' Nightmare Defects. *Yevraziyskiy Soyuz Uchenykh* = Eurasian Union of Scientists. 2015; (4):59-62. Available at: <https://euroasia-science.ru/tehnicheskie-nauki/algoritm-geneticheskogo-obrasheniya-ma/> (accessed 29.04.2020). (In Russ.)
12. Kachalin S.V., Ivanov A.I. Direction of the Morph-Reproduction Biometric Images, the Exclusive Degeneracy Effects of Their Populations. *Voprosy radioelektroniki* = Questions of Radio Electronics. 2015; (1):76-85. (In Russ.)
13. Nadeev D.N., Funtikov V.A., Ivanov A.I. Connection Between the Entropy of Neural Network Converters "Biometrics-Code" Output States and the Pair Correlation Coefficients. *Neyrokompyutery: razrabotka, primeneniye* = Neurocomputers. 2012; (3):74-77. Available at: <http://www.radiotec.ru/article/10426> (accessed 29.04.2020). (In Russ.)
14. Akhmetov B.S., Volchikhin V.I., Kulikov S.V., et al. Modeling of Long Biometric Codes, Reproducing Correlation of Neural Network Converter Output Data. *Neyrokompyutery: razrabotka, primeneniye* = Neurocomputers. 2012; (3):40-43. Available at: <http://www.radiotec.ru/article/10418> (accessed 29.04.2020). (In Russ.)
15. Bezyaev V., Serikov I., Kruchinin A., et al. On the Issue of Modeling Long Biometric Codes with Dependent Bit States. In: Progress in Electromagnetics Research Symposium: PIERS Proceedings. Moscow; 2012. Pp. 62-65. Available at: <https://piers.org/pierspublications/PIERS2012MoscowAbstracts.pdf> (accessed 29.04.2020). (In Eng.)
16. Ivanov A.I., Lozhnikov P.S., Serikova Yu.I. Reducing the Size of a Sample Sufficient for Learning Due to the Symmetrization of Correlation Relationships Between Biometric Data. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2016; (52):379-385. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-016-9838-x>
17. Volchikhin V.I., Akhmetov B.B., Ivanov A.I. A Fast Symmetrization Algorithm for Correlations of Biometric Data of High Dimension. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = University Proceedings. Volga Region. Engineering Sciences. 2016; (1):3-7. Available at: https://izvuz_tn.pnzgu.ru/tn1116 (accessed 29.04.2020). (In Russ.)
18. Ivanov A.I., Bezyaev A.V., Gazin A.I. Simplification of Statistical Description of Quantum Entanglement of Multidimensional Biometric Data Using Simmetrization of Paired Correlation Matrices. *Journal of Computational and Engineering Mathematics*. 2017; 4(2):3-13. Available at: <https://jcem.susu.ru/jcem/article/view/110> (accessed 29.04.2020). (In Eng.)
19. Kachalin S.V. Assessment of Stability Learning Algorithms Large Artificial Neural Networks of Biometric Application. *Vestnik SibGAU* = Vestnik SibGAU. 2014; (3):68-72. Available at: <https://vestnik.sibsau.ru/vestnik/897/> (accessed 29.04.2020). (In Russ.)
20. Ivanov A.I., Serikova Yu.I. Nomograms Error Estimates of Correlation Rates, Calculated for Small Samples of Biometric Data. *Voprosy radioelektroniki* = Questions of Radio Electronics. 2015; (12):123-130. (In Russ.)
21. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Serikova Yu.I. Compensation of Methodological Errors in Calculations of Standard Deviations and Correlation Coefficients Caused by Small Sample Sizes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = University Proceedings. Volga Region. Engineering Sciences. 2016; (1):45-49. Available at: https://izvuz_tn.pnzgu.ru/tn9116 (accessed 29.04.2020). (In Russ.)

22. Ivanov A.I., Serikova Yu.I., Bannykh A.G. Adjustment of Methodological Error Calculating the Statistical Moments of the Fourth Order for Small Samples of Biometric Data. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = Models, Systems, Networks in Economics, Engineering, Nature and Society. 2016; (4):108-114. Available at: <https://mss.pnzgu.ru/mss416> (accessed 29.04.2020). (In Russ.)
23. Akhmetov B., Ivanov A., Funtikov V. Evaluation of Multidimensional Entropy on Short Strings of Biometric Codes with Dependent Bits. In: Progress in Electromagnetics Research Symposium: PIERS Proceedings. Moscow; 2012. Pp. 66-69. Available at: <https://piers.org/pierspublications/PIERS2012MoscowFinalProgram.pdf> (accessed 29.04.2020). (In Eng.)
24. Ivanov A.I., Malygina Ye.A. Biometric Identity Verification: Inversion of Matrices of Neural Network Functionals in the Hamming Space. *Voprosy zashchity informatsii* = Information Security Questions. 2015; (1):23-29. Available at: http://izdat.ntckompas.ru/editions/magazine_news/detail.php?ELEMENT_ID=20164&SECTION_ID=155&ID=184 (accessed 29.04.2020). (In Russ.)
25. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Bezyaev A.V., et al. Evaluation of the Calculation Acceleration Effect, Caused by the Support of Quantum Superposition States during Adjustment of Output Conditions of a "Biometrics-Code" Neural Network Converter. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = University Proceedings. Volga Region. Engineering Sciences. 2017; (1):43-55. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2017-1-4>
26. Volchikhin V.I., Ivanov A.I. Neural Network Molecule: a Solution of the Inverse Biometry Problem through Software Support of Quantum Superposition on Outputs of the Network of Artificial Neurons. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2017; 27(4):518-529. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.027.201704.518-529>
27. Gulov V.P., Ivanov A.I., Yazov Yu.K., et al. Perspective of Neuro Network Protection of Cloud Services through Biometric Deployment of Personal Information on the Example of Medical Electronic History of Disease (Brief Review of the Literature). *Vestnik novykh meditsinskih tekhnologiy* = Journal of New Medical Technologies. 2017; 24(2):220-225 (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.12737/article_5947d5509f0411.58967456
28. Ivanov A.I., Bezyaev A.V., Yelfimov A.V., et al. Estimating the Probability of Biometric Authentication Errors on Small Samples using the Hypothesis of Beta Distribution Hamming Distances. *Spetsial'naya tekhnika* = Special equipment. 2017; (1):48-51. (In Russ.)
29. Ivanov A.I., Lozhnikov P.S., Bannykh A.G. A Simple Nomogram for Fast Computing the Code Entropy for 256-Bit Codes That Artificial Neural Networks Output. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1260(2). Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1260/2/022003/meta> (accessed 29.04.2020). (In Eng.)

Received 15.01.2020; revised 20.02.2020; published online 30.06.2020

About the authors:

Aleksandr I. Ivanov, Head of Laboratory of Biometric and Neural Network Technologies, Penza Research Electrotechnical Institute (9 Sovetskaya St., Penza 440000, Russia), D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Researcher ID: R-4514-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3475-2182>, bio.ivan.penza@mail.ru

Andrey G. Bannykh, Postgraduate Student of Chair of Information Security of Systems and Technologies, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4776-5273>, ibst@pnzgu.ru

Contribution of the authors:

A. I. Ivanov – articulating the basic concept, goals and objectives of the study, performing the calculations, preparing the text, drawing the conclusions; A. G. Bannykh – conducting a numerical experiment, synthesis of the tables for rapid calculation of the entropy of long codes on low-bit processors.

All authors have read and approved the final manuscript.



Development of the Functional and Management Structure for the Computerized Management System under the Influence of Direct Environment Factors

K. Al Besoul^a, S. Al Salaimh^{b*}, A. Al Halaybeh^a, N. Hajiye^c

^aKing Khalid University (Abha, Kingdom of Saudi Arabia)

^bAqaba University of Technology (Aqaba, Jordan)

^cDavis Center for Russian and Eurasian Studies, Harvard University (Boston, USA)

*safwan670@yahoo.com

Introduction. The task of building a management system is to help the manager in the process of making decisions. This provides for the establishment of goals and focuses on the construction of an integrated system unlike the construction of separated subsystems. The system requirements are determined by the reduction of data and knowledge on the phenomena and process, occurring during the operation of the facility management object. **Materials and Methods.** The approach, used in this paper, is determined by the structure of the management systems, what is necessary to identify the main activities of the control object. The complex of functions is implemented and followed by determination of functional subsystems, which are necessary for the computerization of the control object. It should be noted that the proposed approach is a model and is suitable for developing the functional structure of only complexity.

Results. As a result, a unified service system of the enterprise appears. This system includes structural units responsible for the procurement and delivery of material resources, storage and movement of material flow as a part of the technological process, and the sale of finished products. These measures together can increase the efficiency of the enterprise and give its development dynamism in a difficult situation of market competition.

Discussion and Conclusion. The task of building a management system is to help the manager in the process of making decisions. This provides for the establishment of goals and focus on the construction of an integrated system unlike the construction of separated subsystems. The system requirements are determined by the reduction of data and knowledge on the phenomena and process, occurring during the operation of the facility management object.

Keywords: goals, object, system, criteria, relationships, process, management system

For citation: Al Besoul K., Al Salaimh S., Al Halaybeh A., et al. Development of the Functional and Management Structure for the Computerized Management System under the Influence of Direct Environment Factors. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(2):313-325. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.313-325>



Разработка функциональной структуры и структуры управления для компьютеризированной системы управления под влиянием факторов непосредственного окружения

Х. Аль-Бесул¹, С. Аль-Салаймех^{2*}, А. Аль-Халайбех¹,
Н. Хаджиев³

¹Университет Короля Халеда (г. Абха, Королевство Саудовская Аравия)

²Акабский технологический университет (г. Акаба, Иордания)

³Центр российских и евразийских исследований Дэвиса Гарвардского университета (г. Бостон, США)

*safwan670@yahoo.com

Введение. Цель создания системы управления заключается в том, чтобы помочь менеджеру в процессе принятия решений. Это обеспечивает постановку задач и концентрацию на создании интегрированной системы в отличие от создания отдельных подсистем. Системные требования определяются сокращением объема данных и знаний о явлениях и процессах, которые используются во время работы объекта управления – предприятия.

Материалы и методы. В настоящей статье используется подход к определенной структуре систем управления, что необходимо для идентификации главных видов деятельности объекта управления. Реализован комплекс функций, после чего определены функциональные подсистемы, необходимые для компьютеризации объекта управления. Следует заметить, что предложенный подход представляет собой модель и пригоден для разработки функциональной структуры единичной сложности.

Результаты исследования. В результате образуется единая сервисная система предприятия, включающая структурные подразделения, которые отвечают за снабжение и поставки материальных ресурсов, хранение и движение потока материалов как части технологического процесса и продажу готовой продукции. В совокупности эти меры могут повысить эффективность работы предприятия и ставят динамику его развития в трудную ситуацию рыночной конкуренции.

Обсуждение и заключение. Цель создания системы управления заключается в том, чтобы помочь менеджеру в процессе принятия решений. Это обеспечивает постановку задач и концентрацию на создании интегрированной системы в отличие от создания отдельных подсистем. Системные требования определяются сокращением объема данных и знаний о явлениях и процессах, которые используются во время работы объекта управления – предприятия.

Ключевые слова: цели, объект, система, критерии, отношения, процесс, система управления

Для цитирования: Аль-Бесул, Х. Разработка функциональной структуры и структуры управления для компьютеризированной системы управления под влиянием факторов непосредственного окружения / Х. Аль-Бесул, С. Аль-Салаймех, А. Аль-Халайбех [и др.]. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202002.313-325 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 2. – С. 313–325.

Introduction

The functioning of modern organizations is faced with many problems, some of which are typical and can be relatively easily solved by specialists using conventional technologies for the development

and implementation of solutions. To solve atypical problems, special technology-development of solutions is required, and, finally, the solution to some of the problems can be beyond the power of both managers and specialists. A set of such problems

characterizes the organization as one of the most complex objects for study and cognition. Of particular interest is the organizational management system. Its study and improvement is a constant task of the head.

Management structure – a set of stable relationships of objects and subjects of the organization's management, implemented in specific organizational forms. The management structure includes functional structures, organizational relations schemes, organizational structures and a system for training or advanced training of personnel [1; 2].

Technique and control technology include computer and organizational equipment, office furniture, communication networks, document management system.

The methodology and management process characterize management activity as a process and the structure and management technique as a phenomenon. All elements included in the management system should also be professionally organized for the effective work of the company as a whole.

The main elements that make up the company's management system are the goal, management process, method, communication, task, law, principle, organizational relations, function, technology, decision, characteristics of information support, document management system, organizational structure [2].

Management system concept

The management system is a combination of interconnected and interdependent elements that form ordered integrity, unity. The basis for streamlining the management system is, as a rule, the purpose of its functioning.

The management system contains:

1) governing bodies (positions and units), the totality of which can be described as a subject of management (people working in them are subjects of managerial activity);

2) communication channels through which interaction is carried out in the control system;

3) a set of goals, strategies, methods, technologies, procedures, regulations governing the implementation of managerial actions, legally established norms and rules, which together comprise the management mechanism;

4) material management infrastructure.

The management system should correspond to organizational goals, be internally balanced, flexible and adaptive, accessible to control and allow informal connections between people.

Literature Review

The formulation of problem

The problem of the construction of a computerized management system is to assist the manager in the decision making process. This provides for the establishment of goals and focuses on the construction of an integrated system unlike the construction in separated subsystems. System requirements are determined by the reduction of data and knowledge on the phenomena and process, occurring during the operation of the facility management object.

Main methodological development of the functional structure of the complex systems [1], to which include the computerized management system which used in this paper can be determined structure of the management systems [2–5].

Implementation of system analysis for analysis begins with setting the goals for the system a whole.

The implementation of the development process management system is essential and performance criteria. The correct definition of objectives and performance criteria of the system, it is orientation the development and the functioning. The purpose of the system determines the purpose and meaning of its functioning. Efficiency criterion – assessment of how the system will operate, whether it is to, what we would like to see.

It follows that the purpose and efficiency criterion is decisive in determining the functional structure of the management system [6–9].

Due to the fact, the computerized control system consists of a plurality of elements, having different characteristics, difficult to understand their relationships with the implementation of the design process and integrated system.

Materials and Methods

The Solution of the problem

In this regard, consider the relationship of the individual steps of designing the functional structure of the management system shown in Figure 1.

In general, the relationship of the processes, for which see the following sets:

G – set of designed systems goals;
 F – set of realizable system function;
 f – functional tasks;
 f_s – functional structure;
 Req. – a lot of the requirements for the system;
 data – a lot of data on the subject area;
 Res. – many resources are used in the design of management system.

For example, the set of goals G distributed between multiple functional tasks F , in this way, for a specific purpose, $g, g \in G$, requires at least one functional task $f, f \in F$.

This distribution f among G provide mapping:

$$\varnothing_G^F \begin{cases} G \rightarrow 2^F \\ g \rightarrow F_g \end{cases}, \quad (1)$$

where 2^F – the set of all subsets of the set of functions F , realizing the set G such that:

$$\varnothing_G^F(g) = F. \quad (2)$$

$F_g \subset F$ – Many features that are designed for specific purposes $g, g \in G$. In this condition must be satisfied.

$$F = \bigcup_{g \in G} F_g. \quad (3)$$

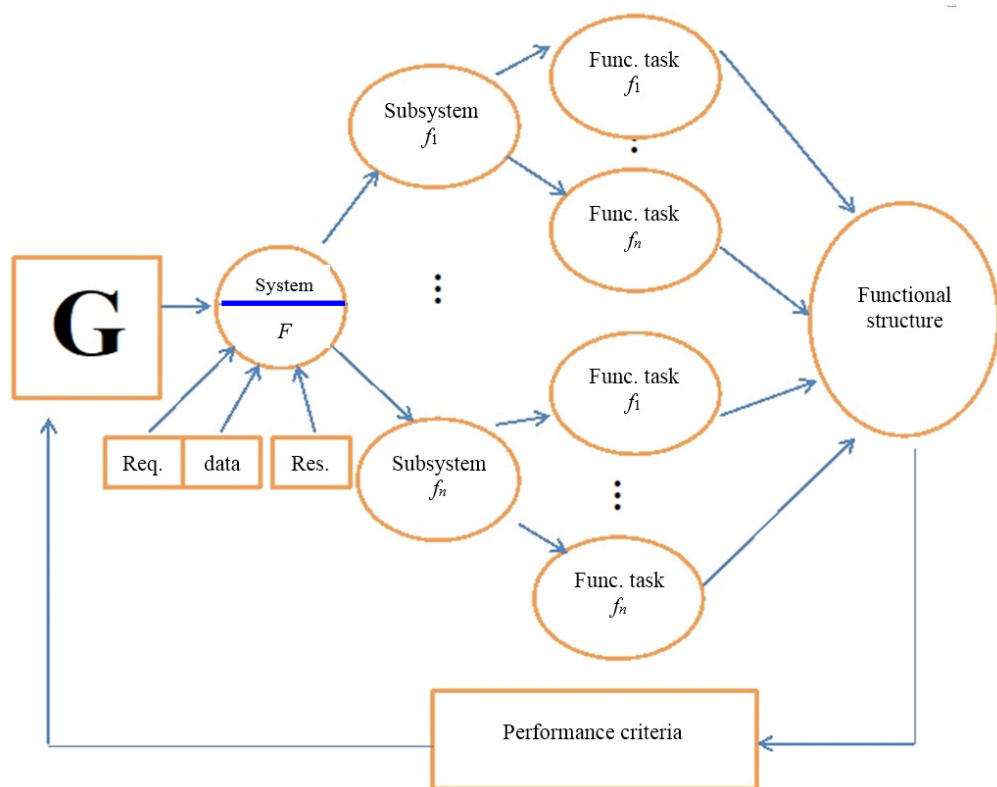


Fig. 1. Relationship development process computerized management system structure

That determines the need for a specific function tasks f . To achieve the goals g , when each element f , $f \in F$, is the image of only one element g , or has no image that is:

$$f \in F : |\varnothing' \{f\}| \leq 1. \quad (4)$$

To create a management system must define a set of requirements, placed on the projected system, set of relevant resources R (material, labor, financial, and etc.) that must be managed in design process, a lot of data about the domain. Many resources, demands, data are taken into account in the implementation of performance criteria [10–12].

If on the basic of the obtained values of the criteria is not possible to develop the required functional structure, then corrects goal G , thus changing the function G .

Results

The management structure

The management structure is one of the main elements of the enterprise management system and is characterized by the distribution of management goals and objectives between its departments and employees. In fact, the management structure is an organizational form of the division of labor in the enterprise team, including managerial labor, activities for the adoption and implementation of managerial decisions¹.

From an organizational point of view, a modern business entity can rightfully be considered as a system. In this context, the organizational structure is a set of managerial units located in strict subordination and providing the relationship between the manager and the managed elements².

A modern leader implements an organizational function based on a wide range of methods. An important role belongs to the methodology of grouping performers on the basis of the community of work performed, that is, intraorganizational isolation. Its result is the choice of the type of management structure of the enterprise.

Management practice has identified a number of reference types of organizational structure that have proven their effectiveness in various situations depending on the set of organizational variables: the scale and nature of the activity, the number of employees, the branch of the enterprise, the strength of the uncertainty of the economic result, the predictability of the influence of the external environment and a number of other parameters. The establishment of managerial priority in the formation of the organizational structure is influenced by the characteristics of the enterprise's interaction with the external environment, and especially with representatives of its immediate environment.

Market conditions for selecting the vector of changes in the structure of enterprise management are presented in the table.

The managerial problem of optimizing the organizational structure under the influence of changes in the external environment has become aggravated for one of the enterprises of the Volga region close to us – CJSC Torgmash. As part of the analytical justification of management decisions, a number of significant indicators were calculated that reflect the economic condition of the enterprise over the past three years. Among them, the size and dynamics of sales volumes of finished products in absolute and relative forms, labor productivity, a number of personnel performance indicators, structural characteristics of sales volumes. A cautious conclusion was made that the economic condition of the enterprise, despite the external unfavorable background, remains stable.

Stability is given to him, among other things, by close partnerships with the country's power structures, large budget consumers at the federal level.

Along with this, in recent years, the importance of the enterprise of civil consumers engaged in wholesale purchases of manufactured products for the needs of domestic catering has been growing.

¹ Vikhansky O.S., Naumov A.I. Management: A Textbook. 5th Ed. Moscow: INFRA-M; 2014. 576 p. (In Russ.)

² Ibid.

Their contribution to the economic performance of the enterprise has steadily increased in recent years. A similar trend, if confirmed in subsequent years, will inevitably require changes to the existing enterprise management system. This should happen, including the adjustment of the managerial structure, its modernization. Adaptation of the organizational structure of this enterprise to the new conditions for the implementation of economic activity

should be carried out with emphasis on the civilian segment of the domestic market for trade and technological equipment. A number of methodological recommendations relating to the conduct of such events to bring the organizational structure and the conditions of economic activity into line are presented below³.

By its type, the management structure operating in CJSC Torgmash is linear-functional. Its scheme is presented in Figure 2.

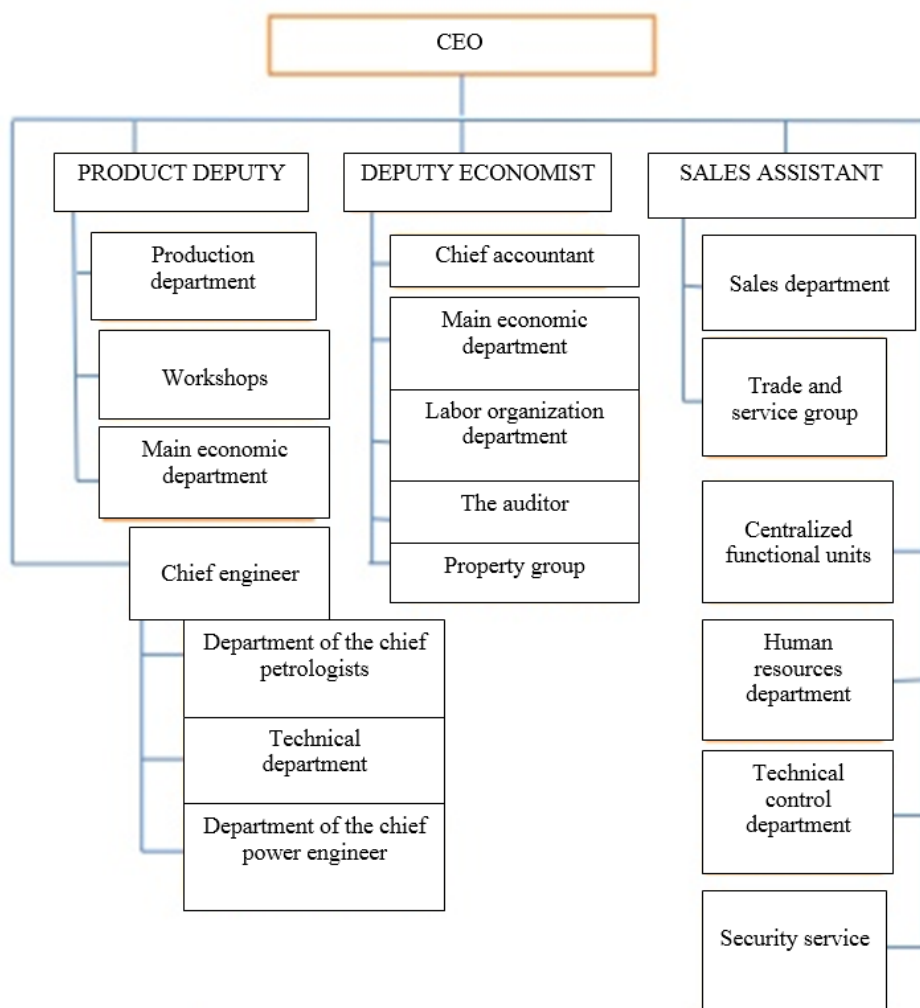


Fig. 2. Traditional management structure

³ Grishin V.V. Innovation Management in the Context of National Economy Modernization: A Text-book. Moscow: Dashkov & Co.; 2010. 368 p. (In Russ.)

When constructing the organization's management system in the form of a linear-functional structure, most of the authority is assigned to the line manager who heads the team. A special apparatus consisting of functional units (departments, bureaus) helps him. In this case, the functional structures of the unit are subordinate to the mainline manager. They carry out their decisions either through the chief manager, or (within their authority) directly through the respective heads of the executing services.

The first version of structural changes in the organizational structure of the enterprise in question involves preserving the existing type of organizational structure – linear-functional. But at the same time, it seems appropriate to consider the possibility of increasing the role of marketing in the economic development of the enterprise and, accordingly, take this into account in the organizational structure of the enterprise. The place that marketing occupies in the structure of enterprise management does not yet correspond to its role in achieving final results under com-

petitive business conditions. At the very least, it is necessary to separate the officials responsible for the development and implementation of the marketing policy of the enterprise into a separate structural unit, for example, into the marketing service (Fig. 3).

Currently, this range of issues is within the competence of the marketing and advertising group, which is a structural unit of the sales department. At the same time, the practice of forming managerial structures of progressively managed enterprises indicates the feasibility of organizational separation of these activities. At the same time, each structural unit will have its own area of work. Thus, the marketing service will expand the scope of the commercial interests of the enterprise, promote products to new markets.

The sales department will continue to engage in the sales of products, satisfying the routine market demand and demand newly created by the marketing service. Such a separation of functions will facilitate more effective interaction with civilian consumers of products [13].

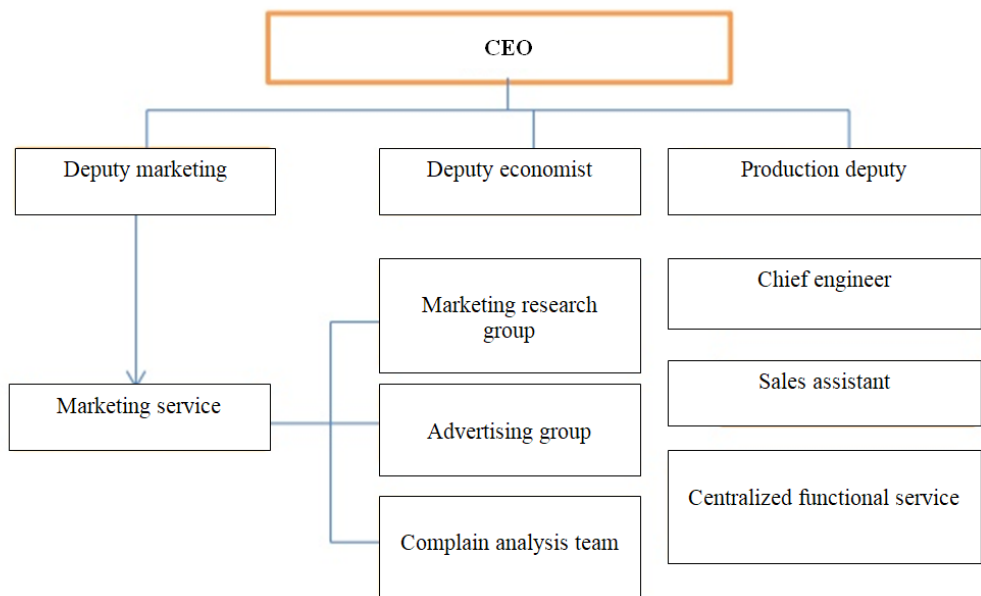


Fig. 3. Marketing oriented management structure

With close economic interaction with civilian consumers of the enterprise's products, a situation will inevitably arise when the requirements of this group of consumers for the quality characteristics of commercial and technological equipment increase and conflict with the traditional requests of customers from power ministries. Then the further development of the plant will be impossible without the use of technical, technological, structural innovations, without changes in the nomenclature and assortment of products. Thus, today the question arises of the innovative activity of the enterprise, the development of modifications or fundamentally new types of products with better consumer properties than those available on the market.

The growing importance of innovations in the market success of the enterprise also marks a new attitude to its scientific and technical potential, embodied in the most qualified part of the staff. To strengthen the position on the market, the company's management should already think about preparing for the intraorganizational allocation of a multidisciplinary working group to solve innovative problems.

The implementation of innovative activities by the enterprise requires changing the parameters of the management structure, which should be adapted to new tasks that were previously not peculiar to it. The model of innovative development imposes increased demands not only on scientific, technical and personnel support but also on organizational structure. Thus, the need arises to create a new system of relations between participants in innovation. This problem is solved within the framework of innovative administration, which is the process of adapting the traditional structure of enterprise management to the goals, content, and conditions for the implementation of innovative activities [12; 13].

The procedure for adopting the enterprise's management structure to the implementation of innovative activities involves, firstly, an analysis of the existing

management structure, secondly, structural changes, and thirdly, the testing and application of a new (innovative) model of the managerial structure. The object of reform in the framework of innovative administration in the vast majority of cases is the traditional linear-functional management structure. Its typical form is shown in Figure 3. This management structure will be the starting point for further transformations.

The main methods of innovative reform of the enterprise management structure include internal adaptation, the allocation of an innovative division and the organization of innovative developments in a matrix way.

If the experience of applying innovations is successful, then innovation will require more attention from management. At the level of the deputy general director, a freed head of this direction may appear who is personally responsible for innovative projects (Fig. 4).

In modern business conditions with their inherent sign of concentration of capital and the development of integrated entrepreneurial structures, there is a need to organize the coordinated work of individual areas of activity of multidisciplinary companies. For these purposes, in the practice of managing large business entities, a divisional organizational structure is used.

The method of separation of the innovation division consists of replacing the resource principle of personnel isolation with the resultant criterion – the type of final product (in our case, this is an innovative product). So, in the enterprise's management structure (Fig. 5), a specialized innovation division appears, which includes all participants of the innovation project (both developers and performers). It becomes an independent structural unit both in resource provision and in matters of managerial decision-making.

Accordingly, the status of its leader is also increasing. Method application conditions:

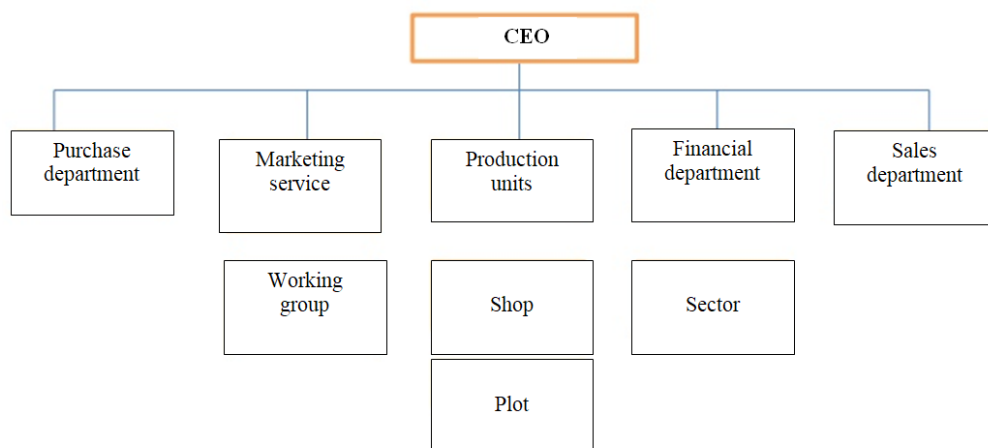


Fig. 4. A typical diagram of linear – functional structure of enterprise management

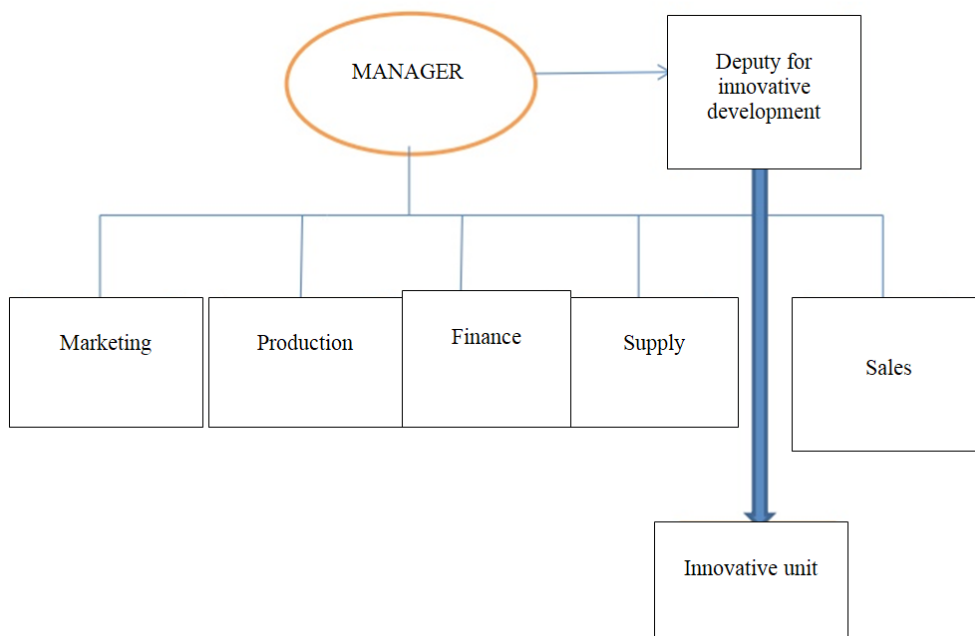


Fig. 5. The option management structure of innovative activity of enterprise (linearly functional structure)

- a) one-time innovations paid off;
- b) the company focuses on innovative activity;
- c) plans to completely reorient to the release of innovative products.

The composition of the innovation unit can consist of both highly qualified technical specialists (preferably with innovative thinking, with high inventive activity), as well as marketers, specialists

in market research, whose task will be to study the dynamics of requests of real and potential consumers, generalize complaints, establish feedback with customers in the early stages of the technology marketing process. In addition, specialists in other fields, for example, lawyers dealing with intellectual property protection issues, may be involved in the work of an innovative working group as necessary. A diagram of a variant of the management structure focused on innovation is presented in Figure 6⁴.

Another option for enterprise restructuring can be considered changes in the approach to the formation of the organizational structure. The current model of the linear-functional structure, taking into account strategic changes, can be turned into a divisional type of managerial structure. The criterion for grouping structural units, in this case, could be the type of consumer of the enterprise's prod-

ucts. A necessary condition for the use of such a radical method of structural reform of the enterprise as changing the type of management structure in favor of a divisional structure is a further discrepancy in the requirements for the characteristics of products manufactured by the enterprise between the main consumer groups: on the one hand, large budget customers – power ministries and departments; on the other hand, civilian consumers of food production equipment and trade and technological equipment. Otherwise, a change in the type of managerial structure can hardly be considered justified.

Like the vast majority of domestic enterprises of given industry affiliation and scale, until recently it had a linear-functional management structure. This implied the allocation of the following enlarged units: production management, project department, marketing service, supply and marketing divisions, transport department,

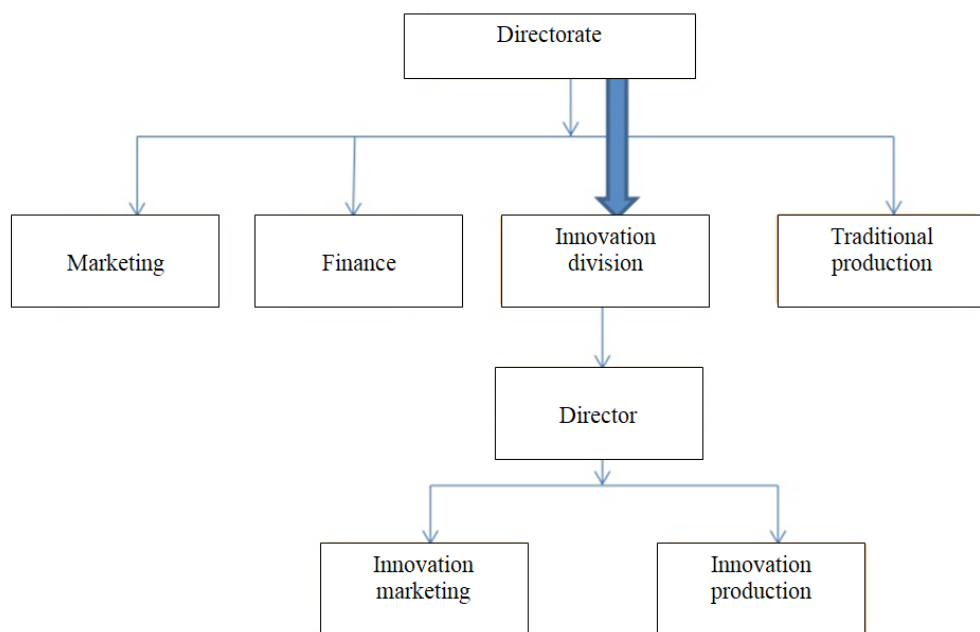


Fig. 6. Option management structure of innovative activity of enterprise (Division production)

⁴ Ibid.



human resources department, financial service, combining accounting, planning and financial department and the department of labor and wage⁵.

The results of the study showed that the company has sufficient reserves for timely and adequate changes in the organization of internal management relations, to improve the management structure.

In this way, based on the above approach can be determined structure of the computerized management systems, what is necessary to identify the main activities of the management object implemented functions in complex, followed by determination of functional subsystems, which are necessary for the of the management object, it should be noted, that the proposed approach is a model, and is suitable for the development of the functional structure of only complexity.

As a result, a unified logistics service of the enterprise appears, which includes structural units responsible for the procurement and delivery of material resources, storage and movement of material flow as part of the technological process, and the sale of finished products. These measures together can increase the efficiency of the enterprise and give its development dynamism in a difficult situation of market competition.

Discussion and Conclusion

The functioning of modern organizations is faced with many problems, some of which are typical and can be relatively easily solved by specialists using conventional technologies for the development and implementation of solutions.

The challenge in building a computerized management system is to help the manager in his decision-making process. This provides for the establishment of goals and focuses on the construction of an integrated system unlike the construction in separated subsystems. System requirements are determined by the reduction of data and knowledge on the phenomena and process, occurring during the operation of the facility management object.

In this regard, consider the relationship of the individual steps of designing the functional structure of the management system shown in Figure 1.

To create a management system must define a set of requirements, placed on the projected system, set of relevant resources R (material, labor, financial, and etc.) that must be managed in the design process, a lot of data about the domain. Many resources, demands, data are taken into account in the implementation of performance criteria.

If on the basis of the obtained values of the criteria is not possible to develop the required functional structure, then corrects goal G , thus changing the function G .

The proposed approach can be determined structure of the management systems, what is necessary to identify the main activities of the management object implemented functions in complex, followed by determination of functional subsystems, which are necessary for the of the management object, it should be noted, that the proposed approach is a model, and is suitable for the development of the functional structure of only complexity.

REFERENCES

1. Howard B.B. Modeling Trading System Performance. Exeter: Blue Owl Press; 2011. 384 p. (In Eng.)
2. Bidgoli H. Modern Information Systems for Managers. San Diego: Academic Press; 1997. 438 p. (In Eng.)
3. Al Salaimeh S. The Optimal Management of Information Servicing Logistics System. *Leonardo Journal of Science*. 2003; (10):37-54. Available at: https://www.researchgate.net/publication/26449182_The_Optimal_Management_of_Informational_Servicing_Logistic_Systems (accessed 10.04.2020). (In Eng.)

⁵ Grishin V.V., Grishina V.G. We Develop a Business Strategy for the Firm: Practical Guide. Moscow: Dashkov & Co.; 2009. (In Russ.)

4. Al Salaimeh S. Information Technologies of Distributed Applications Design. *Leonardo Journal of Science*. 2003; (10):41-46. Available at: https://www.researchgate.net/publication/326657669_Information_Technologies_of_Distributed_Applications_Design (accessed 10.04.2020). (In Eng.)
5. Al Salaimeh S., Makadmeh Z. Multi-Criteria Synthesis of Logistics Systems through the Hierarchy Analysis. *Journal of System Sciences and Systems Engineering*. 2005; 7:107-115. Available at: https://www.researchgate.net/publication/326657677_Multi-Criteria_Synthesis_of_Logistics_Systems_Through_the_Hierarchy_Analysis (accessed 10.04.2020). (In Eng.)
6. Al Salaimeh S., Batiha K. Business Process Simulation with Algebra Event Regular Expression. *Information Technology Journal*. 2006; 5(3):583-589. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3923/itj.2006.583.589>
7. Batiha K., Al Salaimeh S. E-Learning. *Information Technologies and Knowledge*. 2007; 1:76-77. Available at: <http://www.foibg.com/ijtk/ijtk-vol01/ijtk01-1-p14.pdf> (accessed 10.04.2020). (In Eng.)
8. Batiha K., Al Salaimeh S., Al Besoul K. Digital Art and Design. *Leonardo Journal of Science*. 2006; (9):1-8. Available at: https://www.researchgate.net/publication/326657875_Digital_Art_and_Design (accessed 10.04.2020). (In Eng.)
9. Batiha K., Al Salaimeh S. The Structure of Logistics Organizational Technological System. *The Information Society*. 2007; 4(7). Available at: https://www.researchgate.net/publication/326657880_The_Structure_of_logistics_organizational_technological_system (accessed 10.04.2020). (In Eng.)
10. Houmin Y., George Y., Qing Z. Stochastic Processes, Optimization, and Control Theory: Applications in Financial Engineering, Queuing Networks, and Manufacturing Systems: A Volume in Honor of Suresh Sethi. *International Series in Operations Research & Management Science*. 2006; 94(1). 360 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/0-387-33815-2>
11. Bequette B.W. Process Dynamics: Modeling, Analysis, and Simulation. London: Prentice Hall; 2003. 640 p.
12. Akuna S.T., Juristo N. Software Process Modeling. Boston: Springer; 2005. 208 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/b104986>
13. Grishin V.V. Innovative Administration at the Enterprise: Goals and Methods. *Problemy teorii i praktiki upravleniya* = Problems of Management Theory and Practice. 2009; 6. (In Russ.)

Received 18.11.2019; revised 20.01.2020; published online 30.06.2020

Поступила 18.11.2019; принята к публикации 20.01.2020; опубликована онлайн 30.06.2020

About the authors:

Khaldoun Al Besoul, Assistant Professor of Department of Computer Science of Faculty of Art and Science, King Khalid University (108 Guraiger, Abha 61421, Kingdom of Saudi Arabia), Ph.D., Researchgate ID: https://www.researchgate.net/profile/Khaldoun_Besoul

Safwan Al Salaimeh, Professor of Software Engineering Department, Aqaba University of Technology (79 Wasfi al-Tal St. (Gardens), Amman 11191, Jordan), Ph.D., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8474-3471>, Scopus ID: 15724463400, safwan670@yahoo.com

Ayman Al Halaybeh, Assistant Professor of Department of Computer Science of Faculty of Art and Science, King Khalid University (108 Guraiger, Abha 61421, Kingdom of Saudi Arabia), Ph.D.

Nazim Hajiyevev, Visiting Scholar of Davis Center for Russian and Eurasian Studies, Harvard University (2017–2018) (1730 Cambridge St., Boston 02138, USA), Ph.D. (Economics), Associate Professor, n.hajiyevev@unec.edu.az

Contribution of the authors:

K. Al Besoul – analysis of the research results; S. Al Salaimeh – formulating the basic concept, goals and objectives of the study, making calculations, writing the draft, drawing the conclusions; A. Al Halaybeh – revision of the text, correction of conclusions; N. Hajiyevev – revision of the text, correction of conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.



Об авторах:

Аль-Бесул Хальдун, доцент департамента информатики факультета искусств и наук Университета Короля Халеда (61421, Королевство Саудовская Аравия, г. Абха, Гурайгер, д. 108), доктор философии, Researchgate ID: https://www.researchgate.net/profile/Khaldoun_Besoul

Аль-Салаймех Сафван, профессор департамента программной инженерии Акабского технологического университета (11191, Иордания, г. Амман, ул. Васфи Аль-Таль (Гарденс), д. 79), доктор философии, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8474-3471>, Scopus ID: 15724463400, safwan670@yahoo.com

Аль-Халайбех Айман, доцент департамента вычислительной техники факультета искусств и наук Университета Короля Халеда (61421, Королевство Саудовская Аравия, г. Абха, Гурайгер, д. 108), доктор философии.

Хаджиев Назим Озбей оглы, приглашенный исследователь Центра российских и евразийских исследований Дэвиса Гарвардского университета (2017–2018) (02138, США, г. Бостон, ул. Кембридж-стрит, д. 1730), кандидат экономических наук, доцент, n.hajiyev@unec.edu.az

Заявленный вклад соавторов:

Х. Аль-Бесул – анализ результатов исследования; С. Аль-Салаймех – формулирование основной концепции, целей и задач исследования, проведение расчетов, написание проекта, составление выводов; А. Аль-Халайбех – доработка текста, исправление выводов; Н. Хаджиев – доработка текста, исправление выводов.

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 публикации этической 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 Means of Maintenance in Agriculture

It is not allowed to submit papers that have already been published or sent for publication to other journals. **In 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 10.06.2020 г. Дата выхода в свет 30.06.2020 г.

Формат $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 12,35.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 250 экз. Заказ № 853. 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 10.06.2020. Date of publishing 30.06.2020.

Sheet size $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Conventional printed sheets 12,35.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 250 copies. Order no. 853. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)

Уважаемые ученые!

Принимается подписка на периодическое научное издание
журнал «Инженерные технологии и системы»
ISSN 2658-4123

Подписка оформляется в почтовых отделениях. Подписной индекс по каталогу агентства «Роспечать» – «Газеты. Журналы»: 70539

Федеральное государственное унитарное предприятие "Почта России" Ф СП - 1												
Бланк заказа периодических изданий												
АБОНЕМЕНТ						На газету журнал		70539				
«Инженерные технологии и системы»								(индекс издания)				
(наименование журнала)								Количество комплектов				
На 2020 год по месяцам												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Куда												
(почтовый индекс)						(адрес)						
Кому												
Линия отреза												
						ДОСТАВОЧНАЯ		70539				
ПВ место литер						КАРТОЧКА		(индекс издания)				
На газету журнал						«Инженерные технологии и системы»						
(наименование издания)												
Стоимость	подписки					руб.					Количество комплектов	
	каталожная					руб.						
	переадресовки					руб.						
На 2020 год по месяцам												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Город												
почтовый индекс						село						
Район						область						
код улицы						улица						
дом корпус квартира						Фамилия И.О.						