

DOI: 10.15507/2658-4123.029.201902 ISSN 2658-4123 (Print), 2658-6525 (Online)

Том 29, № 2. 2019

Научный журнал
Основан в январе 1990 г.
Выходит один раз в квартал

16+



Vol. 29, no. 2. 2019

SCIENTIFIC JOURNAL
Founded in January 1990
Issued quarterly

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

DOI: 10.15507/2658-4123

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

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

Предыдущее название (до 2019 года):
Вестник Мордовского университета

The previous name until beginning of 2019:
Mordovia University Bulletin

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

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

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

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и CrossRef

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор),
свидетельство ПИ № ФС77-74640 от 24.12.2018 г.

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

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

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

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

Научный журнал «Инженерные технологии и системы»

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

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

01.04.01 Приборы и методы экспериментальной физики

01.04.05 Оптика

01.04.13 Электрофизика, электрофизические установки

05.20.01 Технологии и средства механизации сельского хозяйства

05.20.02 Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве

05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве

Редакция журнала осуществляет научное рецензирование (двустороннее слепое) всех поступающих в редакцию статей с целью экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в издательстве и редакции в течение 5 лет. Редакция журнала направляет копии рецензий авторам представленных материалов и в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении соответствующего запроса.

Журнал индексируется и архивируется в базах данных:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

EBSCO

ResearchBib

SHERPA/ReMeQ

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 system and technologies.

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Technologies and Means of Agricultural Mechanization

Electrotechnologies and Electrical Equipment in Agriculture

Technologies and Means of Maintenance in Agriculture

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

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

The journal is indexed and archived by databases:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Index of Scientific Citations

EBSCO

ResearchBib

SHERPA/RoMEO

The journal is a member of 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, Бартынский государственный университет, профессор кафедры экологии и природопользования, ФГБОУ ВО «Московский педагогический государственный университет», доктор биологических наук, профессор (Бартын, Турция)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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, университет «Ain Shams», доктор наук в области компьютерных технологий, заслуженный профессор (Каир, Египет)

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

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

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

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

EDITORIAL BOARD

Sergey M. Vdovin – *Editor in Chief*, Rector 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 V. Dimitrov – Dean of Device Manufacturing and Technical Regulation Faculty, Don State Technical University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-1439-1674 (Russia, Rostov-on-Don)

Leonid A. Igumnov – Director of Research Institute of Mechanics, Head of Numerical Simulation of Theoretical, Computer and Experimental Mechanics Chair, Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor (Nizhniy Novgorod, Russia)

Vladimir N. Kechemaykin – Director of Ruzaevka Campus, National Research Mordovia State University, Ph.D. (Economics) (Saransk, Russia)

Aleksandr V. Kotin – Director of Institute of Mechanics and Energy, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-0078-1866 (Saransk, Russia)

Fedor V. Kusmartsev – Dean of Institute of Physics, Loughborough University, Ph.D. (Phys.-Math.) (Loughborough, Great Britain)

Viktor A. Margulis – Head of Theoretical Physics Chair, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, ORCID: 0000-0001-6281-9714, margulisva@mrsu.ru (Saransk, Russia)

Svetlana A. Mikayeva – Professor of Electrotechnics and Electronics Chair, Moscow Engineering University, D.Sc. (Engineering), Professor (Moscow, Russia)

Konstantin N. Nishchev – Director of Institute of Physics and Chemistry, National Research Mordovia State University, Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-7905-3700 (Saransk, Russia)

Yuriy N. Prytkov – Director of Institute of Agriculture, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Agriculture), Professor (Saransk, Russia)

Polina A. Ryabochkina – Professor of Chair of General Physics, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Phys.-Math.), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-8503-8486 (Saransk, Russia)

Abdel-Badeeh M. Salem – Head of Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Research Labs, Professor of Faculty of Computer and Information Sciences, Ain Shams University, D.Sc. (Computer Science), Emeritus Professor (Cairo, Egypt)

Tamara I. Shishelova – Professor of Physics Chair, Irkutsk National Research Technical University, D.Sc. (Engineering), Scopus ID: 6507978465 (Irkutsk, Russia)

Vladimir A. Skryabin – Professor of Machine Engineering Technology Chair, Penza State University, D.Sc. (Engineering), ORCID: 0000-0001-7156-9198 (Penza, Russia)

Anatoliy A. Yamashkin – Head of Land Utilization and Landscape Design Chair, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Geography), Professor (Saransk, Russia)

Vladimir T. Yerofeyev – Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Dean of Architectural and Civil Engineering Faculty, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Engineering), Professor (Saransk, Russia)

Olga Ye. Zheleznikova – Director of Institute of Electronics and Light Engineering, National Research Mordovia State University, Ph.D. (Engineering), Associate Professor (Saransk, Russia)



СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Тарасов Е. М., Железнов Д. В., Васин Н. Н., Тарасова А. Е. Обеспечение инвариантности к возмущающим воздействиям в рельсовых линиях.....	152
Чугунов М. В., Полунина И. Н., Попков М. А. Проектирование квадрокоптера на базе интегрированной модельной среды.....	169
Коржавина А. С., Князьков В. С. Метод умножения с масштабированием результата для высокоточных модулярно-позиционных интервально-логарифмических вычислений.....	187
Волчихин В. И., Иванов А. И., Безяев А. В., Куприянов Е. Н. Нейросетевой анализ нормальности малых выборок биометрических данных с использованием хи-квадрат критерия и критериев Андерсона – Дарлинга.....	205

ФИЗИКА

Власенко В. Д., Иванов В. И., Аулов В. Ф., Коневцов Л. А., Мартынова Е. Г., Хасан И. Х. Моделирование температурного поля поверхности при электроискровом легировании металлов.....	218
Юденков А. В., Володченков А. М., Юденкова М. А. Согласованные движения электронов на поверхности графена.....	234

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Сысуев В. А., Саитов В. Е., Фарафонов В. Г., Саитов А. В. Исследование параметров движения зерна в жидкости устройства для удаления спорыньи.....	248
Ашитко А. А., Гавриш Е. А., Несмиян А. Ю., Колесник Р. Ю. Технологические свойства растений редиса.....	265
Белов М. И. Методика расчета длины резки растений кормоуборочными комбайнами: роторным и двойного измельчения.....	279

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Бышов Н. В., Успенский И. А., Алексеев В. В., Фадеев И. В. Изменение контактных углов смачивания при добавлении в моющие растворы поверхностно-активных веществ.....	295
Беляков М. В. Фотолюминесцентный контроль спелости семян зерновых в процессе созревания.....	306

Информация для авторов и читателей (на рус. яз.).....	320
Информация для авторов и читателей (на англ. яз.).....	322

CONTENTS

INFORMATION SYSTEMS

Tarasov E. M., Zhelezov D. V., Vasin N. N., Tarasova A. E. Providing Invariance to Disturbing Effects in Rail Lines.....	152
Chugunov M. V., Polunina I. N., Popkov M. A. The Quadcopter Design Based on Integrated Model Environment.....	169
Korzhavina A. S., Knyazkov V. S. The Multiplication Method with Scaling the Result for High-Precision Residue Positional Interval Logarithmic Computations.....	187
Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Bezyaev A. V., Kupriyanov E. N. The Neural Network Analysis of Normality of Small Samples of Biometric Data through Using the Chi-Square Test and Anderson–Darling Criteria.....	205

PHYSICS

Vlasenko V. D., Ivanov V. I., Aulov V. F., Konevtsov L. A., Martynova E. G., Hasan I. H. Modelling the Temperature Field of a Surface in Using Electrosark Alloying of Metals.....	218
Yudnikov A. V., Volodchenkov A. M., Iudenkova M. A. Cooperative Motion of Electrons on the Graphene Surface.....	234

TECHNOLOGIES AND MEANS OF AGRICULTURAL MECHANIZATION

Sysuev V. A., Saitov V. E., Farafonov V. G., Saitov A. V. Investigation of Grain Movement Parameters in the Liquid of the Device for Removing Ergot.....	248
Ashitko A. A., Gavrish E. A., Nesmiyan A. Yu., Kolesnik R. Yu. Technological Properties of Radish.....	265
Belov M. I. The Method of Calculating Cut Length for Flail and Double Chop Forage Harvesters.....	279

TECHNOLOGIES AND MEANS OF MAINTENANCE IN AGRICULTURE

Byshov N. V., Uspensky I. A., Alekseev V. V., Fadeev I. V. Changing the Contact Wetting Angles when Adding Surface-Active Substances to Washing Solutions.....	295
Belyakov M. V. Photoluminescence Monitoring the Ripeness of Cereal Seeds during Ripening.....	306
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in Russian)</i>	320
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in English)</i>	322

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ / INFORMATION SYSTEMS

УДК 656.259.12

DOI: 10.15507/2658-4123.029.201902.152-168



Обеспечение инвариантности к возмущающим воздействиям в рельсовых линиях

Е. М. Тарасов^{1*}, Д. В. Железнов¹, Н. Н. Васин²,
А. Е. Тарасова¹

¹ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет
путей сообщения» (г. Самара, Россия)

²ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики» (г. Самара, Россия)

*tarasov53em@yandex.ru

Введение. Системы интервального регулирования движения поездов эксплуатируются в условиях воздействия значительных индустриальных помех, помех от электротока тягового подвижного состава и изменений климатических условий в широких пределах, приводящих к колебаниям параметров элементов схем, что становится причиной появления внутренних возмущений. Колебания в широком диапазоне проводимости изоляции рельсовых линий относятся к основным внешним возмущениям, приводящим к изменению в большом диапазоне информативного параметра – напряжения на выходе рельсовых линий. В настоящее время известно множество способов и методов подавления возмущений, позволяющих, не ухудшая качество классификации, корректировать колебания информативного сигнала. В статье решается задача обеспечения нечувствительности выходного информативного сигнала к воздействию возмущения принципами координатной компенсации с корректирующим звеном.

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи в статье рассмотрены различные методологии компенсации возмущений; в качестве основного принят метод координатной компенсации возмущений на входе четырехполосника рельсовых линий. Для этого определено уравнение передаточной функции корректирующего звена, предполагающее косвенное измерение входного сопротивления рельсовых линий, являющегося функцией проводимости изоляции.

Результаты исследования. В статье приведены результаты исследования инвариантных возможностей, которыми обладает предложенный принцип компенсации возмущений. Показано, что при компенсации возмущений корректирующим звеном, включенным на входе четырехполосника рельсовых линий, возможно существенное уменьшение диапазона изменения выходного информативного сигнала в каждом из классов, т. е. классы становятся более компактными, а качество классификации оказывается в 5 раз выше, чем при отсутствии компенсации возмущений.

Обсуждение и заключение. Результаты, полученные в ходе исследования, подтверждают эффективность предложенного способа координатной компенсации возмущений в рельсовых линиях с разомкнутой схемой замещения в условиях отсутствия

© Тарасов Е. М., Железнов Д. В., Васин Н. Н., Тарасова А. Е., 2019



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

возможности организации обратной связи, переменной схемы замещения в каждом из классов состояний и невозможности создания дополнительного физического канала передачи возмущения. Использование предложенного метода при построении современных классификаторов позволит существенно повысить устойчивость функционирования систем управления движением поездов, а также исключить ошибки первого рода, приводящие к непроизводительным простоям поездов, и ошибки второго рода, приводящие к авариям и крушениям.

Ключевые слова: инвариантность, рельсовая линия, корректирующее звено, моделирование, обратная связь, компенсация возмущений

Для цитирования: Обеспечение инвариантности к возмущающим воздействиям в рельсовых линиях / Е. М. Тарасов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 2. С. 152–168. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.152-168>

Providing Invariance to Disturbing Effects in Rail Lines

E. M. Tarasov^{1*}, D. V. Zheleznov¹, N. N. Vasin²,
A. E. Tarasova¹

¹Samara State Transport University (Samara, Russia)

²Povolzhskiy State University of Telecommunications
and Informatics (Samara, Russia)

*tarasov53em@yandex.ru

Introduction. The time interval systems for controlling train movement operated under the influence of significant industrial disturbances, interference from the electric current of traction rolling stocks, and significant climate changes that result in fluctuations of parameters of circuit elements. These factors lead to the appearance of internal disturbances. The fluctuations in a wide range of the conductivity of rail lines insulation are the main external disturbances leading to considerable changes of the informative parameter, the voltage at the output end of the rail line. At present, there are many methods for suppressing disturbances, which allow correcting fluctuations in the informative signal without deteriorating the quality of classification. The article deals with the problem of providing insensitivity of the output informative signal to the influence of disturbance by principles of coordinate compensation with a correcting link.

Materials and Methods. To solve the problem, various methodologies of compensation for disturbances are considered in the paper; the method of coordinate compensation for disturbances at the input of a quadripole of rail lines is adopted as the main one. The equation of the transfer function of the correcting link is determined, assuming an indirect measurement of the input resistance of the rail line, which is a function of the conductivity of the insulation.

Results. The article presents the results of the research of the invariant capabilities of the disturbance compensation principle. It is shown that disturbances compensation with a corrective link included at the input of a quadripole allows one to significantly reduce the dynamic range of the output informative signal change in each of the classes, i.e. classes have become more compact, and the quality of classification has become 5 times higher than in the absence of compensation of disturbances.

Discussion and Conclusion. The results confirm the effectiveness of the proposed method for the coordinate compensation of disturbances in rail lines with an open circuit in the absence of the possibility for organizing feedback, a variable circuit in each of the classes of states, and the impossibility of creating a physical additional channel for the transmission of the disturbance. Using the proposed method in the construction of modern classifiers will significantly improve the stability of the functioning of train control systems; eliminate errors of the first kind, leading to unproductive idle train, and errors of the second kind, leading to accidents and crashes.

Keywords: invariance, rail line, correcting link, simulation, feedback, compensation of disturbances

For citation: Tarasov E.M., Zheleznov D.V., Vasin N.N., Tarasova A.E. Providing Invariance to Disturbing Effects in Rail Lines. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(2):152-168. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.152-168>

Введение

Информационной основой систем интервального регулирования движения поездов являются электрические рельсовые цепи (РЦ), входящие в состав классификаторов состояний рельсовых линий (РЛ). РЦ, являясь первичным датчиком информации о свободном, занятом и неисправном состояниях РЛ, создают информационную основу классификаторов. Поскольку РЦ функционируют в тяжелых промышленных условиях, на них воздействуют значительные возмущения. По своему функциональному назначению классификаторы состояний при автоматизированном управлении движением поездов выполняют ответственную функцию: обеспечение безопасности движения поездов. Следовательно, к ним предъявляются высокие требования по безотказности и относительной устойчивости к внутренним и внешним воздействиям¹.

В подавляющем большинстве практических случаев построение систем автоматического управления не может быть осуществлено без учета влияния внешних воздействий².

К внешним (по отношению к внутреннему контуру системы автоматического управления) воздействиям относятся:

1) сигналы задания $x(t)$ (задающие воздействия, сигналы опроса РЛ), определяющие желаемый характер изменения регулируемых переменных;

2) сигналы возмущения $[1] \zeta(t)$ (возмущающие воздействия, внешние возмущения), характеризующие влияние на объ-

ект управления внешней среды и, как правило, препятствующие достижению заданной цели управления. Сигналы задания и сигналы возмущения принципиально различны по их доступности прямым измерениям. На практике, как правило, внешние возмущения недоступны прямым измерениям и, кроме того, заранее известны только с точностью до определенной степени воздействия по статистическим характеристикам. Входные сигналы не только доступны прямым измерениям, но и часто генерируются специальными источниками питания.

К датчикам первичной информации о состоянии РЛ как нижнего уровня автоматического управления предъявляются высокие требования по обеспечению безошибочной классификации состояний: необходима достоверная классификация класса нормального режима при свободном и исправном состоянии РЛ, т. е. уровень напряжения на входе классификатора должен быть больше некоторого заранее определенного порога. В классе шунтового режима, при занятии поездом РЛ и исправном их состоянии, значение напряжения должно быть ниже заранее определенного порога (меньшего, чем в классе нормального режима). В классе контрольного режима, при свободных РЛ, но лопнувшем рельсе, напряжение должно быть также ниже порогового значения напряжения нормального режима.

Возмущающие воздействия оказывают большое влияние на выходной

¹ Скорыходов Д. А. Безопасность и риски железнодорожного транспорта // Безопасность движения поездов : тр. XII науч.-практ. конф. М. : МИИТ, 2011.

² Бобков А. А., Никифоров В. О., Пыркин А. А. Адаптивное управление возмущенными системами : учеб. пособ. СПб. : Университет ИТМО, 2015. 126 с. URL: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/1801.pdf>

сигнал опроса РЛ [2] и приводят к пересечению классов состояний, поэтому с целью исключения влияния возмущений и повышения достоверности классификации необходимо разработать новый способ их компенсации принципами инвариантности в рельсовых линиях. Это усложняет выбор структуры устройства инвариантного контроля состояний РЛ, на которую влияют физические пределы и особенности³:

- достоверное распознавание состояний всех классов;
- необходимость отдельного распознавания трех основных классов состояний: свободного, занятого и контроля обрыва РЛ при воздействии значительных возмущений;
- невозможность создания физической обратной связи между концами РЛ участка контроля;
- индивидуальная схема замещения в каждом из режимов;
- использование РЛ как единственного канала телемеханической передачи информации от начала к концу РЛ;
- невозможность создания другого канала для компенсации возмущений.

С учетом ограничений к возмущающим воздействиям инвариантное устройство, позволяющее отдельно классифицировать классы свободного, занятого и неисправного состояний, представляет собой классификатор, реализованный на основе существующей РЦ. Она используется в качестве первичного датчика и дополнительных устройств, косвенно измеряющих воздействующие на РЛ возмущения и формирующих алгоритм функционирования.

Обзор литературы

Вопросу компенсации возмущающих внешних воздействий и обеспечению инвариантности выходного сигнала посвящено множество исследований. Основоположниками теории инвариантности в России являются Г. В. Щипанов, Н. Н. Лузин, П. И. Кузнецов, Б. Н. Петров, В. С. Кулебакин, А. Ю. Ишлинский и другие ученые.

Проблемы достижения инвариантности рассматриваются детализировано в различных предметных областях. При этом обособленно рассматриваются пути достижения инвариантности к влиянию возмущающих факторов; методы изучения характеристик многопараметрических систем с распределенными параметрами (пример РЛ) или сосредоточенными параметрами [3]; способы отстройки от различных погрешностей и неточностей, препятствующих достижению желаемой характеристики выходного сигнала [4]. Также отдельно рассматриваются методики достижения квазиинвариантности до ϵ , при которой достигается локальный максимум инвариантности.

Проблему обеспечения инвариантности к возмущениям произвольного характера рассмотрел Г. А. Щипанов, показавший результативность данного подхода [5]. Далее теория инвариантности развита для достижения двухканальной инвариантности как обеспечение нечувствительности и к изменениям параметров объекта, и к внешним возмущениям⁴. В процессе решения задачи инвариантности к внешним возмущающим воздействиям возникли новые направления, такие как инвариантные

³ Железнов Д. В., Исайчева А. Г., Тарасов Е. М. Принцип инвариантности в задачах контроля сопротивления рельсовых линий // Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта : мат-лы VIII Междунар. симпозиума. СПб. : ПГУПС, 2015. С. 178–184. URL: http://catalog.viniti.ru/srch_result.aspx?IRL=FETCH+QUERY%3d2440618+OBJ%3d016m9qv6+STYLE%3dFull1&TYP=FULL1

⁴ Принципы инвариантности в измерительной технике / Б. Н. Петров [и др.] // М. : Наука, 1976. 243 с.

системы с самонастройкой и инвариантные системы с предельной точностью до ε [6; 7]. В основном использование принципа инвариантности предполагает дополнительное прямое или косвенное измерение наиболее сильно влияющего возмущающего воздействия, относительно которого достигается качество регулирования. Показано [8], что компенсация влияния возмущения на регулируемую величину возможна посредством введения в схему вспомогательного корректирующего сигнала на вход звена коррекции с выхода компенсирующего устройства соответствующей структуры.

Если рассматривать задачу компенсации внешних воздействий мультиинвариантного характера, то она превращается в классическую проблему современной теории управления⁵ [9]. Здесь основным подходом является использование концепции внутренней модели системы⁶ [10], которая в дальнейшем расширена для компенсации неопределенного параметрического возмущающего воздействия⁷ [11–13]. Однако характер изменения и тренд возмущающего воздействия – изменения проводимости изоляции РЛ – неизвестен, и это является ограничением на применение рассмотренных принципов компенсации возмущений.

Еще одним способом компенсации возмущений является применение сильной обратной связи⁸ [14] и управление с обратной связью. Для этого формируется структура модели с обратной связью, и по ней создается модель с переменными параметрами⁹. При этом параметры модели непрерывно перестра-

иваются в процессе поступления новых данных об изменениях объекта. По новой скорректированной модели воздействия определяются и передаются на объект управления. Несмотря на привлекательность, такие методы затруднительно применять к компенсации возмущений в РЛ с распределенными параметрами, т. к. невозможно организовать обратную связь из-за значительной протяженности участков контроля, достигающих 2,0–2,5 км.

А. А. Пыркиным, А. А. Бобцовым и С. А. Колубиным [15] описан подход, использующий способ комбинированного управления с прямыми связями по оценке управляющего воздействия, но колебание его качества компенсации при наличии ограничений на управляющее воздействие является существенным недостатком. А. Р. Гайдук [16] для решения задачи полной компенсации внешних возмущений на ошибку выходного сигнала системы предложил использовать свойство селективной инвариантности и принцип управления по выходу и возмущениям. Другие авторы [17] предложили три различных варианта компенсации возмущающего внешнего воздействия при условии наличия запаздывания по управлению. Сначала рассмотрена линейная система компенсации возмущающего внешнего воздействия на состояния объекта управления. Далее описаны синтез системы управления для систем с нелинейностью особого вида и последняя задача для двухканальной системы со связями, перекрестными по выходу. Предложенный авторами принцип обобщается на случай несогласованности входов

⁵ Ведяков А. А., Пыркин А. А., Бобцов А. А. Адаптивные системы стабилизации и слежения для объектов управления с запаздыванием : учеб. пособ. СПб. : Университет ИТМО, 2016. 129 с. URL: https://books.ifmo.ru/book/1959/adaptivnye_sistemy_stabilizacii_i_slezheniya_dlya_obektov_upravleniya_s_zapazdyvaniem_uchebnoe_posobie.htm

⁶ Никифоров В. О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. СПб. : Наука, 2003. 282 с. URL: <http://www.ipme.ru/ipme/labs/ccs/abstracts/book03r.html>

⁷ Там же.

⁸ Там же; Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб. : Наука, 2000. 549 с.

⁹ Рубан А. И. Адаптивные системы управления с идентификацией. Красноярск : СФУ, 2015. 140 с.

управления и возмущения. Однако распределенность объекта контроля и отсутствие обратной связи, а также требование известности всех параметров объекта контроля ограничивают применение оригинальных подходов при компенсации возмущений в РЛ.

Для повышения достоверности классификации состояний рельсовых линий в условиях влияния значительных возмущающих воздействий необходимо, кроме применения организационно-технических мероприятий по совершенствованию алгоритмов функционирования, синтезировать классификаторы с инвариантными свойствами, построенными по принципу многоканальности, или, что проще в реализации, с использованием концепций построения систем с координатной компенсацией возмущений. Для построения таких систем необходимо измерять сами возмущения или косвенные признаки воздействия возмущений. Перспективными направлениями повышения устойчивости работы классификаторов являются методы обработки входного и выходного сигналов с использованием принципа инвариантности, построенного на распознавании образов с методом группового учета аргументов, и обеспечение инвариантности многоканальным подходом¹⁰ [18; 19].

Однако данные принципы не нашли широкого применения при синтезе классификаторов состояний РЛ, инвариантных к возмущающим факторам в рельсовых линиях. Невозможно выполнить требования по обратной связи, по созданию дополнительных физических каналов для реализации принципа многоканальности, по исследованию характера и закона изменения внешних воздей-

ствий для программной компенсации возмущений и т. д. Поэтому привлекателен подход, предполагающий координатную компенсацию возмущений.

Материалы и методы

Вопрос об осуществлении инвариантности классификатора состояний рельсовой линии с координатной компенсацией возмущений по первой форме инвариантности, представленный П. И. Чинаевым для автоматизированных систем управления¹¹, рассмотрим при наличии возмущающего воздействия $g(t)$ на РЛ (рис. 1).

Для обеспечения инвариантности по отношению к $g(t)$ введем корректирующее звено W_{kg} , преобразующее возмущение $g(t)$ в компенсирующий сигнал Z_k .

Уравнение выходного сигнала системы $u_2(t)$ как входного информативного признака классификатора [20], выраженное оператором дифференцирования $D = d/dt$, в соответствии с рис. 1 имеет вид:

$$u_2(t) = W_{p_2}(D)W_{02}(D) \times \\ \times [W_{0g}(D) - W_{kg}(D)W_{01}(D)] \cdot g(t) + \\ + W_{p_1}(D)W_{01}(D)W_{02}(D)W_{p_2}(D)u_1(t). \quad (1)$$

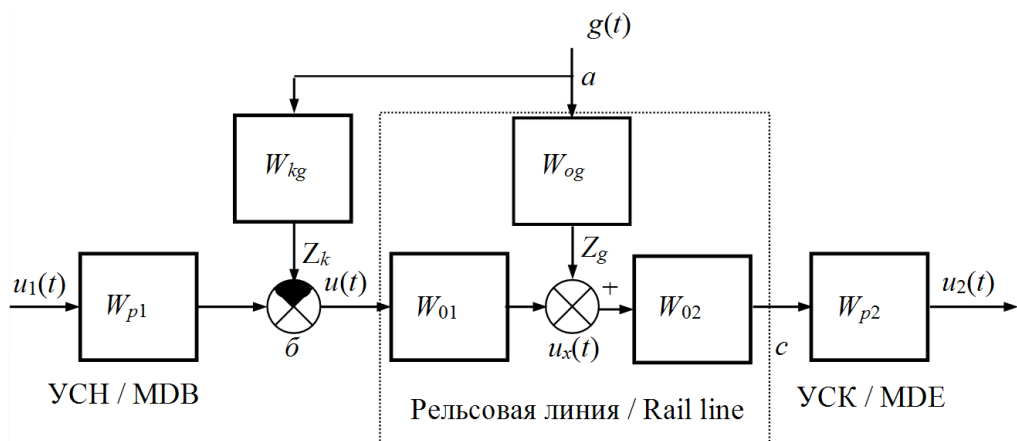
Уравнение (1) состоит из двух частей: одна составляющая описывает тракт передачи полезного информативного сигнала, другая – воздействие возмущения:

$$u_2(t) = W_g(D) \cdot g(t) + W_{u1}(D) \cdot u_1(t). \quad (2)$$

Составляющая воздействия возмущения $g(t)$ на выходной сигнал $u_2(t)$ имеет вид:

¹⁰ Могильный П. О., Синицкий О. П. Совершенствование алгоритма функционирования рельсовых цепей // Сборник докладов научно-технической конференции преподавателей, научных работников, аспирантов, студентов факультета авиационных и космических систем. Киев : ФАКС, НТУУ «КПИ», 2011. С. 119–120; EMC for European Railways / Lloyd's Register Rail Report for ERA. 2010. URL: http://99.51.244.77:823/YourFreeLibrary/EMC%20EMI%20EMP/Rail%20and%20Transportation%20EMC/Reference%20Material/EU%20Railways%20Stds%20Report%2067575_ERA_EMCS%202010.pdf

¹¹ Ивахненко А. Г., Чинаев П. И., Чумаков Н. М. Самонастраивающиеся системы : справочник / Под общ. ред. П. И. Чинаева. Киев : Наукова Думка, 1969. 528 с.



Р и с. 1. Структурная схема тракта передачи информации с корректирующим звеном: УСН – устройство согласования источника питания с началом РЛ; УСК – устройство согласования РЛ с нагрузкой в конце РЛ; W_{01} – коэффициент передачи четырехполюсника РЛ от питающего конца до координаты возмущения $g(t)$; W_{02} – коэффициент передачи четырехполюсника РЛ от координаты возмущения $g(t)$ до релейного конца; W_{kg} , W_{p1} , W_{p2} – коэффициенты передачи компаундирующего звена и элементов устройств согласования в начале и в конце РЛ

Fig. 1. The structural scheme of the information transmission path with the correcting link: MDB – matching device of a power supply with the beginning of a rail line; MDE – matching device of a rail line with a load at the end of the rail line; W_{01} – transfer coefficient of the quadripole of the rail line the feeding end to the disturbance coordinate $g(t)$; W_{02} – transfer coefficient of the quadripole of the rail line from the disturbance coordinate $g(t)$ to the end of the rail line; W_{kg} , W_{p1} , W_{p2} – transfer coefficients of the compounding link and elements of matching devices at the beginning and end of the rail line

$$W_g(D) = W_{p2}(D) \cdot W_{02}(D) \times \\ \times [W_{0g}(D) - W_{kg}(D) \cdot W_{01}(D)], \quad (3)$$

а передаточная функция информационного тракта описывается выражением:

$$W_{ul}(D) = W_{p1}(D) \cdot W_{01}(D) \times \\ \times W_{02}(D) \cdot W_{p2}(D).$$

Замена оператора дифференцирования комплексной величиной, проведенная ранее, превращает операторы $W_g(D)$ и $W_{ul}(D)$ в передаточные функции входного сигнала $u_1(t)$ и возмущения $g(t)$ соответственно¹² [21].

Для обеспечения инвариантности выходного сигнала $u_2(t)$ к возмущающему воздействию $g(t)$ необходимо обес-

печить равенство выходного сигнала выражения (2) нулю при нулевых начальных условиях:

$$u_2(t) = 0 \text{ при } x(0) = 0 \text{ и } u_2(t) = 0.$$

Это условие может выполняться при тождественном равенстве нулю передаточной функции возмущения:

$$W_{og}(D) \equiv 0. \quad (4)$$

Рассмотрим пути реализации (4), а для этого произведем в (3) замену оператора дифференцирования D на комплексную величину p и получим:

$$W_{gx}(p) = W_{p2}(p) \cdot W_{02}(p) \times \\ \times [W_{og}(p) - W_{kg}(p) \cdot W_{01}(p)],$$

¹² Тарасов Е. М. Инвариантные системы контроля состояний рельсовых линий. Самара : Изд-во СамГУПС, 2002. 134 с.

а в соответствии с (4) полученное уравнение приравняем к нулю:

$$W_{02}(p)W_{p2}(p) \times \\ \times [W_{og}(p) - W_{kg}(p)W_{01}(p)] \equiv 0. \quad (5)$$

В выражении (5) передаточные функции W_{02} и $W_{p2}(p)$ не могут быть равны нулю, т. к. они представляют собой передаточные функции рельсового четырехполосника и физического устройства согласования в конце рельсовой линии. Другими словами, если $W_{02}(p) = 0$ или $W_{p2}(p) = 0$, то передаточная функция основного сигнала превращается в нуль ($W_{u1}(p) = 0$) и, согласно уравнению (1), информативный сигнал $u_2(t)$ не отражает сигнал опроса рельсовой линии $u_1(t)$.

В таком случае $W_{02}(p) \neq 0$ и $W_{p2}(p) \uparrow 0$; уравнение (5) относительно возмущения принимает вид:

$$W_{og}(p) - W_{kg}(p) \cdot W_{01}(p) = 0. \quad (6)$$

В этом основополагающем уравнении звено $W_{kg}(p)$ является компаундирующим элементом (рис. 1) и вводится искусственно для корректировки выходного сигнала обратно пропорционально закону затухания основного сигнала из-за воздействия проводимости изоляции.

Составляющие уравнения (6) показывают, что введение компаундиру-

ющего звена преобразует схему компенсации возмущения между точкой приложения возмущения a и координатой x (рис. 1), и это позволяет констатировать, что передаточная функция элементов равна нулю:

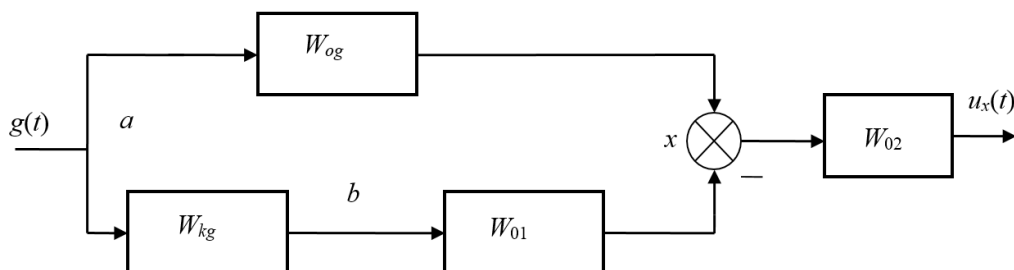
$$W_{ax}(p) = W_{og}(p) - W_{kg}(p)W_{01}(p) = 0.$$

В данном случае схема превращается в двухканальную структуру, т. к. передаточная функция $W_{ax}(p)$ равняется нулю только в том случае, если она содержит минимум два слагаемых (как следует из полученного уравнения), и для осуществления инвариантности необходимо иметь два канала воздействия возмущения на основной тракт (рис. 2)¹³.

Данный вывод согласуется с условием осуществимости инвариантности, которое гласит, что для обеспечения инвариантности системы необходимо иметь $(n + 1)$ канал передачи возмущающих воздействий на выходной сигнал.

На рис. 2 один канал передачи возмущения воздействия $g(t)$ посредством звена $W_{og}(p)$ – физический, а второй канал необходимо создать искусственно через компаундирующее звено $W_{kg}(p)$, которое мы ввели ранее в уравнение передачи возмущения.

Для реализации этого принципа мы должны иметь возможность прямого или косвенного измерения возмуща-



Р и с. 2. Структурная схема принципа двухканальности

F i g. 2. The structural scheme of the principle of two-channels

¹³ Сазонов В. В. Принцип инвариантности в преобразовательной технике. М. : Энергоатомиздат, 1990. 168 с.

ющего воздействия. При этом необходимо учесть, что быстродействие компенсационного канала должно быть равно или опережать быстродействие прямого канала передачи возмущения; иначе возмущение, опережая, окажет воздействие на основной сигнал. По результатам измерения возмущения искусственный канал формирует корректирующее воздействие Z'_k , которое компенсирует возмущение Z_g в координате x (рис. 1).

Реализация инвариантной системы с координатной компенсацией возмущений возможна при выполнении определенных условий. Должны быть обеспечены возможность прямого или косвенного измерения возмущения, техническая возможность реализации корректирующего звена и достижимость требуемой передаточной функции корректирующего звена [22].

На рис. 3 представлена функциональная схема инвариантной системы с координатной компенсацией возмущений.

В качестве измеряемой величины возмущения можно использовать косвенный признак: входное сопротивление рельсового четырехполюсника. Функцией приращения напряжения является закон регулирования, обратно пропорциональный изменению входного сопротивления в координате x .

В этом случае корректирующее звено W_{kg} преобразует возмущающее воздействие $g(t)$ (входное сопротивление) в компенсационное воздействие Z'_k .

Из уравнения (6) следует, что реализуемая передаточная функция $W_{kg}(p)$ связана со звеньями тракта передачи информации соотношением:

$$W_{kg}(p) = \frac{W_{og}(p)}{W_{01}(p)} \quad (7)$$

Уравнение (7), помноженное на значение возмущения $g(t)$, формирует компенсирующее воздействие Z'_k :

$$Z'_k(p) = \frac{W_{og}(p)}{W_{01}(p)} g(t). \quad (8)$$

Вид уравнения (8) зависит от закона изменения возмущающего воздействия и является адаптивным звеном [23], следящим за изменением характера возмущающего воздействия.

Авторами статьи предложен аналог технической реализации, подобный рассматриваемой схеме компенсации возмущений [24]. Компаундирующий сигнал Z'_k формируется за счет измерения обратного входного сопротивления рельсового четырехполюсника, и с помощью корректирующего звена W_{kg} , выходная функция которого $Z'_k = f(g)$,

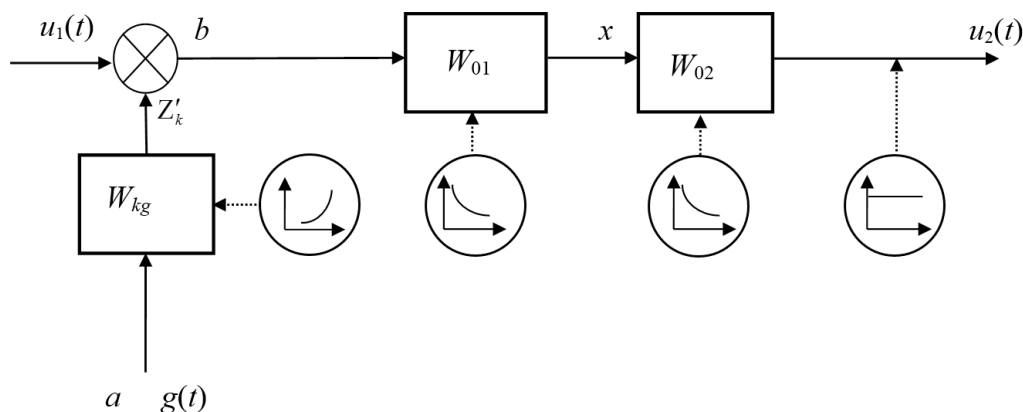


Рис. 3. Функциональная схема инвариантной системы
Fig. 3. The functional scheme of the invariant system

осуществляется вольтодобавка к сигналу опроса рельсовой линии.

На рис. 4 представлена функциональная схема классификатора с корректирующим звеном, реализующая рассмотренный принцип инвариантности.

В РЛ с распределенными параметрами измерить основной возмущающий фактор – проводимость изоляции – затруднительно, поэтому в статье реакция системы на изменение проводимости изоляции определяется посредством измерения входного сопротивления РЛ. В классе нормального режима оно зависит от проводимости изоляции; в классе шунтового режима – от проводимости изоляции РЛ и координаты нахождения полезного воздействия – сопротивления поездного шунта; в классе контрольного режима – от проводимости изоляции и величины эквивалентного сопротивления места обрыва РЛ [25]. Во всех классах состояний присутствует проводимость изоляции, поэтому с помощью измерителя входного сопротивления и преобразователя напряжения в частоту на управляющем входе источника питания формируется управляющий сигнал Z'_k , зависящий от величины проводимости изоляции. Чем выше проводимость, тем больший сигнал подается на вход РЛ для компен-

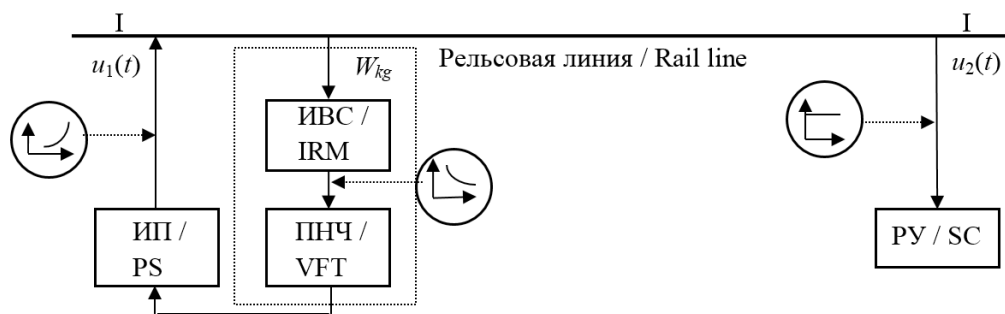
сации снижения уровня сигнала в РЛ вследствие затухания из-за проводимости изоляции. Допускается увеличение входного напряжения до некоторого критического уровня проводимости изоляции, при превышении которого происходит снижение напряжения на входе РЛ. Так обеспечивается инвариантность к возмущающим воздействиям в РЛ в классе нормального режима.

При вступлении поезда на участок контроля входное сопротивление из-за шунтирования рельсов колесами поезда становится ниже критического значения, и напряжение на входе РЛ уменьшается, что помогает фиксировать решающим устройством класс шунтового режима.

При обрыве РЛ, наоборот, происходит увеличение входного сопротивления; как и в предыдущем случае, уменьшается напряжение на входе РЛ и гарантированно фиксируется решающим устройством класс контрольного режима.

Результаты исследования

На рис. 5 приведены графики изменения напряжения $U_2 = f(g)$ при отсутствии корректирующего звена в виде совмещенных областей существования напряжений U_{2N}'' – в классах нормального и U_{2S}'' – шунтового режимов. В ка-



Р и с. 4. Функциональная схема классификатора с корректирующим звеном:
ИП – источник питания, управляемый частотой; ИВС – измеритель входного сопротивления;
ПНЧ – преобразователь напряжения в частоту; РУ – решающее устройство классификатора состояний рельсовой линии

F i g. 4. The functional scheme of the classifier with the correcting link:
PS – power supply controlled by frequency; IRM – input resistance meter;
VFT – voltage-to-frequency transducer; SC – solver of the classifier of states of a rail line

честве объекта моделирования использован классификатор, построенный по классической схеме, с частотой опроса РЛ 50 Гц и длиной РЛ 1 500 м.

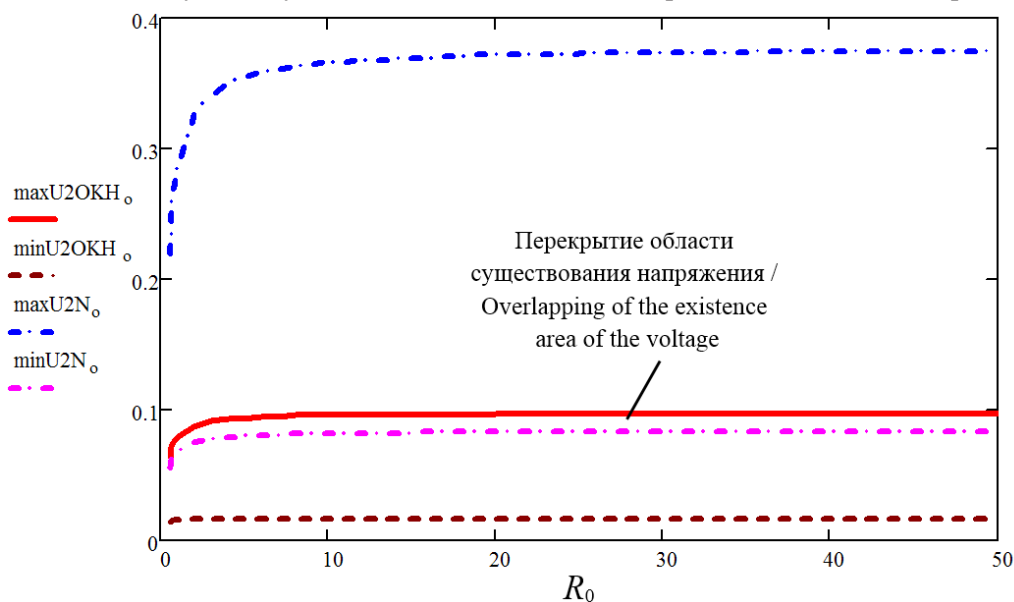
Из анализа пространства существования классов нормального и шунтового режимов при изменении сопротивления изоляции от 0,08 до 40 Ом/км следует, что области существования классов перекрываются, т. е. классификатор не может достоверно распознавать классы. Максимальное значение информативного признака – напряжения на входе классификатора в классе шунтового режима – составляет $\sup U_{2S}'' = 0,098$ В, а минимально возможное значение напряжения в классе нормального режима составляет $\inf U_{2S}'' = 0,06$ В. Как следует из графиков, напряжение на приемнике в классе нормального режима из-за воздействия возмущения уменьшается, что

приводит к нарушению распознавания класса шунтового режима.

На рис. 6 представлены результаты исследований схемы $U_2 = f(g)$ с корректирующим звеном, преобразующим воздействие возмущения $g(t)$ в компенсационный сигнал, с использованием математического программного пакета Mathcad в виде совмещенных областей существования напряжений U_{2N}'' – в классах нормального и U_{2S}'' – шунтового режимов.

В качестве объекта моделирования использован классификатор, построенный согласно блок-схеме на рис. 4 с корректирующим звеном, с основной частотой опроса рельсовых линий 50 Гц и дополнительной частотой для построения компенсационного канала 475 Гц.

Исследование результатов показывает, что пределы изменения напряже-



Р и с. 5. Графики выходных напряжений РЛ, причем $R_0 = 1/g$;
 $\max U_{2OKH_0}$ – график максимального выходного напряжения в классе шунтового режима;
 $\min U_{2OKH_0}$ – график минимального выходного напряжения в классе шунтового режима;
 $\max U_{2N_0}$ – график максимального выходного напряжения в классе нормального режима;
 $\min U_{2N_0}$ – график минимального выходного напряжения в классе нормального режима

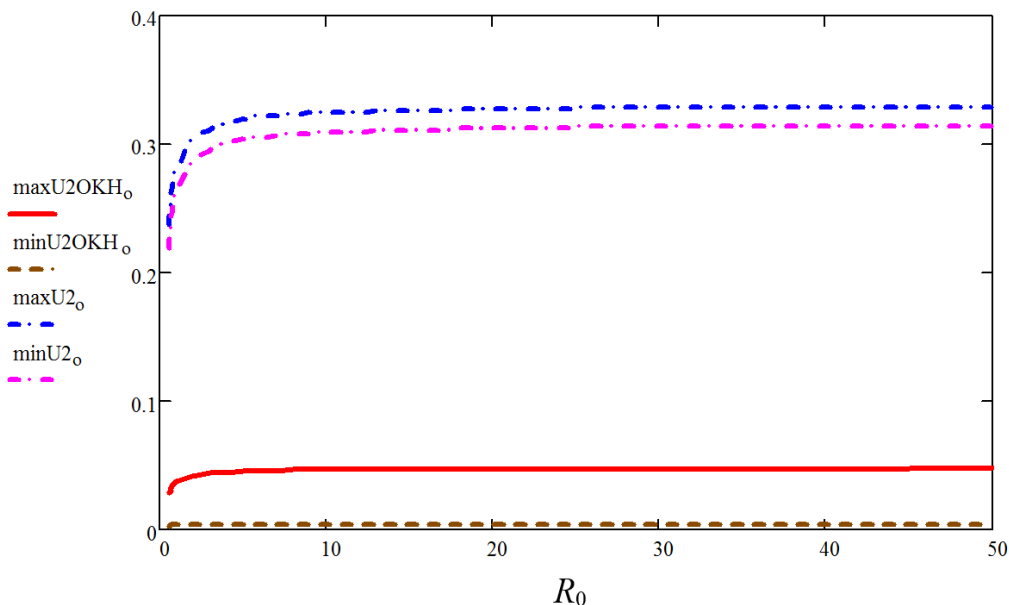
F i g. 5. The areas of existence of classes of rail lines states: $R_0 = 1/g$;
 $\max U_{2OKH_0}$ – graph of the maximum output voltage in the class of shunt mode;
 $\min U_{2OKH_0}$ – graph of the minimum output voltage in the class of shunt mode;
 $\max U_{2N_0}$ – graph of the maximum output voltage in the class of normal mode;
 $\min U_{2N_0}$ – graph of the minimum output voltage in the class of normal mode

ния U_{2N}'' в классе нормального режима составляют всего $0,36 \geq U_{2N}'' \geq 0,20$ В, при этом значение динамического диапазона выходного сигнала, представляющего собой отношение максимального значения напряжения к его минимальному значению, существенно уменьшилось и составляет $K_d = 1,499$. В шунтовом режиме из-за шунтирования рельсов колесными парами поезда ($R_{ш} \leq 0,06$ Ом) происходит уменьшение напряжения U_{2s} на входе классифицирующего устройства. Из графиков (рис. 6) следует, что в классе шунтового режима сигнал на выходе РЛ значительно уменьшается, и диапазон его изменения составляет от $U_{2s}'' \min = 0,0030$ В

до $U_{2s}'' \max = 0,05$ В, что подтверждает гипотезу о расстройке алгоритма функционирования.

Обсуждение и заключение

В существующих классификаторах без корректирующего звена, преобразующего воздействие возмущения $g(t)$ в компенсирующий сигнал, коэффициент качества, представляемый как отношение минимального значения напряжения в классе нормального режима к максимальному значению напряжения в классе шунтового режима K_s , равен 0,6, т. е. классификатор не разделяет режимы (нормированное минимальное значение K_s должно быть не менее 1,2). Таким образом, воздействие возмущающего



Р и с. 6. Области существования классов состояний рельсовых линий при координатной компенсации возмущающих воздействий: $R_o = 1/g$;

$\max U_{2OKH_0}$ – график максимального выходного напряжения в классе шунтового режима;

$\min U_{2OKH_0}$ – график минимального выходного напряжения в классе шунтового режима;

$\max U_{2N_0}$ – график максимального выходного напряжения в классе нормального режима;

$\min U_{2N_0}$ – график минимального выходного напряжения в классе нормального режима

Fig. 6. The areas of existence of classes of rail lines states under coordinate compensation of disturbing influences: $R_o = 1/g$;

$\max U_{2OKH_0}$ – graph of the maximum output voltage in the class of shunt mode;

$\min U_{2OKH_0}$ – graph of the minimum output voltage in the class of shunt mode;

$\max U_{2N_0}$ – graph of the maximum output voltage in the class of normal mode;

$\min U_{2N_0}$ – graph of the minimum output voltage in the class of normal mode

фактора – увеличения проводимости изоляции РЛ – отрицательно сказывается на функционировании систем интервального управления движением поездов.

Для уменьшения влияния возмущения на достоверность распознавания классов состояний РЛ разработан классификатор с элементами самонастройки и компенсации затухания напряжения в РЛ.

Исследование разработанного инвариантного классификатора с корректирующим звеном на входе (первая форма инвариантности) показало, что диапазон изменения выходного напряжения в классе нормального режима уменьшился в 4,54 раза, что подтверждает удачную компенсацию возмущающих воздействий.

В классе шунтового режима, при наличии поезда на участке контроля, предельные значения напряжения на выходе РЛ – входе классификатора – минимум в 10 раз меньше предельных значений в классе нормального режима. Совмещение областей существования классов нормального и шунтового режимов на одном графике наглядно доказывает инвариантные возможности классификатора: коэффициент качества K_s равен 4,585, что в 3,8 раза больше, чем необходимый минимум ($K_{s\min} = 1,2$), и в 8,5 раз лучше, чем у классического классификатора с жестким алгоритмом (рис. 5).

В результате проведенных исследований показана эффективность применения принципов координатной компенсации возмущений при создании инвариантных классификаторов состояний РЛ. В качестве основного возмущающего воздействия, подлежащего компенсации, рассмотрена изменяющаяся в широком диапазоне проводимость изоляции рельсовых линий, которая в реальных условиях изменяется в 4–5 раз больше, чем нормированные граничные значения. Результаты моделирования инвариантного классификатора состояний с применением математического пакета Mathcad и разработанным принципом достижения инвариантности показали, что при компенсации затухания сигнала на входе рельсовой линии диапазон обеспечения инвариантности увеличивается более чем в 10 раз. Если диапазон правильной классификации режимов у существующих классификаторов сохраняется при воздействии возмущения в виде изменения проводимости изоляции рельсовых линий от 0,025 до 1 См/км, то разработанный принцип инвариантности с корректирующим звеном на входе рельсовой линии позволяет расширить этот диапазон от 0,025 до 12 См/км. Это подтверждает универсальность разработанного принципа для систем, на которые воздействуют значительные возмущения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кравцов Ю. А., Антонов А. А., Бакин М. Е. Методика проверки помехоустойчивости приемников тональных рельсовых цепей // Мир транспорта. 2015. Т. 13, № 6 (61). С. 102–109. URL: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/554>
2. Ахмадуллин Ф. Р., Леушин В. Б., Юсупов Р. Р. Об одном методе определения области номинальной работы рельсовых цепей // Вестник транспорта Поволжья. 2017. № 3 (63). С. 64–68. URL: https://www.samgups.ru/science/nauchnye_izdaniya/vestnik-transporta-povolzhya/arkhiv/element.php?SECTION_CODE=vestnik_transporta_povolzhya&ELEMENT_CODE=vestnik_transporta_povolzhya_-3_2017
3. Tarasov E. M., Isaicheva A. G. Technique of measurement of ultralow resistance of current conductive junction of rail lines as the problem of states object identification // Proceedings of Proceedings of International Conference Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2015) / Eds. N. L. Kazansky

[et al.]. CEUR Workshop Proceedings. 2015. Vol. 1490. P. 397–401. DOI: <https://doi.org/10.18287/1613-0073-2015-1490-397-401>

4. **Кнеллер В. Ю., Фаянс А. М.** Методы обеспечения инвариантности процессов преобразования: выявление и систематизация // Датчики и системы. 2015. № 4 (191). С. 55–67. URL: <http://nauka-rus.com/metody-obespecheniya-invariantnosti-protsesov-preobrazovaniya-vyyavlenie-i-sistematizatsiya>

5. **Щипанов Г. В.** Теория и методы проектирования автоматических регуляторов // Автоматика и телемеханика. 1939. № 1. С. 49–66. URL: http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jmid=at&paperid=13892&option_lang=rus

6. **Лузин Н. Н., Кузнецов П. И.** К абсолютной инвариантности и инвариантности до ε в теории дифференциальных уравнений : ч. 1 // Доклады Академии наук СССР. 1946. Т. 51, № 4. С. 247–249.

7. **Лузин Н. Н., Кузнецов П. И.** К абсолютной инвариантности и инвариантности до ε в теории дифференциальных уравнений : ч. 2 // Доклады Академии наук СССР. 1946. Т. 51, № 5. С. 331–333.

8. **Кулаков Г. Т., Кухоренко А. Н., Голилко И. М.** Инвариантная система автоматического регулирования с использованием промежуточного сигнала теплоэнергетического параметра // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2015. № 1. С. 62–72. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/14921>

9. Compensation of polyharmonic disturbance of state and output of a linear plant with delay in the control channel / A. A. Pyrkin [et al.] // Automation and Remote Control. 2015. Vol. 76, issue 12. P. 2124–2142. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0005117915120036>

10. **Francis B. A., Wonham W. M.** The internal model principle for linear multivariable regulators // Applied Mathematics and Optimization. 1975. Vol. 2, issue 2. P. 170–194. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01447855>

11. **Marino R., Tomei P.** Adaptive regulator for uncertain linear minimum phase systems with unknown undermodeled exosystems // IFAC Proceedings Volumes. 2008. Vol. 41, issue 2. P. 11293–11298. DOI: <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.01913>

12. **Marino R., Tomei P.** Adaptive regulation of uncertain linear minimum phase systems with unknown exosystems // Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, 2006. P. 1099–1104. DOI: <https://doi.org/10.1109/CDC.2006.377667>

13. **Bodson M., Douglas S. C.** Adaptive algorithms for the rejection of sinusoidal disturbances with unknown frequency // Automatica. 1997. Vol. 33, issue 12. P. 2213–2221. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0005-1098\(97\)00149-0](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(97)00149-0)

14. **Bobtsov A., Pyrkin A.** A new approach to MRAC problem with disturbance rejection // IFAC Proceedings Volumes. 2007. Vol. 40, issue 13. P. 92–97. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(15\)31998-4](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(15)31998-4)

15. **Pyrkin A. A., Bobtsov A. A., Kolyubin S. A.** Output controller for nonlinear and MIMO systems with delay // 21st Mediterranean Conference on Control and Automation. IEEE, 2013. P. 1063–1068. DOI: <https://doi.org/10.1109/MED.2013.6608852>

16. **Гайдук А. Р.** Синтез селективно инвариантных систем управления // Вестник ИГЭУ. 2017. № 1. С. 46–54. DOI: <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2017.1.046-055>

17. Output adaptive controller for a class of MIMO systems with input delay and multisinusoidal disturbance / J. Wang [et al.] // IFAC-PapersOnLine. 2015. Vol. 48, issue 11. P. 892–899. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.304>

18. **Ефанов Д. В.** Некоторые аспекты развития систем функционального контроля устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Транспорт Урала. 2015. № 1 (44). С. 35–40. URL: http://www.usurt.ru/transporturala/arxiv/044_1_20_2_1.pdf

19. **Tarasov E. M., Zheleznov D. V.** Development of an intelligent system of determinating the coordinates and the speed of the train // Transport and Telecommunication. 2016. Vol. 17, no. 2. P. 138–143. DOI: <https://doi.org/10.1515/tjt-2016-0013>

20. **Тарасов Е. М., Герус В. Л., Тарасова А. Е.** Исследование информативности признаков при распознавании состояний рельсовых линий // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 2. С. 191–206. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.191-206>

21. **Леушин В. Б., Черезов Г. А., Ахмадуллин Ф. Р.** Метод исследования параметров помех в рельсовой и индуктивно-рельсовой линиях // Вестник транспорта Поволжья. 2016. № 6 (60).

С. 62–65. URL: https://www.samgups.ru/science/nauchnye_izdaniya/vestnik-transporta-povolzhya/arkhiv/element.php?SECTION_CODE=vestnik_transporta_povolzhya&ELEMENT_CODE=vestnik_transporta_povolzhya_-6_2016_

22. **Рустапов Г. А.** Построение следящих инвариантных систем на основе эквивалентного робастного управления // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. Т. 1, № 2 (73). С. 50–55. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.37177>

23. Рельсовая цепь : а. с. № 1111919 СССР : В 61 L 23/16 / Пиманов Е. П., Тарасов Е. М., Стратилатов В. В ; заявл. 24.08.1983 ; опубл. 07.09.1984, Бюл. № 33. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/111/1111919.html>

24. On ensuring invariance in problems of control of rail-line conduction / Е. М. Tarasov [et al.] // Russian Electrical Engineering. 2017. Vol. 88, issue 3. P. 105–108. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068371217030166>

25. **Kaufman H., Bar-Kana I., Sobel K.** Direct adaptive control algorithms: theory and applications. New-York : Springer-Verlag, 1994. 424 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4684-0217-9>

Поступила 25.07.2018; принята к публикации 02.10.2018; опубликована онлайн 28.06.2019

Об авторах:

Тарасов Евгений Михайлович, профессор, кафедры автоматизации, телемеханики и связи, ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения» (443066, Россия, г. Самара, ул. Свободы, д. 2В), доктор технических наук, ResearcherID: C-2505-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2717-7343>, tarasov53em@yandex.ru

Железнов Дмитрий Валерьянович, профессор, кафедры управления эксплуатационной работой, ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения» (443066, Россия, г. Самара, ул. Свободы, д. 2В), доктор технических наук, ResearcherID: G-7908-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6886-0785>, rektorat@samgups.ru

Васин Николай Николаевич, заведующий, кафедра систем связи, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (443010, Россия, г. Самара, ул. Льва Толстого, д. 23), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: H-5999-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9749-4884>, vasin@psati.ru

Тарасова Анна Евгеньевна, специалист, отдел организации целевого обучения, ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения» (443066, Россия, г. Самара, ул. Свободы, д. 2В), ResearcherID: C-2497-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6907-6036>, tarasova.ann@list.ru

Заявленный вклад соавторов:

Е. М. Тарасов – постановка задачи, разработка принципа обеспечения инвариантности, разработка теоретической части, работа с литературой; Д. В. Железнов – разработка алгоритма компенсации возмущений, анализ предметной части, разработка функциональных схем, анализ литературных источников; Н. Н. Васин – разработка структурной схемы, анализ полученных данных, консультирование по вопросам моделирования; А. Е. Тарасова – реализация алгоритма, проведение исследований с использованием математического пакета Mathcad, оформление статьи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Kravtsov Yu.A., Antonov A.A., Bakin M.E. Methods of interference immunity checking of tone track circuits receivers. *Mir transporta* = World of Transport and Transportation. 2015; 13(6):102-109. Available at: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/554>

2. Akhmadullin F.R., Leushin V.B., Iusupov R.R. On one method of defining the nominal operating area of rail circuits. *Vestnik transporta Povolzhya* = Bulletin of Transport of the Volga Region. 2017; 3:64-68. Available at: https://www.samgups.ru/science/nauchnye_izdaniya/vestnik-transporta-povolzhya/arkhiv/element.php?SECTION_CODE=vestnik_transporta_povolzhya&ELEMENT_CODE=vestnik_transporta_povolzhya_-3_2017 (In Russ.)
3. Tarasov E.M., Isaicheva A.G. Technique of measurement of ultralow resistance of current conductive junction of rail lines as the problem of states object identification. In: Kazanskiy N.L., Kudryashov D.V., Popov S.B., Sergeev V.V., Skidanov R.V., Sobolev V.A. *Proceedings of Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2015). CEUR Workshop Proceedings*. 2015; 1490:397-401. DOI: <https://doi.org/10.18287/1613-0073-2015-1490-397-401>
4. Kneller V.Yu., Fayans A.M. Methods to ensure the invariance of transformation processes: revealing and systematization. *Datchiki i sistemy* = Sensors & Systems. 2015; 4:55-67. Available at: <http://naukarus.com/metody-obespecheniya-invariantnosti-protsesov-preobrazovaniya-vyyavlenie-i-sistematizatsiya> (In Russ.)
5. Schipanov G.V. Theory and methods of designing automatic regulators. *Avtomatika i telemekhanika* = Automation and Remote Control. 1939; 1:49-66. Available at: http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wsHOW=paper&jrnid=at&paperid=13892&option_lang=rus (In Russ.)
6. Luzin N.N., Kuznetsov P.I. To absolute invariance and invariance up to ε in the theory of differential equations: Part 1. *Doklady Akademii nauk SSSR* = Proceedings of the USSR Academy of Sciences. 1946; 51(4):247-249. (In Russ.)
7. Luzin N.N., Kuznetsov P.I. To absolute invariance and invariance up to ε in the theory of differential equations: Part 2. *Doklady Akademii nauk SSSR* = Proceedings of the USSR Academy of Sciences. 1946; 51(5):331-333. (In Russ.)
8. Kulakov G.T., Kukhorenko A.N., Golinko I.M. Invariant automatic control system, using the intermediate-frequency signals of heat power parameters. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obedineniy SNG* = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations. 2015; 1:62-72. Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/14921> (In Russ.)
9. Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Nikiforov V.O., Kolyubin S.A., Vedyakov A.A., Borisov O.I., et al. Compensation of polyharmonic disturbance of state and output of a linear plant with delay in the control channel. *Automation and Remote Control*. 2015; 76(12):2124-2142. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0005117915120036>
10. Francis B.A., Wonham W.M. The internal model principle for linear multivariable regulators. *Applied Mathematics and Optimization*. 1975; 2(2):170-194. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01447855>
11. Marino R., Tomei P. Adaptive regulator for uncertain linear minimum phase systems with unknown undermodeled exosystems. *IFAC Proceedings Volumes*. 2008; 41(2):11293-11298. DOI: <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.01913>
12. Marino R., Tomei P. Adaptive regulation of uncertain linear minimum phase systems with unknown exosystems. In: *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*. IEEE; 2006. p. 1099-1104. DOI: <https://doi.org/10.1109/CDC.2006.377667>
13. Bodson M., Douglas S.C. Adaptive algorithms for the rejection of sinusoidal disturbances with unknown frequency. *Automatica*. 1997; 33(12):2213-2221. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0005-1098\(97\)00149-0](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(97)00149-0)
14. Bobtsov A., Pyrkin A. A new approach to MRAC problem with disturbance rejection. *IFAC Proceedings Volumes*. 2007; 40(13):92-97. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(15\)31998-4](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(15)31998-4)
15. Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Kolyubin S.A. Output controller for nonlinear and MIMO systems with delay. *21st Mediterranean Conference on Control Automation*. IEEE, 2013. p. 1063-1068. DOI: <https://doi.org/10.1109/MED.2013.6608852>
16. Gaiduk A.R. Design of selectively invariant control systems. *Vestnik IGEU*. 2017; 1:46-54. DOI: <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2017.1.046-055> (In Russ.)

17. Wang J., Vedyakov A.A., Vediakova A.O., Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Shavetov S.V. Output adaptive controller for a class of MIMO systems with input delay and multisinusoidal disturbance. *IFAC-PapersOnLine*. 2015; 48(11):892-899. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.304>
18. Efanov D.V. Development aspects of functional control systems of railway automation and telemechanics devices. *Transport Urala* = Transport of the Urals. 2015; 1:35-40. Available at: http://www.usurt.ru/transporturala/arxiv/044_1_20_2_1.pdf (In Russ.)
19. Tarasov E.M., Zheleznov D.V. Development of an intelligent system of determinating the coordinates and the speed of the train. *Transport and Telecommunication*. 2016; 17(2):138-143. DOI: <https://doi.org/10.1515/tjt-2016-0013>
20. Tarasov E.M., Gerus V.L., Tarasova A.E. Study of informative value of features in rail condition monitoring. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(2):191-206. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.191-206> (In Russ.)
21. Leushin V.B., Cherezov G.A., Akhmadullin F.R. Method aimed at studying interferences in rail and inductive-rail lines. *Vestnik transporta Povolzhya* = Bulletin of Transport of the Volga Region. 2016; 6:62-65. Available at: https://www.samgups.ru/science/nauchnye_izdaniya/vestnik-transporta-povolzhya/arkhiv/element.php?SECTION_CODE=vestnik_transporta_povolzhya&ELEMENT_CODE=vestnik_transporta_povolzhya_-6_2016_ (In Russ.)
22. Rustamov G.A. Design of tracking invariant systems based on the equivalent robust control. *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* = Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2015; 1(2):50-55. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.37177> (In Russ.)
23. Pimanov E.P., Tarasov E.M., Stratilatov V.V. Track circuit. USSR Certificate of Authorship 1111919. 1984 Sep 7. Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/111/1111919.html> (In Russ.)
24. Tarasov E.M., Teplyakov V.B., Gumennikov V.B., Tret'yakov G.M., Isaicheva A.G. On ensuring invariance in problems of control of rail-line conduction. *Russian Electrical Engineering*. 2017; 88(3):105-108. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068371217030166>
25. Kaufman H., Bar-Kana I., Sobel K. Direct adaptive control algorithms: theory and applications. New-York : Springer-Verlag; 1994. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4684-0217-9>

Received 25.07.2018; revised 02.10.2018; published online 28.06.2019

About authors:

Evgeniy M. Tarasov, Professor, Chair of Automation, Telemechanics and Communication, Samara State Transport University (2V Svobody St., Samara 443066, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: C-2505-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2717-7343>, tarasov53em@yandex.ru

Dmitry V. Zheleznov, Professor, Chair of Managing Operational Work, Samara State Transport University (2V Svobody St., Samara 443066, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: G-7908-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6886-0785>, rektorat@samgups.ru

Nicolay N. Vasin, Head, Chair of Communication Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (23 Lev Tolstoy St., Samara 443010, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: H-5999-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9749-4884>, vasin@psati.ru

Anna E. Tarasova, Specialist, Department of Organization of Teaching Process, Samara State Transport University (2V Svobody St., Samara 443066, Russia), ResearcherID: C-2497-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6907-6036>, tarasova.ann@list.ru

Contribution of the authors:

E. M. Tarasov – the formulation of the problem, development of the principle of providing invariance, development of the theoretical part, working with literature; D. V. Zheleznov – the development of the disturbances compensation algorithm, analysis of the subject area, development of functional schemes, analysis of literature; N. N. Vasin – the development of the structural scheme, analysis of the data obtained, consulting on simulation issues; A. E. Tarasova – the implementation of the algorithm, research using the Mathcad software tool, formalization of the article according to rules.

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



Проектирование квадрокоптера на базе интегрированной модельной среды

М. В. Чугунов*, И. Н. Полунина, М. А. Попков
ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)

**m.v.chugunov@mail.ru*

Введение. В статье представлен междисциплинарный подход к проектированию летающего робота (квадрокоптера), основанный на использовании интегрированной модельной среды. Процесс проектирования реализуется как создание моделей разного типа: натурной и виртуальной.

Материалы и методы. Под виртуальной моделью понимается совокупность математических, алгоритмических, программных и 3D-моделей, обеспечивающих ее функционирование в виртуальной среде. Проектное решение представляет собой комплект конструкторско-технологической документации, включающей в себя интегрированную модель проектируемого объекта, компоненты которой связаны друг с другом. Натурная часть интегрированной модельной среды включает в себя следующие компоненты: несущую силовую систему; корпусные детали; электромеханические и электронные системы управления, навигации, телеметрии и сенсорики. Для несущих систем и корпусных деталей используются полиамидные бionicеские конструкции, приобретенные и напечатанные на 3D-принтере; базовым элементом электронной системы является полетный контроллер ArduPilot (ArduCopter). Виртуальная среда моделирования формируется на базе CAD/CAE/CAM/PDM/PLM SolidWorks (Motion, Simulation). Основными инструментами, используемыми для создания связей между моделями разного типа и уровня, являются COM-технология, API CAD/CAE/CAM/PDM/PLM-системы, MS Visual Studio C++, позволяющие разработать единый интерфейс для управления полетом и планирования траектории как в реальной, так и в виртуальной среде.

Результаты исследования. Разработана интегрированная (натурная и виртуальная) модельная среда для квадрокоптера. На данной основе получено проектное решение в виде реального объекта и его виртуальной модели. Состояние и поведение этих объектов контролируется и управляется программным обеспечением, имеющим доступ как к реальному объекту, так и к его 3D-модели. Полученный результат можно рассматривать как инструмент инжиниринга для решения широкого спектра научно-технических и производственных задач: проведения дефектоскопии, диагностики аварийных ситуаций, 3D-сканирования удаленных и труднодоступных объектов.

Обсуждение и заключение. В статье показана эффективность подхода к проектированию как к процессу создания междисциплинарных моделей разного типа и уровня. При этом особую значимость приобретает проблема интеграции этих моделей в единое целое за счет формирования двунаправленных ассоциативных связей. Дальнейшего развития требуют технологические (программные) средства синхронизации состояния и поведения натурной и виртуальной моделей объекта проектирования.

Ключевые слова: квадрокоптер, интегрированная модельная среда, виртуальная модель, натурная модель, двунаправленная ассоциативная связь, система автоматизированного проектирования, COM-технология, API-программирование



Для цитирования: Чугунов М. В., Полунина И. Н., Попков М. А. Проектирование квадрокоптера на базе интегрированной модельной среды // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 2. С. 169–186. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.169-186>

The Quadcopter Design Based on Integrated Model Environment

M. V. Chugunov*, I. N. Polunina, M. A. Popkov

National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

**m.v.chugunov@mail.ru*

Introduction. The deals with the multi/interdisciplinary approach to designing the unmanned aerial vehicle (quadcopter) based on the use of the integrated model environment. The designing process is implemented as creating different types of models: natural (physics) and virtual.

Materials and Methods. The virtual model is understood to be a set of mathematical, algorithmic, program and 3D models maintaining its functioning in virtual environment. The design decision represents a set of the design-technology documentation including the integrated model of the designed project, whose components are connected with each other. The natural (physics) part of the integrated model environment includes the following components: a carrier system, shell details, electromechanical and electronic systems for controlling navigation, telemetry and sensory. For the carrier systems and shells there used polyamide bionic parts, which are purchased and printed on the 3D printer; the basic element of electronic system is the flight controller ArduPilot (ArduCopter). The virtual environment of modelling is formed on the basis of CAD/CAE/CAM/PDM/PLM SolidWorks (Motion, Simulation). The main tools, used for creating the communications between models of different types and levels, are the COM technology, API CAD/CAE/CAM/PDM/PLM system, MS Visual Studio C++, which allow developing the integrated interface for controlling the flight and planning the trajectory in the real and virtual environment.

Results. The integrated (natural and virtual) model environment for the quadcopter is developed. On this basis, the design decision in the form of a real object and its virtual model is made. The state and behaviour of these objects is controlled and guided by the software having access both to a real object and to its 3D model. The received result can be considered as the tool of engineering for the solution of a wide range of scientific, technical and production tasks: performing defectoscopy, diagnosing emergencies, and 3D-scanning remote and hard-to-reach objects.

Discussion and Conclusion. The research shows the efficiency of the approach to designing as to process of creating the multi/interdisciplinary models of different types and levels. At the same time, the problem of integrating these models into a coherent whole by forming bidirectional associative communications has assumed particular importance. The technological (program) means for synchronizing a state and behaviour of the natural and virtual models of design objects require further development.

Keywords: quadcopter, integrated model environment, virtual model, full-scale model, bidirectional associative relation, computer-aided engineering system, COM technology, API programming

For citation: Chugunov M.V., Polunina I.N., Popkov M.A. The Quadcopter Design Based on Integrated Model Environment. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(2):169-186. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.169-186>

Введение

Проблема разработки интегрированных модельных сред становится все более актуальной, а популярность и эффективность их использования в различных научно-технических, естественнонаучных и производственных областях стремительно возрастает.

Структуру, функционал и свойства интегрированной модели наглядно иллюстрирует разработка компании Dassault Systèmes для робота-гуманоида (рис. 1)¹.

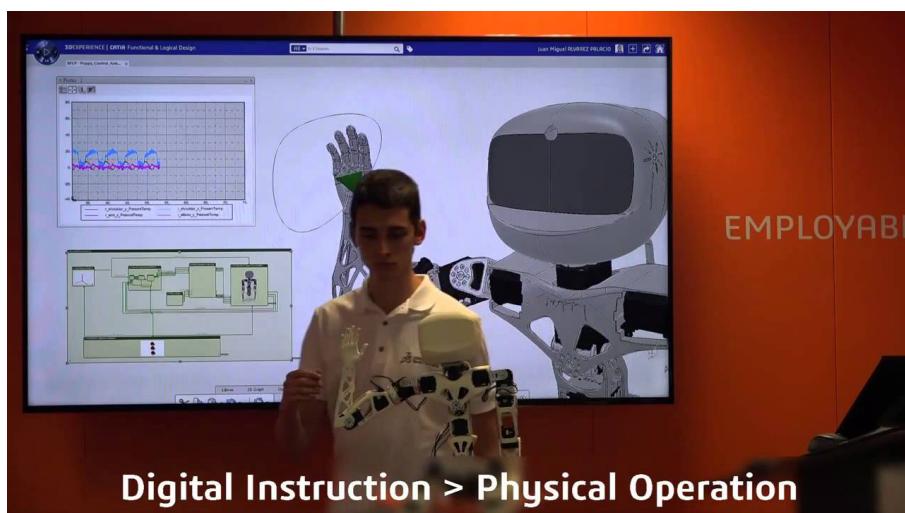
По своей структуре интегрированная модель включает в себя три части: натурную, виртуальную и систему управления обеими моделями, которая поддерживает также двусторонние ассоциативные связи между моделями разного типа. Реализованный в указанном случае функционал (рис. 1) состоит в имитации двигательных функций человека одновременно в двух средах: реальной (натурной) и виртуальной. Основными свойствами данной интег-

рированной модели являются синхронизированность и ассоциативность состояния и поведения моделей разного типа. Под ассоциативностью мы понимаем изменение (в том числе и по структуре) одной модели, обусловленное изменением состояния другой модели.

В данной статье мы рассматриваем квадрокоптер не как объект и инструмент практического применения, область которого в последнее время стремительно расширяется², а как объект исследования, моделирования и проектирования.

В целом следует указать несколько научных школ, уделяющих серьезное внимание проектированию и исследованию квадрокоптеров во всех возможных аспектах:

– лаборатория профессора Виджая Кумара³, университет Пенсильвании, США (Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, School of Engineering and Applied Science, University of Pennsylvania);



Р и с. 1. Интегрированная модель

F i g. 1. The integrated model

¹ Juan Miguel – Dassault Systèmes Trainee – 2015 – YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=ESWaCrw8rg>; Learning Virtual Universes with Poppy Humanoid – YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=mMmH2Dhh-94>

² 433056.pdf. URL: <http://preview.thenewsmarket.com/Previews/PWC/DocumentAssets/433056.pdf>

³ Vijay Kumar Lab. URL: <https://www.kumarrobotics.org>

– аэрокосмический институт университета Торонто, профессор Анжела Шуллиг⁴, Канада (University of Toronto, Institute for Aerospace Studies);

– Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (MAI Drone school⁵);

– Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана⁶.

Целью данной статьи является разработка модельной среды для проектирования квадрокоптера, которая обеспечивала бы разработку интегрированной модели, по своей структуре, функционалу и свойствам аналогичную указаным (рис. 1, [1–3]).

Важной особенностью рассматриваемого подхода является то, что проектирование и управление объектом реализуется в одной и той же CAD/CAE/CAM/PDM/PLM-системе, используемой инженером в своей повседневной деятельности. На данный момент авторам статьи не известно о решении задачи построения интегрированных моделей для квадрокоптера в такой постановке.

Обзор литературы

Интегрированные модели уже давно находятся в сфере внимания специалистов разного профиля; в частности, теоретические и практические аспекты этой проблемы концептуально рассмотрены в работе И. М. Макарова, В. З. Рахманкулова и А. А. Ахрема [1]. Что касается проектирования технических систем, то прогресс, достигнутый в области междисциплинарного моделирования, де-факто привел к новому пониманию процесса проектирования, который рассматривается как созда-

ние взаимосвязанных моделей разного типа. Данный подход дает ряд преимуществ: возможность оперативной оценки эффективности проектных решений и адекватности результатов как натурального, так и численного экспериментов, а также возможность параметризации и масштабируемости, мультиагентности, многотерминальности и т. д. [2; 3].

В данном контексте летающие роботы (квадрокоптеры) привлекают внимание исследователей разного профиля в междисциплинарной и междисциплинарной постановке. Математический аспект задачи включает в себя: аэродинамическую [4; 5], кинематическую и динамическую [5–7] модели для твердого тела с шестью степенями свободы, а также модели стабилизации и траекторного управления [Там же.]. Как правило, определяются и учитываются лишь аэродинамические параметры пропеллеров, но не корпусных и несущих систем конструкции, а уравнения динамики квадрокоптера линеаризуются за счет предположения о малости угловых координат и взаимных произведений угловых скоростей [7; 8]. В качестве алгоритмов автоматического управления используются пропорционально-дифференциальные (ПД) [6; 8] и пропорционально-дифференциально-интегральные (ПИД) регуляторы [7; 8].

В своей конструкторской части рассматриваемая задача отличается широким спектром известных решений, выполненных на базе открытых платформ. Подробный сравнительный анализ восьми широко известных платформ приведен в работе И. А. Калинова⁷.

⁴ Welcome to the Dynamic Systems Lab. Dynamic Systems Lab. Prof. Angela Schoellig. URL: <http://www.dynsyslab.org/prof-angela-schoellig>

⁵ Беспилотный комплекс Luftera LQ-4. URL: https://mai.ru/science/dev/index.php?ELEMENT_ID=80837; Комплекс мини-БЛА четырехосной вертолетной схемы. URL: https://mai.ru/science/dev/index.php?ELEMENT_ID=9955; Микробеспилотный летательный аппарат. URL: https://mai.ru/science/dev/index.php?ELEMENT_ID=9901

⁶ Научно-учебный комплекс Фундаментальные науки МГТУ им. Н. Э. Баумана – Научные лаборатории. URL: <http://www.fn.bmstu.ru/research-section-sec-fs/research-fs>

⁷ Калинов И. А. Особенности применения платформ конструирования квадрокоптеров с доступным исходным кодом для решения задач мониторинга открытых пространств при помощи построения интеллектуальных систем // Новые информационные технологии в автоматизированных системах : мат-лы XIX науч.-практ. семинара. М. : МИЭМ НИУ ВШЭ, 2016. С. 245–251.



В других статьях [9; 10] проектирование в конструкторском, технологическом и функциональном аспекте выполнено для квадрокоптера, управляемого с пульта с возможностью стабилизации полета.

Исследование систем управления квадрокоптерами, основанное на сочетании математических методов с натурным экспериментом, выполнено А. А. Гоголевым [11].

В качестве инструментов численного анализа математической модели квадрокоптера в указанных работах используются системы MathCAD, Matlab, Simulink и Universal Mechanism. CAD/CAE (в частности, SolidWorks) используется учеными [12] в качестве среды проектирования и платформы для разработки специализированного программного обеспечения с целью решения задач рассматриваемого класса.

Материалы и методы

Конструирование несущей системы и сборка аппаратной части

Проектирование несущей системы квадрокоптера осуществлялось в среде SolidWorks. За основу взята конструкция F-450 на базе APM. Было рассмотрено несколько проектных решений, которые подробно изложены авторами в другой статье [13]. На рис. 2 показано фотореалистичное изображение 3D-модели конструкции⁸.

Математическая модель и программная реализация

Положение квадрокоптера в пространстве определялось координатами x , y , z центра масс аппарата в неподвижной системе декартовых координат и тремя углами поворота вокруг главных центральных осей инерции квадрокоптера в подвижной системе ко-



Р и с. 2. Фотореалистичное изображение 3D-модели сборки
F i g. 2. The photoview image for 3D assembly

⁸ Сборка.avi – Google Диск. URL: https://drive.google.com/file/d/1EXr8hMO3_vpRoHHXdcY9tvS-CK8sVwB6/view?usp=sharing

ординат (xx , yy , zz): ψ – угол рыскания; φ – угол крена; θ – угол тангажа (рис. 3).

Уравнения динамики, описывающие движение аппарата, таковы [4–8]:

$$\begin{aligned}\ddot{z} &= -g + (\cos\theta\cos\varphi)\frac{u_1}{m}, \\ \ddot{y} &= (-\cos\psi\sin\varphi + \sin\psi\cos\varphi\sin\theta)\frac{u_1}{m}, \\ \ddot{x} &= (\sin\varphi\sin\psi + \cos\psi\cos\varphi\sin\theta)\frac{u_1}{m}, \\ \ddot{\varphi} &= \frac{u_2}{J_{xx}} - \frac{J_{zz}-J_{yy}}{J_{xx}}\dot{\theta}\dot{\psi}, \\ \ddot{\theta} &= \frac{u_3}{J_{yy}} - \frac{J_{xx}-J_{zz}}{J_{yy}}\dot{\varphi}\dot{\psi}, \\ \ddot{\psi} &= \frac{u_4}{J_{zz}}.\end{aligned}$$

Здесь \ddot{z} – линейное ускорение; $\ddot{\varphi}$, $\ddot{\theta}$, $\ddot{\psi}$ – угловые ускорения; g – ускорение свободного падения; m – масса аппарата; J_{xx} , J_{yy} , J_{zz} – главные моменты инерции аппарата; u_1 , u_2 , u_3 , u_4 – управляющие параметры: u_1 – сила, действующая вдоль оси zz аппарата; u_2 , u_3 , u_4 – моменты относительно осей xx , yy , zz . Через

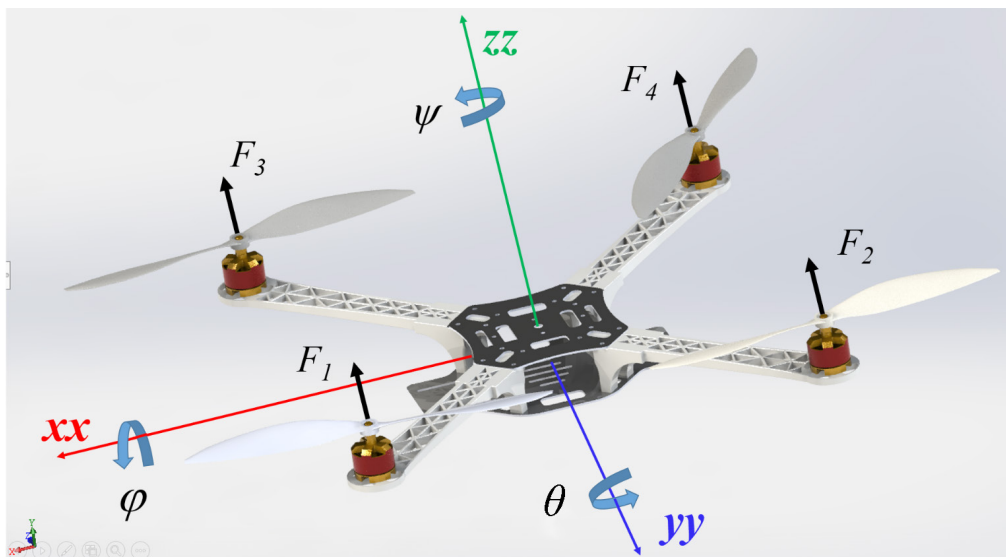
силы тяги F_1 , F_2 , F_3 , F_4 , создаваемые винтами квадрокоптера, управляющие параметры определяются следующим образом:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -l & 1 & l \\ -l & l & -l & l \\ -\lambda & \lambda & -\lambda & \lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix},$$

где l – расстояние от осей винтов до центра тяжести квадрокоптера; λ – коэффициент пропорциональности между тягами винтов и реактивными моментами вращения относительно осей моторов.

Для планирования полета чаще всего используются вариационные методы, основанные на минимизации функционала, который в общем случае записывается в следующем виде [14]:

$$L = \int_0^t (\mu_r \frac{d^{(k)}r^2}{dt} + \mu_\psi \dot{\psi}^2) dt, \quad (2)$$



Р и с. 3. Системы координат квадрокоптера
F i g. 3. The quadcopter coordinate systems

где $r(t) = (x(t) \ y(t) \ z(t))^T$; μ_r и μ_v – коэффициенты, введенные для приведения подынтегрального выражения к безразмерному виду; $k = 2, 4$ – порядки учитываемой производной.

Рассмотрим случай $L = \int_0^T (\ddot{z})^2 dt$, т. е. найдем траекторию для вертикального полета из условия минимума ускорения (minimum acceleration). На рис. 4 представлены результаты моделирования этой задачи в среде SolidWorks Motion с соответствующими граничными условиями для z и \dot{z} в начальной ($t = t_0$) и конечной ($t = T$) точках полета.

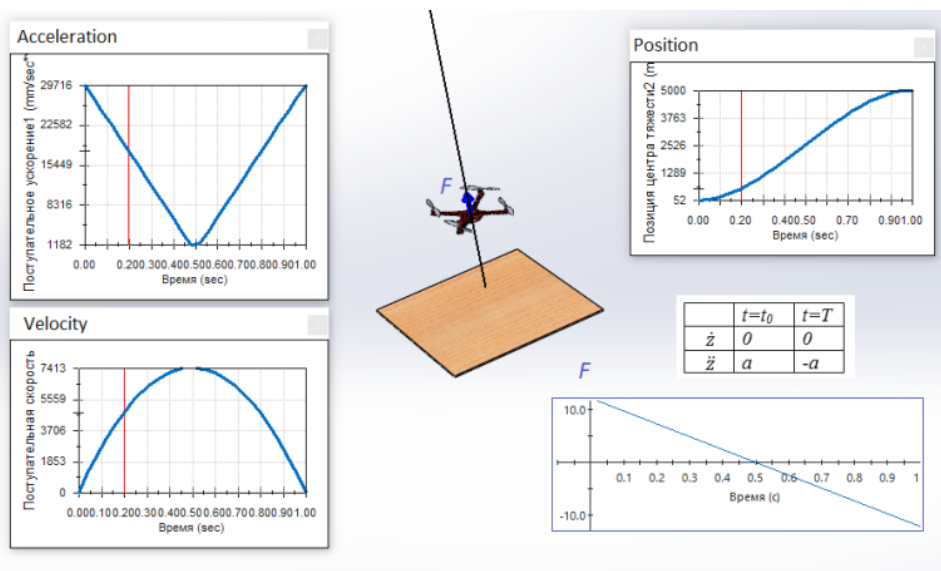
Решение следует из соответствующего уравнения Эйлера – Лагранжа в виде полинома $z(t) = -\frac{a}{3T}t^3 + \frac{a}{2}t^2$, где a – модуль ускорения в начальной и конечной точке; T – время полета. На рис. 4 показаны траектория движения,

а также графики скорости, ускорения и силы тяги (F)⁹.

Аналогичное решение получено для функционала $L = \int_0^T (\ddot{z})^2 dt$ (условие minimum jerk) в виде полинома $z(t) = 30t^5 - 75t^4 + 50t^3$. Граничные условия и результаты¹⁰ показаны на рис. 5.

В работе А. А. Кочкарова и Р. Т. Агисшева [15] приведены результаты подробного сравнительного анализа эффективности методов управления, реализованных для кривых (полиномов), полученных на основе минимизации функционала при разных значениях k , т. е. при $k = 2$ (minimum acceleration), $k = 3$ (minimum jerk), $k = 4$ (minimum snap).

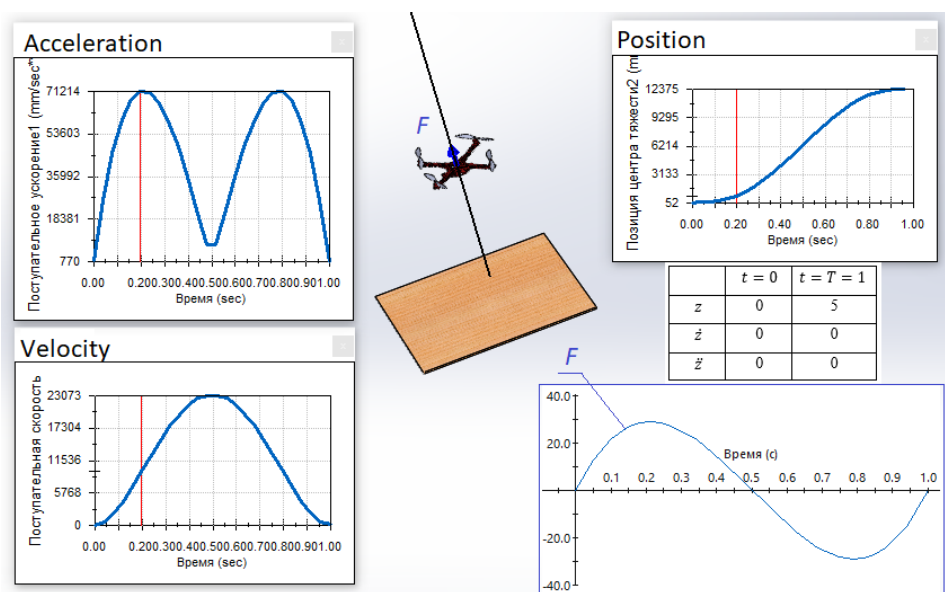
Отмечено, что кривые (сплайны) более высоких порядков гарантируют прохождение узловых точек с более высокой степенью точности, но сплайны



Р и с. 4. Результаты моделирования вертикального взлета из условия minimum acceleration
F i g. 4. The modelling results for vertical takeoff with minimum acceleration condition

⁹ Acc1_z 1c.avi – Google Диск. URL: <https://drive.google.com/file/d/1WthMumBAmIDkc2QoDk1OxKOxephi9P-n/view?usp=sharing>

¹⁰ Jerk 1c.avi – Google Диск. URL: <https://drive.google.com/file/d/1msFSlb-DgpXwTOWnI3XCyfHzj3ujfARo/view?usp=sharing>



Р и с. 5. Результаты моделирования вертикального взлета из условия minimum jerk
F i g. 5. The modelling results for vertical takeoff with minimum jerk condition

более низкого порядка дают меньшую суммарную ошибку по всей траектории.

Рассмотрим решение задачи планирования полета в общем случае из условия minimum jerk. Здесь для каждого координатного направления необходимо определить шесть констант, соответствующих заданным граничным условиям.

Для решения задачи планирования траектории удобно использовать сплайны. В среде SolidWorks в качестве сплайнов используются NURBS-кривые [16], которые в частном случае четырех узловых точек представляют собой кривые Безье.

В практическом смысле следует указать два отличия кривых Безье от NURBS:

- 1) изменение положения одной ключевой точки приводит к перестраиванию всей кривой;
- 2) кривые Безье значительно проще, чем NURBS, задаются аналитически.

Оба эти свойства определяют наш выбор для решения задачи планиро-

вания полетом в пользу кривых Безье. Аналитически кривые задаются в параметрической форме [16]:

$$\begin{aligned} x(t) &= \sum_{i=0}^N \Phi_{N_i}(t) x_i, \\ y(t) &= \sum_{i=0}^N \Phi_{N_i}(t) y_i, \\ z(t) &= \sum_{i=0}^N \Phi_{N_i}(t) z_i, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Phi_{N_i}(t) = C_N^i t^i (1-t)^{N-i}$; здесь $C_N^i = \frac{N!}{i!(N-i)!}$; $0 \leq t \leq 1$. Здесь $i = \overline{0, N-1}$; $N = n-1$; n – количество узловых точек.

Основное преимущество, которое позволяет получить использование кривых Безье, – простота формирования граничных условий для полета. Так, в случае кривой пятого порядка необходимо задать шесть ключевых точек ($n = 6$), которые определяют сплайн

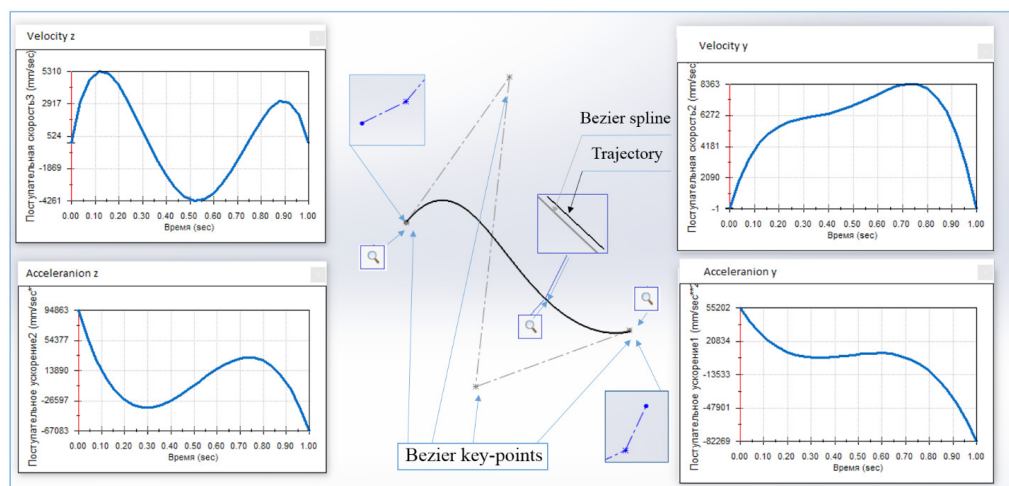
геометрически. Более того, взаимное расположение точек позволяет задать граничные условия, аналогичные задаче (рис. 5). В частности, при малом удалении второй ($i = 1$) от первой ($i = 0$), а пятой ($i = 4$) от шестой, последней по порядку точки ($i = 5$), задается малость скоростей полета в этих точках для каждого координатного направления.

На рис. 6 показаны результаты планирования траектории полета по кривой Безье с шестью ключевыми точками в вертикальной плоскости. Показаны также три области многократного зуммирования, помеченные символом «лупа»: для областей в окрестности начальной и конечной точек сплайна. Видно, что пары первой и второй, а также последней и предпоследней точек близки расположены друг к другу. Третья область показывает исходную кривую (Bezier Spline) и фактическую траекторию полета (Trajectory), построенную в результате анализа движения, выполненного в среде SolidWorks Motion; эти кривые близки друг к другу. В качестве

внешних воздействий рассматриваются управления, построенные на основе плоской системы управления [17], а функции $y(t)$ и $z(t)$ заданы уравнениями (3). На рис. 6 показана траектория движения, графики скоростей и ускорений центра тяжести аппарата в каждом из координатных направлений¹¹.

В практическом плане интерес представляет решение задачи управления и стабилизации полета по заданной траектории по принципу ПД- (ПИД)-регулирования [18]. В этом случае целью управления является асимптотическое снижение (до нуля) отклонения аппарата от заданной траектории. В работе авторов [19] приведен ряд примеров решения простейших задач данного типа в среде SolidWorks Motion.

Наиболее распространенным и популярным на сегодняшний день программным обеспечением, используемым для настройки и управления летательным аппаратом, оснащенным полетным контроллером APM, является Mission Planner (Mission Planner Ground



Р и с. 6. Результаты моделирования полета из условия minimum jerk в вертикальной плоскости

Fig. 6. The modelling results for vertical fly with minimum jerk condition in the vertical plane

¹¹ Cube.avi – Google Диск. URL: <https://drive.google.com/file/d/1FXAMI1bVXfUSohTGiwE5RR-aGAx5BkHi/view?usp=sharing>

Control Station¹²). Проект является открытым и реализован на принципах GIT (Global Information Tracker), распределенной системы контроля версий, предназначенной для коллективной разработки¹³.

Так же, как и в Mission Planner, мы будем использовать метод ПД-регулирования. Рассмотрим решение задачи в общем виде. Потребуем удовлетворения координат центра тяжести квадрокоптера следующему уравнению:

$$(\dot{r}_d(t) - \dot{r}_c(t)) + k_d e_v + k_p e_p = 0,$$

где

$$\begin{aligned} e_p &= r_d(t) - r(t), \\ \dot{e}_p &= \dot{r}_d(t) - \dot{r}(t), \\ r(t) &= (x(t)y(t)z(t)\psi(t))^T, \end{aligned} \quad (4)$$

где $r_d(t)$ – желаемый радиус-вектор для центра тяжести, дополненный углом рыскания; $r(t)$ – фактический радиус-вектор; $\ddot{r}_d(t)$ – задаваемое ускорение, вычисленное управляющим контроллером; k_d и k_p – матрицы коэффициентов ПД-регулятора.

Полный набор линеаризованных соотношений для задачи управления по траектории приобретает следующий вид [15; 18]:

$$u_1 = m(g + \dot{z}_d + k_{vz}(\dot{z}_d - \dot{z}) + k_{pz}(z_d - z)), \quad (5)$$

$$\dot{x}_c = \dot{x}_d + k_{px}(x_d - x) + k_{vx}(\dot{x}_d - \dot{x}),$$

$$\dot{y}_c = \dot{y}_d + k_{py}(y_d - y) + k_{vy}(\dot{y}_d - \dot{y}),$$

$$\varphi_c = \frac{1}{g}(\dot{x}_c \sin(\psi_d) - \dot{y}_c \sin(\psi_d)),$$

$$\theta_c = \frac{1}{g}(\dot{x}_c \cos(\psi_d) + \dot{y}_c \sin(\psi_d)),$$

$$u_2 = k_{v\varphi}(\dot{\varphi}_d - \dot{\varphi}) + k_{p\varphi}(\varphi_d - \varphi), \quad (6)$$

$$u_3 = k_{v\theta}(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + k_{p\theta}(\theta_d - \theta), \quad (7)$$

$$u_4 = k_{v\psi}(\dot{\psi}_d - \dot{\psi}) + k_{p\psi}(\psi_d - \psi). \quad (8)$$

Здесь u_1 – необходимая сила тяги; u_2 , u_3 , u_4 – необходимые моменты относительно главных осей аппарата.

Результаты исследования

Математическая модель (5–8) была реализована как для натурной, так и для 3D-модели в среде программирования MSVisual Studio C++ (2015)¹⁴ в виде приложения Windows, названного нами swMotion.

На рис. 7, а представлен пользовательский интерфейс приложения для решения задачи планирования траектории в среде, интегрированной с SolidWorks; на рис. 7, б – блок-схема алгоритма решения этой задачи:

– *COM-initialization* – инициализация COM-интерфейса;

– *Feature Cycle* – цикл по фитчерам 3D-модели полетной среды, где сплайн, задающий траекторию, имеет характерное название;

– *Get Data: spline key-points* – импорт параметров сплайна;

– *Preparing moving parameters and drawing knots* – расчет полетных режимов; графические процедуры для узлов и промежуточных точек сплайна; перевод координат из декартовых в географические¹⁵; экспорт данных в файл формата WayPoints MissionPlanner¹⁶, который загружает созданную на основе этого файла программу управления полетом, исполняемую контроллером натурной модели.

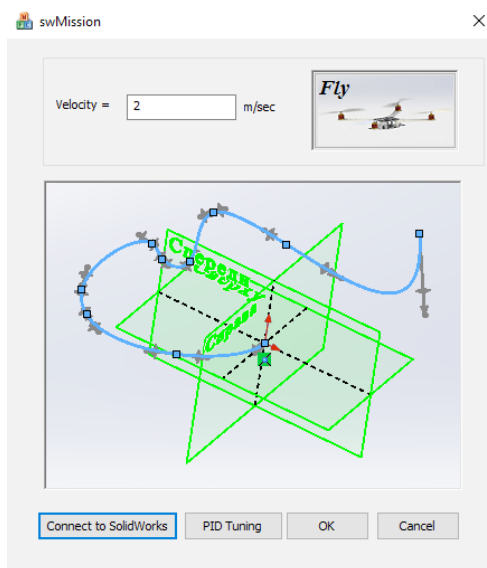
¹² Mission Planner Home – Mission Planner documentation. URL: <http://ardupilot.org/planner>

¹³ Building Mission Planner with Visual Studio – Dev documentation. URL: <http://ardupilot.org/dev/docs/buildin-mission-planner.html>

¹⁴ Download Распространяемый пакет Visual C++ для Visual Studio 2015 from Official Microsoft Download Center. URL: <https://www.microsoft.com/ru-ru/download/details.aspx?id=48145>

¹⁵ u-blox. URL: <https://www.u-blox.com/en>

¹⁶ Search – Dev documentation. URL: http://ardupilot.org/dev/search.html?q=Way+Points+&check_keywords=yes&area=default#

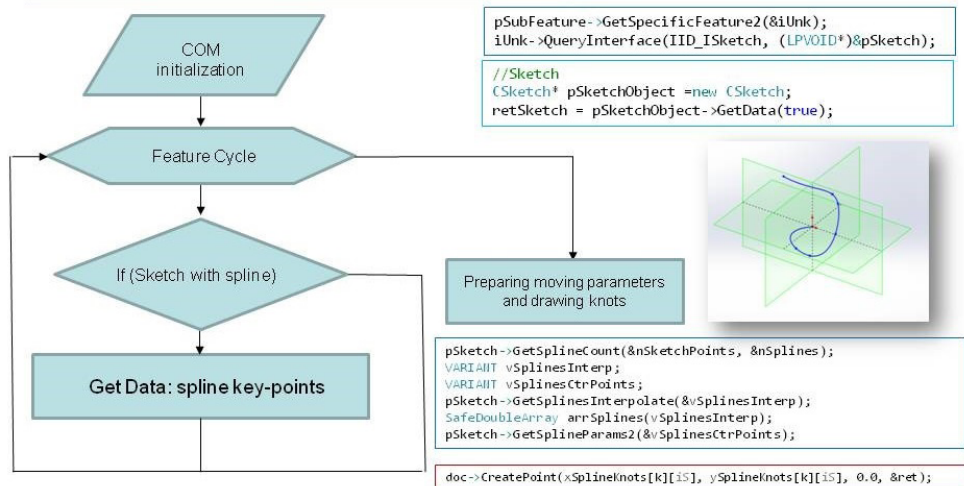


a)

```
#import "C:\Program Files\SolidWorks Corp\SolidWorks\swWorks.tlb" raw_interfaces_only, raw_native_types, no_namespace, named_guids
```

```
//Initialize COM
CoInitialize(NULL);
//Create an instance of SolidWorks
doc=NULL;
swApp.CoCreateInstance(L"SolidWorks.Application", NULL, CLSCTX_LOCAL_SERVER);
swApp->get_IActiveDoc2(&doc);
swApp->put_Visible(VARIANT_TRUE);
```

```
//Use ATL smart pointers
CComPtr<ISldWorks> swApp;
CComPtr<IModelDoc2> doc=NULL;
CComPtr<IFeature> pFeature=NULL;
CComPtr<IFeature> pSubFeature=NULL;
CComPtr<ISketchManager> pSketchMgr=NULL;
```



b)

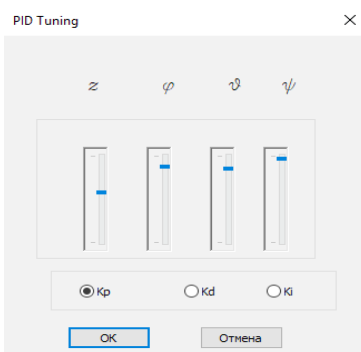
Р и с. 7. Приложение swMotion: а) интерфейс пользователя; б) блок-схема алгоритма
 Fig. 7. swMotion application: a) the user interface; b) algorithm flowchart

Диалоговая панель (рис. 8, а) предназначена для настройки коэффициентов ПИД-регулирования K_p , K_d и K_i для пропорционального, дифференциального и интегрального регулирования соответственно (коэффициенты, соответствующие положению радиокнопки K_i , в настоящее время зарезервированы, но не реализованы).

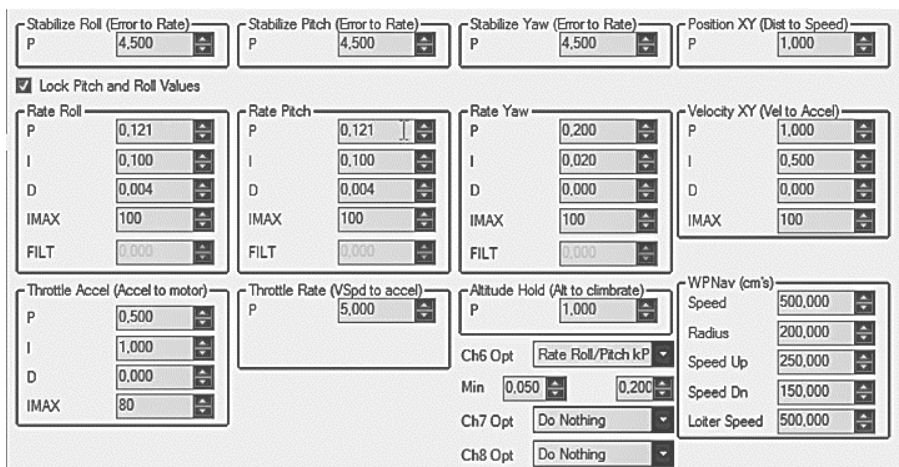
В качестве значений коэффициентов по умолчанию принимаются значения, соответствующие настройкам натурной модели (MissionPlanner; рис 8, б), а регуляторы запрограммированы на возможное изменение этих значений на 50 % вверх и вниз.

На рис. 9 показан результат решения задачи планирования и управления полетом по заданной траектории в виде сплайна Безье (показана кривая и ее управляющий многоугольник); сплошная кривая – действительная траектория¹⁷.

Среди особенностей программной реализации рассматриваемого подхода следует указать следующие. Алгоритм, реализующий математическую модель (5–8), требует многократной коррекции управлений u_1 , u_2 , u_3 и u_4 по времени, а также многократного обращения к результатам расчетов для параметров движения.



а)

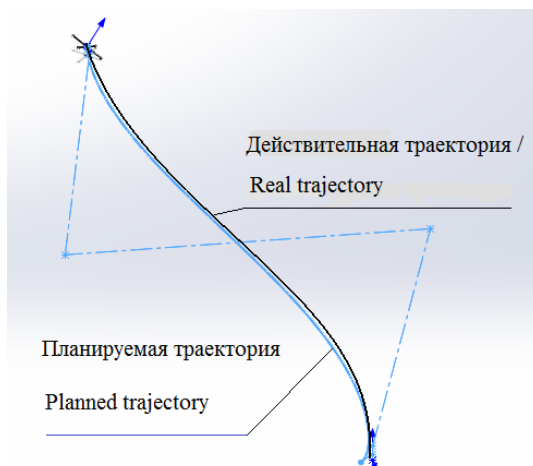


б)

Р и с. 8. Настройка ПИД для виртуальной (а) и натурной (б) модели

Fig. 8. PID tuning for virtual (a) and physical (b) model

¹⁷ copter_Result.avi – Google Диск. URL: https://drive.google.com/file/d/1zpGK89rY1jJNDX7HR6SlvSIM45K_rHu/view?usp=sharing



Р и с. 9. Результаты планирования и управления полетом
F i g. 9. The results for planning and controlling the flight

На рис. 10, а приведен фрагмент кода C++ COM для решения первой задачи на примере управления u_1 : массив `spData_u1` содержит как дискретные значения времени `Time[idx]`, так и соответствующие им значения управления `u1[idx]`. Достоинством данного подхода является то, что определенные таким образом значения управления при экспорте в SolidWorks Motion сглаживаются сплайном.

Для решения второй задачи, т. е. для импорта в приложение результатов расчетов, авторы попытались использовать инструмент SolidWorks «Датчик». Дан-

ный инструмент успешно использовался ранее в среде SolidWorks Simulation [20]. Однако выяснилось, что в API SolidWorks Motion отсутствуют адекватные средства для импорта результатов расчетов с датчиков. Задачу удалось решить с использованием функций непосредственного доступа к результатам расчетов. На рис. 10, б показан фрагмент кода для определения текущих координат центра тяжести аппарата (CM Position).

Обсуждение и заключение

На рис. 11 показаны два основных метода создания интегрированной мо-

```

pSubFeature->GetDefinition(&pDisp);
pDisp->QueryInterface(&pFeatureForceData_u1);
VARIANT spData_u1;
pFeatureForceData_u1-
>get_FunctionInterpolatedValues(&spData_u1);
SafeDoubleArray my_u1(spData_u1);
for (int idx = 0; idx < k; idx++)
{
    my_u1[idx] = Time[idx];
    my_u1[idx + k] = u1[idx];
};
pFeatureForceData_u1-
>put_FunctionInterpolatedValues(spData_u1);

```

а)

```

pMotionStudyResults->GetCMPosition(Time[k],
Comp, &pCMPosition);
pCMPosition->QueryInterface(IID_IMathVector,
(LPVOID*)&pMathVector);
double CMPosition[3];
double LengthCMPosition;
pMathVector->GetLength(&LengthCMPosition);
VARIANT ArrayDataOutCMP;
pMathVector->get_ArrayData(&ArrayDataOutCMP);
SafeDoubleArray
my_ArrayDataOutCMP(ArrayDataOutCMP);

```

б)

Р и с. 10. Программный доступ к данным SolidWorks Motion:
а) определение управления, б) импорт результатов

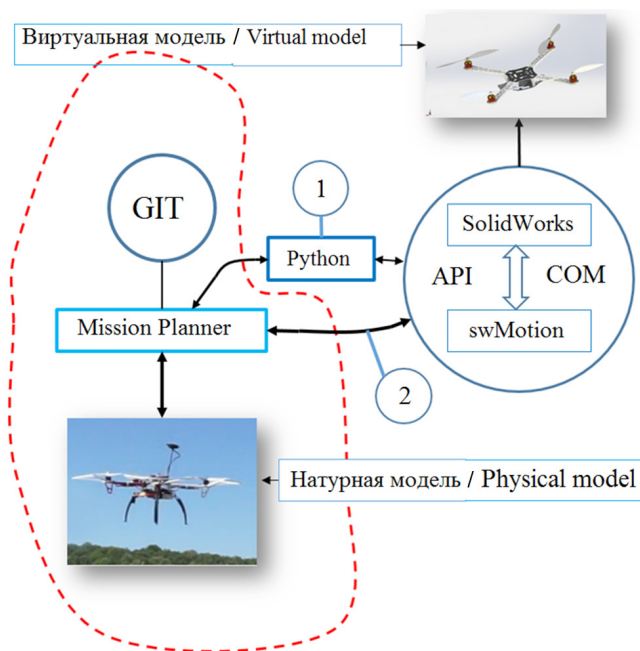
F i g. 10. Program access to SolidWorks Motion data: a) control definition, b) results import

дели¹⁸. В данной статье реализован способ, отмеченный на рисунке цифрой 1. Программное обеспечение swMotion не только планирует траекторию и реализует управление полетом в виртуальной среде, но и создает файл WayPoint в формате Mission Planner. Этот файл задает желаемую траекторию, а Mission Planner реализует управление полетом натурной модели по этой траектории (рис. 5–8).

Программа управления может быть загружена в полетный контроллер как непосредственно программой Mission Planner, так и с использованием скриптов Python¹⁹. Существенным недостатком данного подхода являются сложности создания двунаправленных ассоциатив-

ных связей между натурной и виртуальной моделями. В частности, swMotion должен получать доступ к телеметрической информации, передаваемой в MissionPlanner системой GPS натурной модели.

Проблема может быть решена на основе метода, помеченного на рис. 11 цифрой 2. В этом случае Mission Planner используется как программное обеспечение с открытым кодом GIT (Global Information Tracker, распределенной системы контроля версий), подлежит компиляции, а программные модули swMotion встраиваются в MissionPlanner. Именно такой подход авторы намерены реализовать в перспективе²⁰.



Р и с. 11. Интегрированная модель

F i g. 11. The integrated model

¹⁸ 3D-Fly.mp4 – Google Диск. URL: <https://drive.google.com/file/d/1p4WmgRDwRewiWCWU4NYax6egGQhO9OoK/view?usp=sharing>; RealFly.mp4 – Google Диск. URL: <https://drive.google.com/file/d/1mUWgTT4QbrBvPbVzLAL5exsBplvIhI0o/view?usp=sharing>

¹⁹ Using Python Scripts in Mission Planner – Mission Planner documentation. URL: <http://ardupilot.org/planner/docs/using-python-scripts-in-mission-planner.html>

²⁰ GitHub – ArduPilot/ardupilot: ArduPlane, ArduCopter, ArduRover source. URL: <https://github.com/ArduPilot/ardupilot>

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Макаров И. М., Рахманкулов В. З., Ахрем А. А. Виртуальное моделирование и интеллектуальное управление сложными компьютерно-интегрированными системами // Информационные технологии и вычислительные системы. 2007. № 2. С. 11–24. URL: http://www.jitcs.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=179
2. Развитие технологии интеллектуального управления для создания перспективных образцов ВБТ на базе новых средств комплексной автоматизации проектирования / И. М. Макаров [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3. С. 7–14. URL: <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/?p=1565>
3. Чугунов М. В., Полунина И. Н. Междисциплинарное моделирование роботов с использованием систем автоматизированного проектирования // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 2. С. 181–190. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.181-190>
4. Orsag M., Bogdan S. Influence of forward and descent flight on quadrotor dynamics // Recent Advances in Aircraft Technology / Ed. R. Agarwal. Zagreb : InTech, 2012. P. 141–156. DOI: <https://doi.org/10.5772/37438>
5. Гэн К., Чулин Н. А. Алгоритмы стабилизации для автоматического управления траекторным движением квадрокоптера // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2015. № 5. С. 218–235. URL: <http://engineering-science.ru/doc/771076.html>
6. Петров В. Ф., Барунин А. А., Терентьев А. И. Модель системы автоматического управления беспилотным летательным аппаратом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 12-2. С. 217–225. URL: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/preview_therest_ru.php?x=tsu_izv_technical_sciences_2014_12_part_2&year=2014
7. Kotarski D., Beniś Z., Krzmar M. Control design for unmanned aerial vehicles with four rotors // Interdisciplinary Description of Complex Systems. 2016. Vol. 14, no. 2. P. 236–245. URL: <https://hrcak.srce.hr/154449>
8. Белявский А. О., Томашевич С. И. Синтез адаптивной системы управления квадрокоптером методом пассивации // Управление большими системами. 2016. Вып. 63. С. 155–181. URL: http://ubs.mtas.ru/search/search_results_ubs_new.php?publication_id=21495&IBLOCK_ID=20
9. Ермаченков Д. И., Фазли Т. Г. К., Петренко Е. О. Разработка конструкции рамы квадрокоптера для удаленного мониторинга объектов // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т. 8, № 6. С. 45. DOI: <http://dx.doi.org/10.15862/45TVN616>
10. Ермаченков Д. И., Фазли Т. К. Плата управления квадрокоптера для удаленного мониторинга объектов // Инженерный вестник. 2016. № 8. С. 12–27. URL: <http://ainjournal.ru/doc/847059.html>
11. Гоголев А. А. Полунатурное моделирование беспилотных летательных аппаратов типа мультикоптер // Труды МАИ. 2017. № 92. С. 29. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=77238>
12. Shaqura M., Shamma J. S. An automated quadcopter CAD based design and modeling platform using Solidworks API and smart dynamic assembly // Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. 2017. Vol. 2. P. 122–131. DOI: <https://doi.org/10.5220/0006438601220131>
13. Попков М. А., Чугунов М. В. Проектирование и оптимизация несущей системы квадрокоптера // Молодой ученый. 2018. № 14 (200). С. 30–35. URL: <https://moluch.ru/archive/200/49131>
14. Mellinger D., Kumar V. Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2011. P. 2520–2525. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5980409>
15. Кочкаров А. А., Агишев Р. Т. Сравнительный анализ полетов квадрокоптера вдоль траекторий различной степени гладкости // Современная наука. 2016. № 3. С. 17–22. URL: http://www.sovnauka.com/ru/articles/2016-3/sravnitelnyj_analiz_poletov_kvadrokoptera_vdol_traektorij_razlichnoj_stepeni_gladkosti
16. Piegl L., Tiller W. The NURBS Book. 2nd ed. Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 1997. 646 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-59223-2>

17. Direct method based control system for an autonomous quadrotor / I. D. Cowling [et al.] // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2010. Vol. 60, issue 2. P. 285–316. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10846-010-9416-9>
18. The GRASP multiple micro-UAV testbed / N. Michael [et al.] // IEEE Robotics & Automation Magazine. 2010. Vol. 17, issue 3. P. 56–65. DOI: <https://doi.org/10.1109/MRA.2010.937855>
19. Попков М. А., Чугунов М. В. Моделирование полета квадрокоптера в среде SolidWorks Motion // Молодой ученый. 2018. № 16 (202). С. 135–138. URL: <https://moluch.ru/archive/202/49502>
20. Анализ и проектирование несущих элементов конструкций подвижного состава / М. В. Чугунов [и др.] // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. № 9. С. 216–226. URL: <http://engineering-science.ru/doc/726307.html>

Поступила 01.11.2018; принята к публикации 11.01.2019; опубликована онлайн 28.06.2019

Об авторах:

Чугунов Михаил Владимирович, заведующий, кафедра конструкторско-технологической информатики, Рузаевский институт машиностроения, ФГБОУ ВО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва» (431440, Россия, г. Рузаевка, ул. Ленина, д. 93), кандидат технических наук, доцент, ResearcherID: H-7452-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5318-5684>, m.v.chugunov@mail.ru

Полунина Ирина Николаевна, доцент, кафедра конструкторско-технологической информатики, Рузаевский институт машиностроения, ФГБОУ ВО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва» (431440, Россия, г. Рузаевка, ул. Ленина, д. 93), кандидат педагогических наук, ResearcherID: H-7473-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1093-8401>, my_pk@mail.ru

Попков Михаил Андреевич, студент, кафедра конструкторско-технологической информатики, Рузаевский институт машиностроения, ФГБОУ ВО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва» (431440, Россия, г. Рузаевка, ул. Ленина, д. 93), ResearcherID: F-5990-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7422-9076>, m.a.popkov2016@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

М. В. Чугунов – разработка методики и программного обеспечения для решения задач построения интегрированных моделей квадрокоптера; И. Н. Полунина – расчетные процедуры, компьютерное редактирование текста и графики; М. А. Попков – построение 3D моделей.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Makarov I.M., Rakhmankulov V.Z., Akhrem A.A. Virtual modeling and intellectual management of the complex computer integrated systems. *Informatsionnyye tekhnologii i vychislitelnyye sistemy* = Journal of Information Technologies and Computing Systems. 2007; 2:11-24. Available at: http://www.jitcs.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=179 (In Russ.)
2. Makarov I.M., Lokhin V.M., Manko S.V., Romanov M.P., Aleksandrova R.I. Development of intelligent control technology for creation of autonomous objects on the basis of complex automation design. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki* = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. 2013; 3:7-14. Available at: <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/?p=1565> (In Russ.)
3. Chugunov M.V., Polunina I.N. Interdisciplinary modelling of robots using CAD/CAE technology. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(2):181-190. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.181-190> (In Russ.)

4. Orsag M., Bogdan S. Influence of forward and descent flight on quadrotor dynamics. In: Agarwal R. (ed.) *Recent Advances in Aircraft Technology*. Zagreb: InTech, 2012. p. 141-156. DOI: <https://doi.org/10.5772/37438>
5. Gen K., Chulin N.A. Stabilization algorithms for automatic control of the trajectory movement of quadcopter. *Nauka i obrazovaniye. MGTU im. N. E. Baumana* = Science and Education of the Bauman MSTU. 2015; 5:218-235. Available at: <http://engineering-science.ru/doc/771076.html> (In Russ.)
6. Petrov V.F., Barunin A.A., Terentiev A.I. Model of the automatic control system unmanned aerial vehicle. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* = News of the Tula State University. Technical Sciences. 2014; 12(2):217-225. Available at: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/preview_therest_ru.php?x=tsu_izv_technical_sciences_2014_12_part_2&year=2014 (In Russ.)
7. Kotarski D., Benić Z., Krznar M. Control design for unmanned aerial vehicles with four rotors. *Interdisciplinary Description of Complex Systems : INDECS*. 2016; 14(2):236-245. Available at: <https://hrcak.srce.hr/154449> (In Russ.)
8. Belyavsky A.O., Tomashevich S.I. Passivity-based method for quadrotor control. *Upravljeniye bolshimi sistemami* = Large-Scale Systems Control. 2016; 63:155-181. Available at: http://ubs.mtas.ru/search/search_results_ubs_new.php?publication_id=21495&IBLOCK_ID=20 (In Russ.)
9. Ermachenkov D.I., Fazly T.G.K., Petrenko E.O. Quadrotor frame design for remote object monitoring. *Naukovedeniye* = Science Studies. 2016; 8(6):45. DOI: <http://dx.doi.org/10.15862/45TVN616> (In Russ.)
10. Ermachenkov D.I., Fazly T.K. Chip for management of quadcopter for remote monitoring of objects. *Inzhenernyy vestnik* = Engineering Bulletin. 2016; 8:12-27. Available at: <http://ainjournal.ru/doc/847059.html> (In Russ.)
11. Gogolev A.A. Semi-natural modelling of unmanned aerial vehicles like multicopter. *Trudy MAI* = Works of MAI. 2017; 92:29. Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=77238> (In Russ.)
12. Shaqura M., Shamma J.S. An automated quadcopter CAD based design and modeling platform using solidworks API and smart dynamic assembly. *Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*. 2017; 2:122-131. DOI: <https://doi.org/10.5220/0006438601220131>
13. Popkov M.A., Chugunov V.V. Design and optimization of frame system of quadcopter. *Molodoy uchenyy* = Young Scientist. 2018; 14:30-35. Available at: <http://moluch.ru/archive/200/49131> (In Russ.)
14. Mellinger D., Kumar V. Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors. In: *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2011. p. 2520-2525. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5980409>
15. Kochkarov A.A., Agishev R.T. Comparative analysis of the flights of a quadrotor along trajectories of various degrees of smoothness. *Modern Science*. 2016; 3:17-22. Available at: http://www.sovnauka.com/ru/articles/2016-3/sravnitelnyj_analiz_poletov_kvadroptera_vdol_traektorij_razlichnoj_stepeni_gladkosti (In Russ.)
16. Piegel L., Tiller W. The NURBS Book. 2nd ed. Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-59223-2>
17. Cowling I.D., Yakimenko O.A., Whidborne J.F., Cooke A.K. Direct method based control system for an autonomous quadrotor. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2010; 60(2):285-316. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10846-010-9416-9>
18. Michael N., Mellinger D., Lindsey Q., Kumar V. The GRASP multiple micro-UAV testbed. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2010; 17(3):56-65. DOI: <https://doi.org/10.1109/MRA.2010.937855>
19. Popkov M.A., Chugunov M.V. Modeling of flight of quadcopter in Solidworks Motion software. *Molodoy uchenyy* = Young Scientist. 2018; 16:135-138. Available at: <http://moluch.ru/archive/202/49502> (In Russ.)
20. Chugunov M.V., Osyka V.V., Kudaev S.P., Kuzmichyov N.D., Klyomin V.N. Analysis and design of rolling stock elements. *Nauka i obrazovaniye. MGTU im. N. E. Baumana* = Science & Education of the Bauman MSTU. 2014; 9:216-226. Available at: <http://engineering-science.ru/doc/726307.html> (In Russ.)

Received 01.11.2018; revised 11.01.2019; published online 28.06.2019

About authors:

Mikhail V. Chugunov, Head, Chair of Design and Technology Informatics, Ruzaevka Institute of Mechanical Engineering, National Research Mordovia State University (93 Lenina St., Ruzaevka 431440, Russia), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, ResearcherID: H-7452-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5318-5684>, m.v.chugunov@mail.ru

Irina N. Polunina, Associate Professor, Chair of Design and Technology Informatics, Ruzaevka Institute of Mechanical Engineering, National Research Mordovia State University (93 Lenina St., Ruzaevka 431440, Russia), Ph.D. (Pedagogy), ResearcherID: H-7473-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1093-8401>, my_pk@mail.ru

Mikhail A. Popkov, Student, Chair of Design and Technology Informatics, Ruzaevka Institute of Mechanical Engineering, National Research Mordovia State University (93 Lenina St., Ruzaevka 431440, Russia), ResearcherID: F-5990-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7422-9076>, m.a.popkov2016@mail.ru

Contribution of the authors:

M. V. Chugunov – the development of the technique and software for integrated quadcopter systems building; I. N. Polunina – the computer analysis of procedures, computer edition of the text and graphics; M. A. Popkov – 3D-model design.

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



Метод умножения с масштабированием результата для высокоточных модулярно-позиционных интервально-логарифмических вычислений

А. С. Коржавина^{1*}, В. С. Князьков^{1, 2}

¹ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»

(г. Киров, Россия)

²ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

(г. Пенза, Россия)

*as_korzhavina@vyatsu.ru

Введение. Для решения задач моделирования, критичных к ошибкам округления (включая задачи вычислительной математики, математической физики, оптимального управления, биохимии, квантовой механики, математического программирования и криптографии), требуется точность от 100 до 1 000 десятичных цифр и более. Главным недостатком программных библиотек высокоточных вычислений является неприемлемое для практических задач снижение быстродействия, в особенности при выполнении операции умножения. Одним из способов повышения скорости вычислений над длинными числами является использование системы счисления в остаточных классах. В данной статье рассматривается новый, более быстрый по сравнению с аналогами метод выполнения операции умножения длинных чисел с масштабированием результата за счет применения оригинальной гибридной модулярно-позиционной интервально-логарифмической формы представления чисел с плавающей точкой.

Материалы и методы. Для повышения скорости вычислений разработан новый способ организации числовой информации (модулярно-позиционная интервально-логарифмическая форма), в котором мантисса представлена в системе остаточных классов, а информация об абсолютной величине числа (характеристика) – в интервально-логарифмической системе счисления, что позволяет ускорить выполнение операций сравнения и масштабирования. Для сравнения модулярных чисел применяются положения интервального анализа; для масштабирования модулярных чисел – свойства логарифмической системы счисления, а также приближенные интервальные вычисления с использованием китайской теоремы об остатках.

Результаты исследования. Разработан и запатентован новый быстрый метод умножения модулярных чисел с плавающей точкой, проведена оценка быстродействия разработанного метода, выполнено сравнение данного метода с классическими и конвейерными методами умножения длинных чисел.

Обсуждение и заключение. Разработанный метод в 2,4–4,0 раза быстрее конвейерного метода умножения и в 6,4–12,9 раз – классических методов умножения.

Ключевые слова: система остаточных классов, высокоточное вычисление, умножение чисел, масштабирование, интервальная арифметика, сравнение чисел, логарифмическая система счисления

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00278.

© Коржавина А. С., Князьков В. С., 2019



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

Для цитирования: Коржавина А. С., Князьков В. С. Метод умножения с масштабированием результата для высокоточных модулярно-позиционных интервально-логарифмических вычислений // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 2. С. 187–204. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.187-204>

The Multiplication Method with Scaling the Result for High-Precision Residue Positional Interval Logarithmic Computations

A. S. Korzhavina^{1*}, V. S. Knyazkov^{1, 2}

¹*Vyatka State University (Kirov, Russia)*

²*Penza State University (Penza, Russia)*

**as_korzhavina@vyatsu.ru*

Introduction. The solution of the simulation problems critical to rounding errors, including the problems of computational mathematics, mathematical physics, optimal control, biochemistry, quantum mechanics, mathematical programming and cryptography, requires the accuracy from 100 to 1 000 decimal digits and more. The main lack of high-precision software libraries is a significant decrease of the speed-in-action, unacceptable for practical problems, in particular, when performing multiplication. A way to increase computation performance over very long numbers is using the residue number system. In this work, we discuss a new fast multiplication method with scaling the result using original hybrid residue positional interval logarithmic floating-point number representation.

Materials and Methods. The new way of the organizing numerical information is a residue positional interval logarithmic number representation in which the mantissa is presented in the residue number system, and information on an absolute value (the characteristic) in the interval logarithmic number system that makes it possible to accelerate performance of comparison and scaling is developed to increase the speed of calculations; to compare modular numbers, the provisions of interval analysis are used; to scale modular numbers, the properties of the logarithmic number system and approximate interval calculations using the Chinese reminder theorem are used.

Results. A new fast multiplication method of floating-point residue-represented numbers is developed and patented; the authors evaluated the developed method speed-in action, compared the developed method with classical and pipelined multiplication methods of long numbers.

Discussion and Conclusion. The developed method is 2.4–4.0 times faster than the pipelined multiplication method, and is 6.4–12.9 times faster than classical multiplication methods.

Keywords: residue number system, high-precision computations, multiplication, scaling, interval arithmetic, comparison, logarithmic number system

Funding: The study was funded by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 18-37-00278).

For citation: Korzhavina A.S., Knyazkov V.S. The Multiplication Method with Scaling the Result for High-Precision Residue Positional Interval Logarithmic Computations. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(2):187-204. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.187-204>

Введение

Рост вычислительных мощностей современных компьютеров делает возможным решение прикладных задач сверхбольшой размерности с огромным количеством вычислительных

операций. Неконтролируемые ошибки округления, методологически присущие стандарту вещественных чисел IEEE 754, не позволяют решить проблему точности, достоверности и воспроизводимости вычислений при решении

задач данного класса [1–5]. В частности, для решения в современных постановках задач в области экспериментальной вычислительной математики [1; 2], математической физики [4], биохимии [3], астрофизики и получения достоверных результатов требуются операции с числами длиной от 100 до 1 000 десятичных цифр (с использованием специально разработанных программных библиотек высокоточных вычислений). В связи с этим актуальными направлениями исследований являются теория и способы практической реализации вычислительной математики многократной точности (высокоточная, или длинная, арифметика), оперирующей с числами произвольной длины в сверхбольших числовых диапазонах.

Для решения задач в сверхбольших числовых диапазонах в настоящее время применяются такие специализированные программные пакеты высокоточных вычислений, как ARPREC, MPFUN90, DDFUN, FMLIB, FMZM90, QD, GMP, MPFR++, NTL, PARI/GP, CLN, HPALib, Predicates, GARPREC, GQD, MatLab, Matematica, Maple [6]. Перечисленные программные решения базируются на специально разработанных многоразрядных форматах (128-, 256-, 512-битная (и более) арифметика) в базисах классических позиционных систем счисления и правил вычислений стандарта IEEE 754. Эти решения, благодаря наличию высокоуровневых программных интерфейсов и широкого спектра реализованных библиотек математических функций, являются наиболее популярными.

Недостатком современных пакетов высокоточных вычислений является резкое снижение скорости вычислений при обработке длинных многоразрядных операндов. При выходе длины операндов за диапазон представления данных в стандарте IEEE 754 скорость вычислений снижается в десятки и тысячи раз [2; 7] из-за необходимости алгоритмической обработки цепочек межзна-

ковых переносов длинных операндов. В итоге время решения задачи становится неприемлемым для практической деятельности.

В связи с этим активно проводятся исследовательские и опытно-конструкторские работы по модернизации известных методов, созданию новых программно-эмулируемых и программно-аппаратных реализаций методов численной обработки информации для высокоточных и достоверных расчетов в сверхбольших числовых диапазонах.

Можно выделить два направления работ, направленных на повышение скорости вычислений при выполнении расчетов в сверхбольших числовых диапазонах. Первое направление ориентировано на модернизацию и создание новых технологий гибридных вычислений и обработки данных: численная и нечисленная обработка данных реализуется в гибридных системах кодирования с использованием «гибридных» наборов операций (сигнатур) и правил их выполнения. Математические методы и их алгоритмические решения для гибридных технологий вычислений ориентируются на программную реализацию на вычислительных платформах универсального назначения и, как правило, опираются на правила выполнения операций стандарта IEEE 754. Примером успешного использования этого подхода является библиотека высокоточной модулярно-позиционной арифметики [8], где использованы системы счисления в остаточных классах (СОК), вычисления в интервальной арифметике и позиционная система счисления стандарта IEEE 754.

Вторым направлением работ для повышения скорости вычислений в сверхвысоких числовых диапазонах является разработка специализированных средств аппаратной поддержки операций над сверхбольшими операндами, разрядность которых многократно превышает разрядную сетку современных промышленных процессоров. Попу-

лярной технологической базой для создания таких спецпроцессоров «длинной» арифметики являются программируемые логические интегральные схемы (FPGA) и системы на кристалле [9–14]. Применение таких спецпроцессоров позволяет сократить время расчетов по сравнению с программными решениями в несколько десятков раз, но недостатки, присущие позиционной длинной арифметике, сохраняются [13]. Эти методологические недостатки позиционной арифметики приводят к необходимости построения на аппаратном уровне исполнительных устройств высокой сложности, что в конечном итоге делает невозможным создание применимых технических решений. Данная проблема частично решается введением специализированных вычислительных конвейеров; однако, как показано в работе китайских ученых [12], подобный подход также ведет к резкому увеличению аппаратных затрат, поэтому на практике число ступеней сокращается до четырех сегментов.

В связи с этим при создании средств аппаратной поддержки длинной арифметики актуален подход, ориентированный на создание вычислительных платформ, поддерживающих на аппаратном уровне технологии гибридных вычислений, что позволяет сократить аппаратные затраты по сравнению с позиционной системой счисления. Серьезный вклад в развитие этого направления внесли И. Я. Акушский, Д. И. Юдицкий, В. М. Амербаев и целый ряд не менее значимых специалистов. Наиболее широко в системах гибридных вычислений используются системы счисления в остаточных классах [8; 15; 16] и логарифмические системы счисления [17–19]. Например, системы остаточных классов успешно используются для решения задач криптографии [20; 21] и цифровой обработки сигналов [22–24].

Основным недостатком систем счисления в остаточных классах является алгоритмическая сложность выполне-

ния немодульных операций, таких как сравнение, деление, распознавание переполнения числового диапазона, масштабирование чисел, определение знака результата выполнения операции. При вычислениях в сверхбольших числовых диапазонах выполнение перечисленных операций приводит либо к сопоставимым с их программной реализацией временным затратам, либо к практически неприемлемым аппаратным затратам. Аналогичная ситуация происходит и при использовании логарифмических систем счисления, в которых для выполнения операции алгебраического сложения с высокой точностью требуется выполнить переход в позиционную систему счисления и наоборот. Соответственно, резко увеличивается время вычислений и растут аппаратные затраты на реализацию высокоскоростных преобразователей.

В данной статье рассматривается новый, более быстрый по сравнению с аналогами метод выполнения операции умножения длинных чисел с масштабированием результата за счет применения оригинальной гибридной модулярно-позиционной интервально-логарифмической формы представления чисел с плавающей точкой. Ряд результатов по модулярно-позиционному интервально-логарифмическим вычислениям опубликован авторами ранее [25].

Обзор литературы

Основной проблемой высокоточных расчетов в сверхбольших числовых диапазонах с применением вычислительных операций по правилам стандарта IEEE 754 является выполнение контроля ошибок округления, контроля переполнения диапазона и масштабирования чисел при выполнении аддитивных и мультипликативных операций. Особенно это касается длительных итерационных и автоматных вычислений с накоплением при обработке массивов данных большого объема. Накопление ошибок при некорректно организованном контроле приводит к получению недостоверных результатов. Для обес-

печения требуемой точности, достоверности и воспроизводимости расчетов в настоящее время применяются вычисления с использованием длинной позиционной арифметики, реализованной в современных специализированных библиотеках высокоточных вычислений. Основным недостатком современных библиотек длинной арифметики является неприемлемое для практики увеличение времени решения прикладных задач [4; 6]. Так, в работе китайских и итальянских ученых [7] для задач оптимального управления время вычислений возрастает с 5 с при использовании стандартного типа данных двойной точности до 980 с при использовании точности в 128 бит и до 35 ч – при использовании точности в 400 бит. Аналогичные результаты представлены в работе А. Вороса [2], где время вычисления возрастает с 4 минут до 22,5 дней. В задачах криптографии проблема ускорения арифметических операций над длинными целыми числами является не менее острой, чем в задачах моделирования [13].

Задача повышения скорости вычислений при выполнении расчетов в сверхбольших числовых диапазонах частично решается за счет применения специализированных процессоров-ускорителей для поддержки вычислений с использованием длинной арифметики. Например, японские ученые [9] представили семейство процессоров на базе FPGA, реализующих длинную арифметику типа «double-double» и «quad-double». Скорость решения задачи вычисления интегралов Фейнмана [10] с использованием данных процессоров приблизительно в 80–200 раз выше, чем скорость расчета с применением программных реализаций таких вычислений. Американскими учеными [11] приведены результаты реализации на FPGA целочисленных вычислений на длинных (разрядность – 64 000 бит) операндах в сравнении с вычислениями с применением библиотеки GMP: расчеты

ускорились минимум в 5 раз при операциях сложения/вычитания и в 9 раз – при операции умножения.

Для ускорения выполнения операции умножения длинных чисел (1 024–2 048 бит) китайскими учеными [12] представлен конвейерный метод на базе 64-разрядных умножителей с глубиной конвейера до четырех ступеней (увеличение числа ступеней приводит к неоправданному росту аппаратных затрат). Как показывает анализ исследований, в области аппаратных решений умножителей в основном применяются базовые алгоритмы умножения квадратичной сложности в позиционной системе счисления [13; 14], поскольку аппаратная реализация асимптотически быстрых алгоритмов затруднена [26].

Для ускорения выполнения арифметических операций (кроме операции деления) над длинными целыми числами наиболее эффективными с точки зрения аппаратных затрат являются модулярные системы счисления. Например, исследователями [23] представлено устройство эллиптической криптографии, ускоряющее выполнение операции умножения Монтгомери с использованием 40 модулярных 15-битовых каналов. В работе австралийских ученых [16] модулярный вычислитель имеет 108 модулярных каналов с разрядной сеткой в 19 бит каждый, что позволяет работать в диапазоне чисел до 2 048 бит. Другими авторами [20] представлены модулярные устройства, позволяющие работать в диапазоне 1 024–4 096 бит.

Существенным недостатком СОК является сложность выполнения немодульных операций, таких как масштабирование, сравнение и определение переполнения диапазона представления чисел. При переполнении диапазона следует либо останавливать вычисления (так как будет получен некорректный результат), либо расширять диапазон представления чисел, либо выполнять масштабирование чисел (если это возможно).

Алгоритмы масштабирования в СОК представлены в достаточно большом количестве исследований. Разработанные методы масштабирования либо предназначены для специальных наборов модулей [27; 28], либо для масштабирования используются специальные подстановочные таблицы [22; 29; 30]. Последний подход практически неприемлем для масштабирования модулярных чисел при использовании произвольных наборов модулей большой разрядности из-за огромного (до Тбайта) объема подстановочных таблиц.

Основной сложностью при выполнении масштабирования является операция расширения базиса. Методы расширения базиса были исследованы авторами статьи ранее [25]. В результате исследований было установлено, что наиболее быстрые методы расширения базиса выполняются с использованием приближенной китайской теоремы об остатках – вычисления так называемой позиционной характеристики модулярного числа. Учеными [8] представлена интервальная позиционная характеристика (ИПХ) числа, в которой используются преимущества интервальной арифметики [31; 32]. Использование ИПХ позволяет учитывать в явном виде ошибки округления, а также определять достоверность вычисления данной величины. Главным недостатком ИПХ является необходимость использования операций с плавающей точкой с направленным округлением, в то время как все остальные операции в СОК выполняются над целыми числами малой разрядности.

Использование логарифмической системы счисления (ЛСС) позволяет упростить выполнение операций умножения и деления, включая масштабирование [17; 33]. ЛСС превосходят по скорости и энергоэффективности арифметику с плавающей точкой на низкой разрядности операндов: до 16 бит – на любом наборе арифметических операций [18], до 32 бит – с преобладанием

операций умножения и деления [19]. Дальнейшее увеличение разрядности ЛСС приводит к экспоненциальному росту сложности выполнения операций сложения и вычитания, поэтому при больших разрядностях ЛСС значительно уступает позиционной арифметике и используется только в приложениях, не требующих высокой точности [19].

В данной статье предлагается объединить преимущества СОК, ЛСС и интервальных вычислений: для высокоточных вычислений в сверхбольших числовых диапазонах рекомендуется модулярно-позиционная интервально-логарифмическая форма представления чисел и апробация эффективности таких гибридных вычислений на примере выполнения операции умножения с масштабированием.

Материалы и методы

В статье предлагается новый способ представления целых и вещественных чисел для выполнения высокоточных и достоверных вычислений в сверхбольших числовых диапазонах: гибридная модулярно-позиционная интервально-логарифмическая форма представления чисел. Вещественные числа представляются следующим образом.

1. Мантисса вещественного числа представляется в виде целого числа в системе остаточных классов набором n остатков $\langle m_1, m_2, \dots, m_n \rangle$ от деления позиционного значения мантиссы на каждый из n модулей $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$

$$M \xrightarrow{\text{СОК}} \langle m_1, m_2, \dots, m_n \rangle,$$

где $m_i = M \bmod p_i \equiv |M|_{p_i}$ – i -й остаток от деления числа M по i -му модулю p_i :

$$m_i = |M|_{p_i} = M - \left\lfloor \frac{M}{p_i} \right\rfloor \cdot p_i, \\ i = 1, 2, \dots, n,$$

где $\left\lfloor \frac{M}{p_i} \right\rfloor$ – целая часть частного $\frac{M}{p_i}$;

$\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ – набор оснований или базис СОК. При этом диапазон представления модулярных мантисс определяется произведением всех модулей СОК, то есть $M \in [0; P = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_n]$. Для кодирования цифр мантиссы используются целые числа без знака, представленные в позиционной системе счисления, но операции над цифрами мантиссы выполняются по правилам модулярной арифметики. Любая модулярная операция $\circ \in \{+, -, \times\}$ над двумя числами $\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ и $\langle y_1, y_2, \dots, y_n \rangle$, представленными в СОК, выполняется независимо по каждому модулю:

$$\begin{aligned} & \{z_1, z_2, \dots, z_n\} = \\ & = \left\{ |x_1 \circ y_1|_{p_1}, |x_2 \circ y_2|_{p_2}, \dots, |x_n \circ y_n|_{p_n} \right\}. \end{aligned}$$

2. Характеристика абсолютной величины мантиссы вещественного числа представляется в виде логарифмического интервала (в интервально-логарифмической системе счисления):

$$M \xrightarrow{\text{ИЛСС}} \left\{ \underline{L}_M = \underline{\log_b M}; \overline{L}_M = \overline{\log_b M} \right\},$$

где $\underline{\log_b M}$, $\overline{\log_b M}$ – логарифм числа по основанию b , вычисленный с округлением к $-\infty$ и $+\infty$ соответственно; M – модуль числа, представленный в позиционной системе счисления. Для кодирования характеристики мантиссы вещественного числа используется двоичная позиционная система счисления, но операции над значениями характеристик чисел выполняются по правилам интервальной арифметики и логарифметики. Результат умножения двух логарифмических интервалов $\left[\underline{L}_X = \underline{\log_b X}; \overline{L}_X = \overline{\log_b X} \right]$ и $\left[\underline{L}_Y = \underline{\log_b Y}; \overline{L}_Y = \overline{\log_b Y} \right]$ определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \underline{L}_Z &= \underline{\log_b X \cdot Y} = \underline{\log_b X} + \underline{\log_b Y} = \underline{L}_X + \underline{L}_Y, \\ \overline{L}_Z &= \overline{\log_b X \cdot Y} = \overline{\log_b X} + \overline{\log_b Y} = \overline{L}_X + \overline{L}_Y. \end{aligned}$$

Information systems

3. Масштаб (порядок) числа представляется в позиционной системе счисления в виде целого числа со знаком; операции выполняются также в позиционной системе счисления.

4. Знак числа представляется в позиционной системе счисления в виде одноразрядного числа со знаком; причем знак равен -1 , если число отрицательное, 1 – если число положительное, и 0 – в случае равенства числа нулю. Дополнительный признак нуля вводится с целью представления интервальной логарифмической характеристики нулевого операнда, для которого невозможно вычисление логарифма.

Таким образом, число в гибридной модулярно-позиционной интервально-логарифмической форме представляется в следующем виде:

$$X \xrightarrow{\text{МПЛ-СС}} \left[m_1, m_2, \dots, m_n, \underline{L}, \overline{L}, \lambda, \sigma \right],$$

где $M = m_1, m_2, \dots, m_n$ – модулярная мантисса числа; λ – масштаб (порядок) числа; $\underline{L}, \overline{L}$ – границы интервальной логарифмической характеристики мантиссы числа; σ – знак числа.

При этом позиционное значение мантиссы вещественного числа X определяется как $[X \cdot b^e]$, где e – целое число, определяемое необходимой точностью. Например, мантисса вещественного числа, представленного в формате с плавающей точкой стандарта IEEE 754 как $X = (-1)^s \times 1.f \times 2^{E-E_0}$, где s – знак числа; $1.f$ – нормализованная мантисса; $E - E_0$ – порядок. При переводе в гибридную форму вычисляется так:

$$M = 2^t \times 1.f,$$

где t – разрядность мантиссы, определяемая конкретным типом данных.

Итак, позиционное значение данного числа определяется следующим образом:

$$X = \sigma \cdot b^\lambda \cdot \sum_{i=1}^n \left| m_i \cdot |P_i^{-1}|_{p_i} \right| \cdot P_i,$$

где $P_i = \frac{P}{p_i}$, $|P_i^{-1}|_{p_i}$ – мультипликативная инверсия P_i по модулю p_i , определяемая из соотношения $|P_i^{-1} \cdot P_i|_{p_i} \equiv 1$; $i \in [1, n]$; n – количество модулей.

При выполнении арифметических операций над числами, представленными в виде (1), вероятен выход за границы диапазона представления модулярных мантисс. При переполнении диапазона следует выполнить масштабирование чисел.

Масштабирование модулярных чисел выполняется на основании общего алгоритма масштабирования: пусть K – коэффициент масштабирования; Y – результат масштабирования числа X коэффициентом K ; тогда результат масштабирования вычисляется по формуле:

$$Y = \frac{X - |X|_K}{K},$$

где $|X|_K$ – остаток от деления числа X по модулю K .

Для случая масштабирования модулярных чисел коэффициентом, взаимно простым с основаниями СОК, используется итерационный алгоритм на основе алгоритма, предложенного сингапурскими и австралийскими учеными [27; 29].

1. Определение $|X|_K$, или так называемый этап расширения базиса, – получение остатка x_{n+1} от деления числа, представленного в СОК остатками x_1, x_2, \dots, x_n по модулям p_1, p_2, \dots, p_n , на число $p_{n+1} = K$.

2. Непосредственно масштабирование по каждому модулю выполняется по формуле:

$$y_i = \left| x_i - |X|_{p_i} \cdot |K^{-1}|_{p_i} \right|_{p_i},$$

где $|K^{-1}|_{p_i}$ – мультипликативная инверсия по модулю p_i коэффициента K .

Основные алгоритмы расширения базиса, анализ их вычислительной сложности были рассмотрены авторами

в прошлой работе [25]. В данной статье используется быстрый метод масштабирования на основании китайской теоремы об остатках (КТО).

Согласно КТО, позиционное значение числа $X \in [0, P)$, представленного в СОК остатками $\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ по основаниям $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, вычисляется по формуле:

$$X = \left| \sum_{i=1}^n x_i \cdot |P_i^{-1}|_{p_i} \cdot P_i \right|_P = \sum_{i=1}^n \left| x_i \cdot |P_i^{-1}|_{p_i} \cdot P_i - R \cdot P \right|_{p_i},$$

где $P_i = \frac{P}{p_i}$, $|P_i^{-1}|_{p_i}$ – мультипликативная инверсия P_i по модулю p_i ; $i \in [1, n]$; n – количество модулей; R – позиционный индекс.

Зная значение коэффициента R , можно вычислить остаток от деления по новому основанию без перевода модулярного числа в позиционное представление:

$$|X|_{p_{n+1}} = \left| \sum_{i=1}^n x_i \cdot |P_i^{-1}|_{p_i} \cdot |P_i|_{p_{n+1}} \right|_{p_{n+1}} - |R \cdot P|_{p_{n+1}} \Big|_{p_{n+1}}.$$

Для вычисления коэффициента R авторами разработан алгоритм с использованием целочисленных интервалов на основе приближенной интервальной оценки величины:

$$\tilde{X} = \sum_{i=1}^n \left| x_i \cdot P_i^{-1} \right|_{p_i} \cdot \frac{1}{p_i} = \frac{X + R \cdot P}{P} = R + \frac{X}{P},$$

где целую часть величины \tilde{X} определяет коэффициент R , а дробную – значение X/P . Процесс вычисления коэффициента R с использованием вещественных интервалов с направленным округлением и необходимые условия корректности вычислений представлены в работе К. Исупова и В. Князькова [8]; метод вычисления коэффициента R с использованием целочисленных интервалов описан в патенте [34].

Результаты исследования

Умножение двух чисел, представленных в гибридной модулярно-пози-

ционной интервально-логарифмической форме с плавающей точкой, выполняется с использованием гибридной технологии вычислений следующим образом.

Для вычисления произведения $Z = [\langle z_1, z_2, \dots, z_n \rangle, \underline{L}_Z, \overline{L}_Z, \lambda_Z, \sigma_Z]$ чисел $X = [\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle, \underline{L}_X, \overline{L}_X, \lambda_X, \sigma_X]$ и $Y = [\langle y_1, y_2, \dots, y_n \rangle, \underline{L}_Y, \overline{L}_Y, \lambda_Y, \sigma_Y]$ необходимо:

– вычислить знак произведения $\sigma_Z = \sigma_X \cdot \sigma_Y$ путем алгебраического умножения знаков сомножителей;

– вычислить верхнюю границу интервальной логарифмической характеристики результата $\overline{L}_Z = \overline{L}_X + \overline{L}_Y$ путем алгебраического сложения значений нижних границ \underline{L}_X и \underline{L}_Y ИЛХ операндов в позиционной системе счисления;

– вычислить верхнюю границу ИЛХ результата $\overline{L}_Z = \overline{L}_X + \overline{L}_Y$ путем алгебраического сложения значений нижних границ \underline{L}_X и \underline{L}_Y ИЛХ операндов в позиционной системе счисления;

– вычислить порядок результата $\lambda_Z = \lambda_X + \lambda_Y$ путем алгебраического сложения порядков сомножителей;

– выполнить умножение модулярных мантисс путем нахождения значений $z_i = |x_i \cdot y_i|_{p_i} = x_i \cdot y_i - \frac{x_i \cdot y_i}{p_i} \cdot p_i$ для всех $i \in [1; n]$; при этом вычисления выполняются над операндами, представленными в позиционной системе счисления по правилам модулярной арифметики.

В данной статье отсутствует описание обработки исключительных ситуаций, таких как получение машинного нуля, переполнение и т. п. Более подробно метод описан в патенте [34].

Следует отметить, что поскольку мантиссы чисел, представленные в СОК, ограничены диапазоном $[0; P)$, то при выполнении умножения двух мантисс результат может выйти за пределы диапазона представления, то есть $M_Z = M_X \cdot M_Y \geq P$. Для того чтобы

мантисса результата была представима в СОК, необходимо выполнить операцию масштабирования:

$$\frac{M_X \cdot M_Y}{b^a},$$

где $a = \left\lceil \log_b \frac{M_X \cdot M_Y}{P} \right\rceil$; M_X, M_Y – позиционные значения мантисс; P – позиционное значение диапазона представления; $\lceil \cdot \rceil$ означает округление к наибольшему целому.

Рассмотрим предельный случай, когда числа из диапазона $[0; P)$ могут появиться с равной вероятностью. Вероятность того, что произведение двух мантисс выйдет за пределы диапазона представления модулярных мантисс, то есть $M_X \cdot M_Y \geq P$, равна

$$p(M_Z \geq P) \approx \frac{(P-1)^2 - (P-1)\ln(P-1)}{P^2} \approx \frac{P - \ln P}{P} \approx 1.$$

Это означает, что в предельном случае каждая операция умножения требует выполнения операции масштабирования, и при использовании позиционных характеристик (как точных, так и приближенных и интервальных) для определения коэффициента масштабирования a необходимо производить трудоемкую операцию вычисления логарифма.

В случае использования ИЛХ коэффициент a рассчитывается следующим образом:

$$a = \overline{L}_X + \overline{L}_Y - L_P,$$

где $\overline{L}_X, \overline{L}_Y$ – верхние границы интервальных логарифмических характеристик чисел X и Y ; $L_P = \log_b P$ – константа для конкретного диапазона представления.

Таким образом, при использовании ИЛХ для вычисления коэффициента

масштабирования не требуется преобразования в позиционную систему счисления и вычисления логарифма.

При умножении модулярных мантисс целесообразно выполнять масштабирование обоих операндов до непосредственного выполнения умножения; причем, если величина обоих операндов превышает значение \sqrt{P} , следует распределять коэффициент масштабирования между операндами таким образом, чтобы отмасштабированные операнды не превышали величину \sqrt{P} :

$$b^a = b^{a_x} + b^{a_y},$$

где b^{a_x} – масштабирующий коэффициент, применяемый к первому сомножителю; b^{a_y} – масштабирующий коэффициент, применяемый ко второму сомножителю; a_x и a_y – значения, определяемые соотношениями ИЛХ операндов следующим образом.

Пусть $L_1 = \overline{L_x} + \overline{L_y} - L_p$, $L_2 = \overline{L_x} - \overline{L_y}$; тогда $a_x = \frac{L_1 + L_2}{2}$, $a_y = \frac{L_1 - L_2}{2}$. Если только один из операндов превышает величину \sqrt{P} , к нему необходимо применить масштабирующий коэффициент b^a .

Таким образом, если $\overline{L_z} \geq L_p$, необходимо выполнить масштабирование мантисс операндов, после чего выполнить умножение отмасштабированных мантисс, а также скорректировать значение порядка результата $\lambda_z = \lambda_z + L_1$ и значение верхней и нижней границы интервальной логарифмической характеристики результата $\underline{L_z} = \underline{L_z} - L_1$, $\overline{L_z} = \overline{L_z} - L_1$.

Процесс масштабирования является итерационным, поскольку за один шаг выполняется масштабирование коэффициентом, не превышающим 2^q , где q – разрядность модулей СОК.

На каждом шаге масштабирования вычисляется значение коэффициента R и остаток от деления модулярного числа на $p_{n+1} = 2^a$, где $a \leq q$:

$$x_{n+1} = |M_x|_{2^a} = \left| \sum_{i=1}^n \left| x_i \cdot |P_i^{-1}|_{p_i} \right|_{2^a} \cdot |P_i|_{2^a} - |R \cdot |P|_{2^a}|_{2^a} \right|_{2^a}.$$

Затем выполняется масштабирование коэффициентом 2^a :

$$\tilde{x}_i = \left| x_i - |M_x|_{2^a} \cdot |(2^a)^{-1}|_{p_i} \right|_{p_i},$$

где $|(2^a)^{-1}|_{p_i}$ – мультипликативная инверсия числа 2^a по модулю p_i – константа для конкретного значения модуля p_i .

Все вычисления производятся над целыми числами, представленными в позиционной системе счисления, по правилам модулярной арифметики.

Если $a_x > q$, процедура масштабирования повторяется над уже масштабированной мантиссой $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n$ и так далее, пока не будет выполнено полное масштабирование коэффициентом 2^{a_x} . Аналогичным образом выполняется масштабирование второго сомножителя Y .

Подробный алгоритм деления модулярной мантиссы числа, представленного в модулярно-позиционной интервально-логарифмической форме, на число 2^a (масштабирование степенью двойки), также представлен в патенте [34].

Среднее время выполнения разработанного метода равно

$$T = p(M_z \geq P) \cdot t_1 + \frac{n}{k} t_2,$$

где $p(M_z \geq P)$ – вероятность того, что произведение двух мантисс выйдет за пределы диапазона представления модулярных мантисс (в предельном случае $p(M_z \geq P) = 1$); t_1 – время выполнения операции масштабирования; t_2 – время выполнения операции умножения по модулю; k – количество параллельных модулярных каналов.

Среднее время выполнения операции масштабирования определяется следующим образом:

$$t_1 = j \cdot \left(t_3 + \frac{n}{k} t_4 + \frac{n}{k} t_5 \right),$$

где t_3 – время выполнения операции расширения базиса; t_4 – время выполнения операции вычитания по модулю; t_5 – время выполнения операции умножения по модулю на константу; j – число итераций масштабирования.

Диапазон представления модулярных мантисс $P = \prod_{i=1}^n p_i \approx 2^{n \cdot q}$. Минимальный коэффициент масштабирования $\frac{n \cdot q}{2^1}$ равен 2^1 , максимальный равен 2^2 . Максимальное количество шагов масштабирования примем равным $\frac{n}{2}$.

Таким образом, минимальное и максимальное время выполнения операции масштабирования равны соответственно:

$$t_{1min} = t_3 + \frac{n}{k} t_4 + \frac{n}{k} t_5,$$

$$t_{1max} = \frac{n}{2} \left(t_3 + \frac{n}{k} t_4 + \frac{n}{k} t_5 \right).$$

Время выполнения операции расширения базиса равно [34]:

$$t_3 = \frac{n}{k} t_5 + \frac{n}{k} t_6 + t_7,$$

где t_5 – время выполнения операции умножения по модулю на константу; t_6 – время выполнения операции скалярного произведения вектора на вектор-константу; t_7 – время выполнения операции сложения.

Время выполнения операции умножения по модулю двух произвольных чисел приблизительно в 2 раза выше, чем время выполнения стандартного целочисленного умножения; время выполнения операции умножения по модулю на константу приблизительно равно времени выполнения стандартного целочисленного умножения [13]. Таким образом, минимальное и максимальное

время выполнения разработанного метода равно:

$$T_{min} = \left(\frac{n}{k} t_5 + \frac{n}{k} t_6 + t_7 + \frac{n}{k} t_4 + \frac{n}{k} t_5 \right) + \frac{n}{k} t_2 =$$

$$= \left(\frac{2n}{k} t_c + \frac{n}{k} t_c + t_c + \frac{n}{k} t_c \right) + \frac{2n}{k} t_c = \left(\frac{6n}{k} + 1 \right) t_c,$$

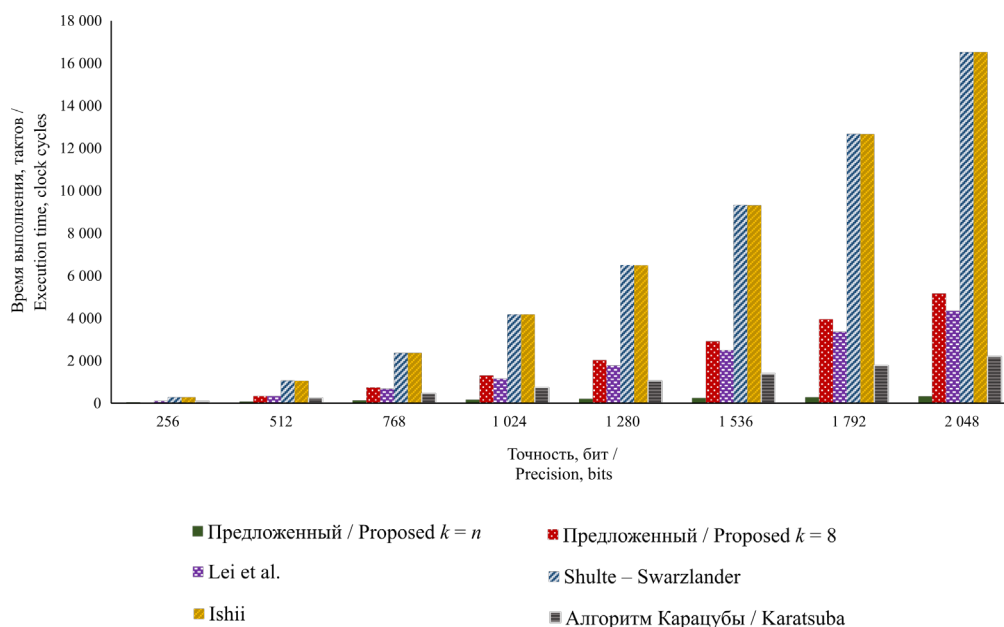
$$T_{max} = \frac{n}{2} \left(\frac{n}{k} t_5 + \frac{n}{k} t_6 + t_7 + \frac{n}{k} t_4 + \frac{n}{k} t_5 \right) + \frac{n}{k} t_2 =$$

$$= \frac{n}{2} \left(\frac{2n}{k} t_c + \frac{n}{k} t_c + t_c + \frac{n}{k} t_c \right) +$$

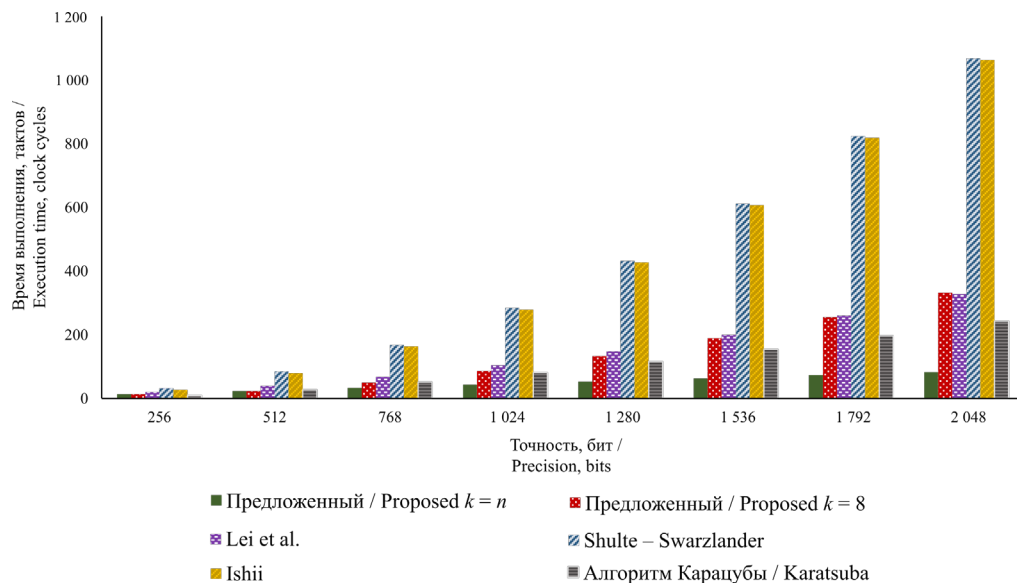
$$+ \frac{2n}{k} t_c = \left(\frac{5n^2 + 4n}{2k} + 1 \right) t_c,$$

где t_7 – длительность такта.

Сравним разработанный метод с конвейерным методом умножения длинных чисел с плавающей точкой (обозначим его как Lei et al [12]), а также со стандартными методами умножения (обозначим их как Schulte – Swartzlander [14] и Ishii [13]). В качестве контроля рассмотрим асимптотически быстрый метод, используемый для организации некоторых целочисленных двоичных умножителей (алгоритм Карацубы [26]). В табл. 1 представлены оценки времени выполнения разработанного метода и аналогов; n – количество слов базовой длины, необходимых для представления длинного числа; k – количество параллельных модулярных каналов. В табл. 2 выполнено сравнение времени выполнения разработанного метода и аналогов для чисел разрядности 1 024 и 2 048 бит ($n = 16$ 64-разрядных слов и $n = 32$ 64-разрядных слова соответственно). На рис. 1; 2 представлены расчеты времени выполнения разработанного метода и аналогов для разрядности сомножителей от 256 до 2 048 бит с использованием 64-разрядных (рис. 1) и 16-разрядных слов (рис. 2) соответственно.



Р и с. 1. Сравнение быстродействия разработанного метода с аналогами (с использованием 64-разрядных умножителей)
 F i g. 1. The comparison of the developed method speed-in-action with analogues using 64 bit multipliers



Р и с. 2. Сравнение быстродействия разработанного метода с аналогами (с использованием 16-разрядных умножителей)
 F i g. 2. The comparison of the developed method speed-in-action with analogues using 16 bit multipliers

Таблица 1

Table 1

Сравнение временной сложности разработанного метода и аналогов
Time complexity comparison with analogues

Метод умножения / Multiplication method	Время выполнения, тактов / Execution time, clock cycles
Lei at al.	$\frac{n^2}{4} + 2n + 8$
Schulte – Swarzlander	$n^2 + n + 12$
Ishii	$n^2 + n + 7$
Предложенный метод с масштабированием / Proposed method with scaling	$p_{n+1} = 2^a$
Предложенный метод с масштабированием параллельный ($k = n$) / Proposed method with scaling parallel ($k = n$)	$\frac{5n + 6}{2}$

Таблица 2

Table 2

Сравнение быстродействия разработанного метода и аналогов (в тактах)
The speed-in-action comparison (clock cycles) with analogues

Метод умножения / Multiplication method	Время выполнения, тактов / Execution time, clock cycles		Ускорение / Speed-up
	Аналоги / Analogues	Предложенный метод ($k = n$) / Proposed method ($k = n$)	
1 024 бит / 1 024 bit			
Lei at al.	104	43	2,4
Schulte – Swarzlander	284	43	6,6
Ishii	279	43	6,4
2 048 бит / 2 048 bit			
Lei at al.	328	83	4,0
Schulte – Swarzlander	1 068	83	12,9
Ishii	1 063	83	12,8

Обсуждение и заключение

Разработаны новые быстрые методы умножения модулярных чисел с плавающей точкой; проведена оценка быстродействия разработанных методов; выполнено сравнение с работами других авторов. Предложенные методы в 2,4–4,0 раза быстрее конвейерного метода умножения и в 6,4–12,9 раз быстрее классических методов умножения.

Показано, что при умножении двух модулярных чисел с плавающей точкой

практически каждая операция умножения модулярных мантисс сопровождается немодульной операцией масштабирования, что существенно увеличивает общее время выполнения умножения. В связи с этим целесообразно продолжить исследования быстрых методов выполнения немодульных операций, в частности, операции масштабирования большими коэффициентами.

В данной статье не учитывается время выполнения операции преобра-

зования чисел в модулярно-позиционную интервально-логарифмическую форму представления. Авторы считают, что разработанный метод умножения будет использоваться для обработки больших объемов числовой информации, поступающей уже в необходимом формате; преобразование же данных из других форматов, в том числе стандартных, может быть осуществлено в параллельном или конвейерном режимах и не будет приводить к значительным затратам времени.

Авторами рассмотрен алгоритм масштабирования коэффициентом, равным 2^a ; при этом интервальная характеристика представлена в виде логарифмов по основанию 2. В то же время разработанный способ представления информации

и выполнения операции умножения может быть использован и при других значениях основания логарифма. Так, разработанные методы могут быть применены для операций над числами вида $M \cdot 10^E$. В таком случае коэффициент масштабирования будет равен 10^a . Данное преимущество может быть дополнительно использовано в задачах, критичных к ошибкам округления при вводе десятичной информации.

В качестве дальнейших исследований предполагается изучение и разработка быстрых методов выполнения немодульных операций расширения базиса и масштабирования, а также разработка арифметического модулярно-позиционного интервально-логарифмического устройства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Reproducible and accurate matrix multiplication / R. Iakymchuk [et al.] // Scientific Computing, Computer Arithmetic, and Validated Numerics. SCAN 2015 / Eds. M. Nehmeier, J. Wolff von Gudenberg, W. Tucker. Lecture Notes in Computer Science. 2016. Vol. 9553. P. 126–137. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-31769-4_11
2. **Voros A.** Discretized Keiper/Li approach to the Riemann hypothesis // Experimental Mathematics. 2018. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.1080/10586458.2018.1482480>
3. solveME: fast and reliable solution of nonlinear ME models / L. Yang [et al.] // BMC Bioinformatics. 2016. Vol. 17. P. 391. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12859-016-1240-1>
4. **Panzer E.** Algorithms for the symbolic integration of hyperlogarithms with applications to Feynman integrals // Computer Physics Communications. 2015. Vol. 188. P. 148–166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2014.10.019>
5. **Miltenberger M., Ralphs T., Steffy D. E.** Exploring the numerics of branch-and-cut for mixed integer linear optimization // Operations Research Proceedings 2017. Operations Research Proceedings (GOR (Gesellschaft für Operations Research e.V.)) / Eds. N. Kliewer, J. Ehmke, R. Borndörfer. Cham : Springer, 2018. P. 151–157. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-89920-6_21
6. Computer discovery and analysis of large Poisson polynomials / D. H. Bailey [et al.] // Experimental Mathematics. 2017. Vol. 26, no. 3. P. 349–363. DOI: <https://doi.org/10.1080/10586458.2016.1180565>
7. **Pan B., Wang Y., Tian S.** A high-precision single shooting method for solving hypersensitive optimal control problems // Mathematical Problems in Engineering. 2018. Vol. 2018. Article ID 7908378. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/7908378>
8. **Isupov K., Knyazkov V.** Interval estimation of relative values in residue number system // Journal of Circuits, Systems and Computers. 2018. Vol. 27, no. 1. P. 1850004. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218126618500044>
9. GRAPE-MPs: implementation of an SIMD for quadruple/hexuple/octuple-precision arithmetic operation on a structured ASIC and an FPGA / N. Nakasato [et al.] // 2012 IEEE 6th International Symposium on Embedded Multicore SoCs. IEEE, 2012. P. 75–83. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCSoc.2012.31>
10. Application of GRAPE9-MPX for high precision calculation in particle physics and performance results / H. Daisaka [et al.] // Procedia Computer Science. 2015. Vol. 51. P. 1323–1332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.05.317>

11. **El-Araby E., Gonzalez I., El-Ghazawi T.** Bringing high-performance reconfigurable computing to exact computations // 2007 International Conference on Field Programmable Logic and Applications / Eds. K. Bertels [et al.]. IEEE, 2007. P. 79–85. DOI: <https://doi.org/10.1109/FPL.2007.4380629>
12. **Lei Y., Dou Y., Zhou J.** FPGA-specific custom VLIW architecture for arbitrary precision floating-point arithmetic // IEICE Transactions on Information and Systems. 2011. Vol. 94, no. 11. P. 2173–2183. DOI: <https://doi.org/10.1587/transinf.E94.D.2173>
13. Fast modular arithmetic on the Kalray MPPA-256 processor for an energy-efficient implementation of ECM / M. Ishii [et al.] // IEEE Transactions on Computers. 2017. Vol. 66, issue 12. P. 2019–2030. DOI: <https://doi.org/10.1109/TC.2017.2704082>
14. **Schulte M. J., Swartzlander E. E.** A family of variable-precision interval arithmetic processors // IEEE Transactions on Computers. 2000. Vol. 49, issue 5. P. 387–397. DOI: <https://doi.org/10.1109/12.859535>
15. **Asif S., Kong Y.** Highly parallel modular multiplier for elliptic curve cryptography in residue number system // Circuits, Systems, and Signal Processing. 2017. Vol. 36, issue 3. P. 1027–1051. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00034-016-0336-1>
16. **Kong Y., Lai Y.** Low latency modular multiplication for public-key cryptosystems using a scalable array of parallel processing elements // 2013 IEEE 56th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). IEEE, 2013. P. 1039–1042. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWSCAS.2013.6674830>
17. **Coleman J. N., Che Ismail R.** LNS with co-transformation competes with floating-point // IEEE Transactions on Computers. 2016. Vol. 65, issue 1. P. 136–146. DOI: <https://doi.org/10.1109/TC.2015.2409059>
18. **Kouretas I., Basetas C., Paliouras V.** Low-power logarithmic number system addition/subtraction and their impact on digital filters // IEEE Transactions on Computers. 2013. Vol. 62, issue 11. P. 2196–2209. DOI: <https://doi.org/10.1109/TC.2012.111>
19. The European logarithmic microprocessor / J. N. Coleman [et al.] // IEEE Transactions on Computers. 2008. Vol. 57, issue 4. P. 532–546. DOI: <https://doi.org/10.1109/TC.2007.70791>
20. **Bigou K., Tisserand A.** Single base modular multiplication for efficient hardware RNS implementations of ECC // Cryptographic Hardware and Embedded Systems – CHES 2015 / Eds. T. Güneysu, H. Handschuh. Lecture Notes in Computer Science. 2015. Vol. 9293. P. 123–140. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-48324-4_7
21. **Bajard J.-C., Eynard J., Merkiche N.** Montgomery reduction within the context of residue number system arithmetic // Journal of Cryptographic Engineering. 2018. Vol. 8, issue 3. P. 189–200. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13389-017-0154-9>
22. **Czyżak M., Smyk R., Ulman Z.** Pipelined scaling of signed residue numbers with the mixed-radix conversion in the programmable gate array // Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering. 2013. No. 76. P. 89–99. URL: <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-5d0a87e2-2459-476f-8c7e-2d72d07072f2/c/Czyzak.pdf>
23. A fully RNS based ECC processor / S. Asif [et al.] // Integration. 2018. Vol. 61. P. 138–149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2017.11.010>
24. Pipelined FPGA coprocessor for elliptic curve cryptography based on residue number system / P. M. Matutino [et al.] // 2017 International Conference on Embedded Computer Systems: Architectures, Modeling, and Simulation (SAMOS) / Eds. Y. Patt, S. K. Nandy. IEEE, 2017. P. 261–268. DOI: <https://doi.org/10.1109/SAMOS.2017.8344638>
25. **Коржавина А. С., Князьков В. С.** Методы расширения базиса в системе остаточных классов: обзор и анализ вычислительной сложности // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 12. С. 37–42. URL: <https://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=36868>
26. **Harvey D., van der Hoeven J., Lecerf G.** Even faster integer multiplication // Journal of Complexity. 2016. Vol. 36. P. 1–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jco.2016.03.001>
27. **Chang C. H., Low J. Y. S.** Simple, fast, and exact RNS scaler for the three-moduli set ($2^n - 1$, 2^n , $2^n + 1$) // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2011. Vol. 58, issue 11. P. 2686–2697. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSI.2011.2142950>
28. **Hiasat A.** Efficient RNS scalars for the extended three-moduli set ($2^n - 1$, 2^{n+p} , $2^n + 1$) // IEEE Transactions on Computers. 2017. Vol. 66, issue 7. P. 1253–1260. DOI: <https://doi.org/10.1109/TC.2017.2652474>
29. **Kong Y., Phillips B.** Fast scaling in the residue number system // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. 2009. Vol. 17, issue 3. P. 443–447. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVLSI.2008.2004550>

30. Meyer-Base U., Stouraitis T. New power-of-2 RNS scaling scheme for cell-based IC design // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. 2003. Vol. 11, issue 2. P. 280–283. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVLSI.2003.810799>

31. Johansson F. Arb: efficient arbitrary-precision midpoint-radius interval arithmetic // IEEE Transactions on Computers. 2017. Vol. 66, issue 8. P. 1281–1292. DOI: <https://doi.org/10.1109/TC.2017.2690633>

32. Revol N. Introduction to the IEEE 1788-2015 standard for interval arithmetic // Numerical Software Verification. NSV 2017 / Eds. A. Abate, S. Boldo. Lecture Notes in Computer Science. 2017. Vol. 10381. P. 14–21. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-63501-9_2

33. Osinin I. A modular-logarithmic coprocessor concept // 2017 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS). IEEE, 2017. P. 588–594. DOI: <https://doi.org/10.1109/HPCS.2017.93>

34. Способ организации выполнения операции умножения двух чисел в модулярно-логарифмическом формате представления с плавающей точкой на гибридных многоядерных процессорах : пат. 2666285 Рос. Федерация : МПК G 06 F 7/483, G 06 F 7/487 / Князьков В. С., Коржавина А. С. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет». № 2017135775/22 ; заявл. 06.10.2017; опубл. 06.09.2018, Бюл. № 25.

Поступила 07.12.2018; принята к публикации 20.02.2019; опубликована онлайн 28.06.2019

Об авторах:

Коржавина Анастасия Сергеевна, старший преподаватель, кафедра электронных вычислительных машин, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36), ResearcherID: S-1877-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8270-2097>, as_korzhavina@vyatsu.ru

Князьков Владимир Сергеевич, главный научный сотрудник, НИИ прикладных и фундаментальных исследований, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» (440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, д. 40); профессор, кафедра электронных вычислительных машин, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36), доктор технических наук, ResearcherID: T-4089-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3820-6541>, kniazkov@list.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. С. Коржавина – обзор литературы, разработка метода и анализ результатов; В. С. Князьков – формулировка и постановка задачи, научное руководство, обсуждение результатов.

Благодарности: Авторы благодарят анонимных рецензентов за их полезные комментарии.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Iakymchuk R., Defour D., Collange S., Graillat S. Reproducible and accurate matrix multiplication. In: Nehmeier M., Wolff von Gudenberg J., Tucker W. (eds) *Scientific Computing, Computer Arithmetic and Validated Numerics. SCAN 2015. Lecture Notes in Computer Science*. 2016; 9553:126-137. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-31769-4_11

2. Voros A. Discretized Keiper/Li approach to the Riemann hypothesis. *Experimental Mathematics*. 2018; 1-18. DOI: <https://doi.org/10.1080/10586458.2018.1482480>

3. Yang L., Ma D., Ebrahim A., Lloyd C.J., Saunders M.A., Palsson B.O. solveME: fast and reliable solution of nonlinear ME models. *BMC Bioinformatics*. 2016; 17:391. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12859-016-1240-1>

4. Panzer E. Algorithms for the symbolic integration of hyperlogarithms with applications to Feynman integrals. *Computer Physics Communications*. 2015; 188:148-166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2014.10.019>

5. Miltenberger M., Ralphs T., Steffy D. E. Exploring the numerics of branch-and-cut for mixed integer linear optimization. In: Klierer N., Ehmk J., Borndörfer R. (eds) *Operations Research Proceedings 2017. Operations Research Proceedings (GOR (Gesellschaft für Operations Research e.V.))*. Cham: Springer; 2018. p. 151-157. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-89920-6_21
6. Bailey D.H., Borwein J.M., Kimberley J.S., Ladd W. Computer discovery and analysis of large poisson polynomials. *Experimental Mathematics*. 2017; 26(3):349-363. DOI: <https://doi.org/10.1080/10586458.2016.1180565>
7. Pan B., Wang Y., Tian S. A high-precision single shooting method for solving hypersensitive optimal control problems. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018; 2018:7908378. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/7908378>
8. Isupov K., Knyazkov V. Interval estimation of relative values in residue number system. *Journal of Circuits, Systems and Computers*. 2018; 27(1):1850004. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218126618500044>
9. Nakasato N., Daisaka H., Fukushige T., Kawai A., Makino J., Ishikawa T., et al. GRAPE-MPs: Implementation of an SIMD for quadruple/hexuple/octuple-precision arithmetic operation on a structured ASIC and an FPGA In: *2012 IEEE 6th International Symposium on Embedded Multicore SoCs*. IEEE; 2012. p. 75-83. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCSoc.2012.31>
10. Daisaka H., Nakasato N., Ishikawa T., Yuasa F. Application of GRAPE9-MPX for high precision calculation in particle physics and performance results. *Procedia Computer Science*. 2015; 51:1323-1332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.05.317>
11. El-Araby E., Gonzalez I., El-Ghazawi T. A. Bringing high-performance reconfigurable computing to exact computations. In: Bertels K., Najjar W., van Genderen A., Vassiliadis S. (eds.) *2007 International Conference on Field Programmable Logic and Applications*. 2007. p. 79–85. DOI: <https://doi.org/10.1109/FPL.2007.4380629>
12. Lei Y., Dou Y., Zhou J. FPGA-specific custom VLIW architecture for arbitrary precision floating-point arithmetic. *IEICE Transactions on Information and Systems*. 2011; 94(11):2173-2183. DOI: <https://doi.org/10.1587/transinf.E94.D.2173>
13. Ishii M., Detrey J., Gaudry P., Inomata A., Fujikawa K. Fast modular arithmetic on the Kalray MPPA-256 processor for an energy-efficient implementation of ECM. *IEEE Transactions on Computers*. 2017; 66(12):2019-2030. DOI: <https://doi.org/10.1109/TC.2017.2704082>
14. Schulte M.J., Swartzlander E.E. A family of variable-precision interval arithmetic processors. *IEEE Transactions on Computers*. 2000; 49(5):387-397. DOI: <https://doi.org/10.1109/12.859535>
15. Asif S., Kong Y. Highly parallel modular multiplier for elliptic curve cryptography in residue number system. *Circuits, Systems, and Signal Processing*. 2017; 36(3):1027-1051. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00034-016-0336-1>
16. Kong Y., Lai Y. Low latency modular multiplication for public-key cryptosystems using a scalable array of parallel processing elements. In: *2013 IEEE 56th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*. IEEE; 2013. p. 1039-1042. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWSCAS.2013.6674830>
17. Coleman J.N., Che Ismail R. LNS with co-transformation competes with floating-point. *IEEE Transactions on Computers*. 2016; 65(1):136-146. DOI: <https://doi.org/10.1109/TC.2015.2409059>
18. Kouretas I., Basetas C., Paliouras V. Low-power logarithmic number system addition/subtraction and their impact on digital filters. *IEEE Transactions on Computers*. 2013; 62(11):2196-2209. DOI: <https://doi.org/10.1109/TC.2012.111>
19. Coleman J.N., Softley C.I., Kadlec J., Matousek R., Tichy M., Pohlet Z., et al. The European logarithmic microprocessor. *IEEE Transactions on Computers*. 2008; 57(4):532-546. DOI: <https://doi.org/10.1109/TC.2007.70791>
20. Bigou K., Tisserand A. Single base modular multiplication for efficient hardware RNS implementations of ECC. In: Güneysu T., Handschuh H. (eds) *Cryptographic Hardware and Embedded Systems – CHES 2015. Lecture Notes in Computer Science*. 2015; 9293:123-140. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-48324-4_7
21. Bajard J.-C., Eynard J., Merkiche N. Montgomery reduction within the context of residue number system arithmetic. *Journal of Cryptographic Engineering*. 2018; 8(3):189-200. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13389-017-0154-9>
22. Czyżak M., Smyk R., Ulman Z. Pipelined scaling of signed residue numbers with the mixed-radix conversion in the programmable gate array. *Poznan University of Technology Academic Journals. Information systems*

Electrical Engineering. 2013; 76:89-99. Available at: <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-5d0a87e2-2459-476f-8c7e-2d72d07072f2/c/Czyzak.pdf>

23. Asif S., Hossain M.S., Kong Y., Abdul W. A fully RNS based ECC processor. *Integration*. 2018; 61:138-149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2017.11.010>

24. Matutino P. M., Araújo J., Sousa L., Chaves R. Pipelined FPGA coprocessor for elliptic curve cryptography based on residue number system. In: Patt Y., Nandy S.K. (eds.) *2017 International Conference on Embedded Computer Systems: Architectures, Modeling, and Simulation (SAMOS)*. 2017. p. 261-268. DOI: <https://doi.org/10.1109/SAMOS.2017.8344638>

25. Korzhavina A.S., Knyazkov V.S. [Base extension in residue number systems: a review and cost analysis]. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii = Modern High Technologies*. 2017; 12:37-42. Available at: <https://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=36868> (In Russ.).

26. Harvey D., van der Hoeven J., Lecerf G. Even faster integer multiplication. *Journal of Complexity*. 2016; 36:1-30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jco.2016.03.001>

27. Chang C.H., Low J.Y.S. Simple, fast, and exact RNS scaler for the three moduli set $(2^n - 1, 2^n, 2^n + 1)$. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2011; 58(11):2686-2697. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSI.2011.2142950>

28. Hiasat A. Efficient RNS scalars for the extended three-moduli set $(2^n - 1, 2^{n+p}, 2^n + 1)$. *IEEE Transactions on Computers*. 2017; 66(7):1253-1260. DOI: <https://doi.org/10.1109/TC.2017.2652474>

29. Kong Y., Phillips B. Fast scaling in the residue number system. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*. 2009; 17(3):443-447. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVLSI.2008.2004550>

30. Meyer-Base U., Stouraitis T. New power-of-2 RNS scaling scheme for cellbased IC design. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*. 2003; 11(2):280-283. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVLSI.2003.810799>

31. Johansson F. Arb: Efficient arbitrary-precision midpoint-radius interval arithmetic. *IEEE Transactions on Computers*. 2017; 66(8):1281-1292. DOI: <https://doi.org/10.1109/TC.2017.2690633>

32. Revol N. Introduction to the IEEE 1788-2015 standard for interval arithmetic. In: Abate A., Boldo S. (eds.) *Numerical Software Verification. NSV 2017. Lecture Notes in Computer Science*. 2017; 10381:14-21. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-63501-9_2

33. Osinin I. A modular-logarithmic coprocessor concept. In: *International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS)*. IEEE. 2017. p. 588-594. DOI: <https://doi.org/10.1109/HPCS.2017.93>

34. Knyazkov V.S., Korzhavina A.S., inventors. The method of organization of multiplying operation of two numbers in floating-point modular-logarithmic format on hybrid multicore processors. Ru Patent 2666285. 2018 Sep 06. (In Russ.).

Received 07.12.2018; revised 20.02.2019; published online 28.06.2019

About authors:

Anastasia S. Korzhavina, Senior Lecturer, Chair of Electronic Computing Machines, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia), ResearcherID: S-1877-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8270-2097>, as_korzhavina@vyatsu.ru

Vladimir S. Knyazkov, Chief Researcher, Research Institute of Applied and Fundamental Research, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russia); Professor, Chair of Electronic Computing Machines, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: T-4089-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3820-6541>, kniazkov@list.ru

Contribution of the authors:

A. S. Korzhavina – reviewing literature, developing the method and analyzing the results. V. S. Knyazkov – formulating the problem, scientific advising, discussing the results.

Acknowledgements: The authors would like to thank the reviewers for their helpful comments.

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



Нейросетевой анализ нормальности малых выборок биометрических данных с использованием хи-квадрат критерия и критериев Андерсона – Дарлинга

В. И. Волчихин¹, А. И. Иванов^{2*}, А. В. Безяев¹,
Е. Н. Куприянов¹

¹ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»
(г. Пенза, Россия)

²АО «Пензенский научно-исследовательский
электротехнический институт» (г. Пенза, Россия)

*ivan@pniei.penza.ru

Введение. Целью статьи является снижение требований к размерам тестовой выборки при проверке гипотезы нормальности.

Материалы и методы. Используется нейросетевое обобщение трех известных статистических критериев: хи-квадрат критерия, критерия Андерсона – Дарлинга в обычной форме и критерия Андерсона – Дарлинга в логарифмической форме.

Результаты исследования. Нейросетевое объединение хи-квадрат критерия и критерия Андерсона – Дарлинга позволяет снизить требования к объему выборки приблизительно на 40 %. Добавление третьего нейрона, воспроизводящего логарифмический вариант критерия Андерсона – Дарлинга, приводит к незначительному снижению вероятности ошибок (2 %). В статье рассматриваются однослойная и многослойная нейронные сети, обобщающие множество известных на данный момент статистических критериев.

Обсуждение и заключение. Высказано предположение о том, что каждому из известных статистических критериев может быть поставлен в соответствие искусственный нейрон. Необходимо изменить отношение к синтезу новых статистических критериев, господствовавшее в XX в. В настоящее время отсутствует необходимость стремиться к созданию статистических критериев высокой мощности. Гораздо более выгодными являются попытки обеспечить низкую коррелированность данных вновь синтезируемых статистических критериев с множеством уже созданных критериев.

Ключевые слова: критерий хи-квадрат, критерий Андерсона – Дарлинга, искусственная нейронная сеть, статистический критерий, нейросетевое воспроизведение статистических критериев, нейросетевой анализ, малая выборка

Для цитирования: Нейросетевой анализ нормальности малых выборок биометрических данных с использованием хи-квадрат критерия и критериев Андерсона – Дарлинга / В. И. Волчихин [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 2. С. 205–217. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.205-217>



The Neural Network Analysis of Normality of Small Samples of Biometric Data through Using the Chi-Square Test and Anderson–Darling Criteria

V. I. Volchikhin¹, A. I. Ivanov^{2*}, A. V. Bezyaev¹,
E. N. Kupriyanov¹

¹*Penza State University (Penza, Russia)*

²*Penza Research Electrotechnical Institute (Penza, Russia)*

*ivan@pniei.penza.ru

Introduction. The aim of the work is to reduce the requirements to test sample size when testing the hypothesis of normality.

Materials and Methods. A neural network generalization of three well-known statistical criteria is used: the chi-square criterion, the Anderson–Darling criterion in ordinary form, and the Anderson–Darling criterion in logarithmic form.

Results. The neural network combining of the chi-square criterion and the Anderson–Darling criterion reduces the sample size requirements by about 40 %. Adding a third neuron that reproduces the logarithmic version of the Anderson–Darling test leads to a small decrease in the probability of errors by 2 %. The article deals with single-layer and multi-layer neural networks, summarizing many currently known statistical criteria.

Discussion and Conclusion. An assumption has been made that an artificial neuron can be assigned to each of the known statistical criteria. It is necessary to change the attitude to the synthesis of new statistical criteria that previously prevailed in the 20th century. There is no current need for striving to create statistical criteria for high power. It is much more advantageous trying to ensure that the data of newly synthesized statistical criteria are low correlated with many of the criteria already created.

Keywords: chi-square test, Anderson–Darling criterion, artificial neural network, statistical criterion, neural network reproduction of statistical criteria, neural network analysis, small sample

For citation: Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Bezyaev A.V., Kupriyanov E.N. The Neural Network Analysis of Normality of Small Samples of Biometric Data through Using the Chi-Square Test and Anderson–Darling Criteria. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(2):205–217. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.205-217>

Введение

Экспериментально полученных данных часто бывает недостаточно. Например, медику, чтобы получить данные 20 пациентов с одним и тем же заболеванием, может потребоваться лечебная практика длительностью 1 год и более. При этом проверить нормальность данных на столь малых выборках невозможно. Если пользоваться стандартными статистическими рекомендациями¹, то

для проверки гипотезы нормальности потребуется выборка из 200 и более опытов. Обычный врач сможет самостоятельно получить такое количество данных не менее чем за 10 лет практики.

Схожая ситуация возникает у биологов, а также при сборе биометрических данных. И медики, и биологи прежде были вынуждены ждать, когда у них появится достаточно большая выборка. Ситуация начала меняться с развитием

¹ Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М. : Физматлит, 2006. 816 с.; Р 50.1.033–2001. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Ч. 1. Критерии типа хи-квадрат. Введ. 2002.07.01. М. : Изд-во стандартов, 2001. 87 с. URL: <https://pdf.standartgost.ru/catalog/Data2/1/4293850/4293850693.pdf>

биометрии. Люди негативно относятся к тому, что при обучении нейронных сетей им придется 200 раз приложить палец к сканеру или 200 раз записать рукописный пароль. Однако пользователи согласны приложить к сканеру папиллярного рисунка свой палец 20 раз или 20 раз записать пароль. По этой причине в нейросетевой биометрии серьезное внимание уделяется разработке новых методов, позволяющих проверять статистические гипотезы на выборках малого объема.

Обзор литературы

В 1900 г. К. Пирсон создал хи-квадрат критерий, который на целое столетие определил вектор развития теории математической статистики². В середине XX в. появились первые исследования, посвященные синтезу искусственных нейронных сетей, ориентированных на эффективное распознавание образов. Вторая половина XX в. была посвящена тому, чтобы добиться эффективного обучения искусственных нейронных сетей. Только в начале XXI в. удалось достичь промышленного применения технологии обучения искусственных нейронных сетей. Каждый цифровой фотоаппарат сейчас имеет нейросетевое приложение, отыскивающее в кадре лица людей³. Автоматическое обучение искусственных нейронных сетей нейросетевых преобразователей биометрических образов в код криптографического ключа аутентификации регламентируется в России национальным стандартом⁴. Биометрия – особый сегмент рынка, подлежащий специальному регулированию. На данный момент международное сообщество разработало порядка 120 биометрических стандартов, из которых 44 адаптированы к русскому языку и введены в действие в России.

Хи-квадрат критерий и другие известные статистические критерии при проверке статистических гипотез ориентированы на сравнение экспериментальной функции вероятности $P(x)$ с теоретической функцией вероятности $P(x)$. Фактически все статистические критерии решают ту же задачу, что и обычные нейроны, то есть для каждого из известных статистических критериев может быть построен свой искусственный нейрон. В частности, для хи-квадрат критерия эквивалентный искусственный нейрон будет описываться следующими преобразованиями для выборки объемом в 21 опыт при гистограмме из 5 равных интервалов:

$$\left\{ \begin{array}{l} x \leftarrow \text{sort}(x) \\ \chi^2 \leftarrow \sum_{i=1}^5 \frac{\left\{ \frac{n_i}{21} - (P(x_{i+1}) - P(x_i)) \right\}^2}{(P(x_{i+1}) - P(x_i))}, \quad (1) \\ z \leftarrow "0" \text{ if } \chi^2 \leq 0.375 \\ z \leftarrow "1" \text{ if } \chi^2 > 0.375 \end{array} \right.$$

где n_i – число опытов, попавших в i -й интервал гистограммы.

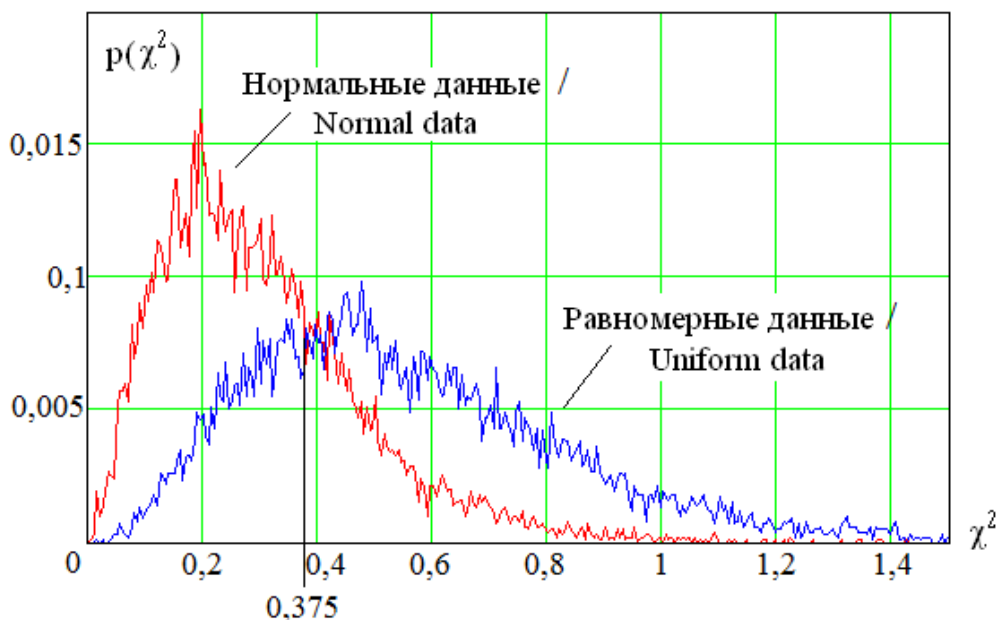
В работоспособности квадратичного нейрона (1) можно убедиться благодаря результатам имитационного моделирования, приведенным на рис. 1.

Результаты (рис. 1) показывают, что отклики нейрона на данные с нормальным законом распределения и отклики на данные с равномерным законом существенно отличаются. При квантовании выходных данных сумматора нейрона по порогу 0,375 вероятности ошибок первого и второго рода оказываются равными: $P_1 = P_2 = P_{EE} = 0,288$.

² Там же.

³ Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвиль А. Глубокое обучение. М.: ДМК Пресс, 2017. 652 с.

⁴ ГОСТ Р 52633.5–2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа. Введ. 2012.04.01. М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2012. 16 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200088764>



Р и с. 1. Отклик хи-квадрат нейрона при выборке в 21 опыт для данных с нормальным и равномерным распределениями

Fig. 1. The response to the chi-square of a neuron when sampling 21 experiments for data with normal and uniform distributions

Идеи К. Пирсона были активно поддержаны математическим сообществом; в XX в. были созданы десятки различных статистических критериев⁵. В частности, в 1952 г. был разработан критерий Андерсона – Дарлингга. Нейрон, эквивалентный данному критерию, описывается следующими преобразованиями:

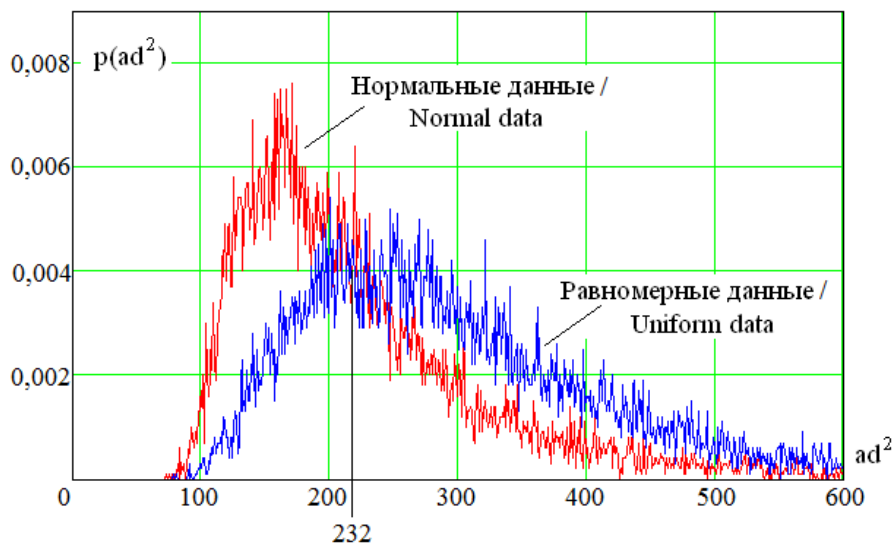
$$\left\{ \begin{array}{l} x \leftarrow \text{sort}(x) \\ ad^2 \leftarrow \sum_{i=1}^{21} \frac{\{i - 21 \cdot P(x_i)\}^2}{(1 - P(x_i)) \cdot P(x_i)}, \quad (2) \\ z \leftarrow "0" \text{ if } ad^2 \leq 232 \\ z \leftarrow "1" \text{ if } ad^2 > 232 \end{array} \right.$$

Об эффективности работы нейрона Андерсона – Дарлингга можно судить по данным имитационного моделирования, приведенным на рис. 2.

Видно, что отклики нейрона на данные с нормальным законом распределения и отклики на данные с равномерным законом существенно отличаются. При квантовании выходных данных сумматора нейрона по порогу 232 вероятности ошибок первого и второго рода оказываются равными: $P_1 = P_2 = P_{EE} = 0,349$.

Очевидно, что для малой выборки (21 опыт) мощность хи-квадрат критерия выше мощности критерия Андерсона – Дарлингга примерно на 21 %. Подобный эффект достигается выполнением следующего неравенства:

⁵ Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М. : Физматлит, 2006. 816 с.; Р 50.1.037-2002. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Ч. 2. Непараметрические критерии. Введ. 2012.04.01. М. : Изд-во стандартов, 2002. 62 с. URL: <http://www.gostrf.com/normadata/1/4294846/4294846286.pdf>



Р и с. 2. Отклик нейрона Андерсона – Дарлинга при выборке в 21 опыт для данных с нормальным и равномерным распределениями

Fig. 2. The response of the Anderson–Darling neuron in a sample of 21 experiments for data with normal and uniform distributions

$P_{EE}(\chi^2) = 0,288 < P_{EE}(ad^2) = 0,349$. Если руководствоваться принципом бритвы Оккама, нужно использовать только хи-квадрат критерий, отбросив данные критерия Андерсона – Дарлинга. В настоящее время такой подход нерационален, так как мы можем совместно использовать два нейрона, как это принято в российской нейросетевой биометрии⁶ [1; 2]. Такая возможность обусловлена низким уровнем коррелированности выходных данных двух рассматриваемых критериев: $corr(\chi^2, ad^2) = 0,423$.

Если мы объединяем два нейрона, то они должны принимать состояния «00» и «01» для признания данных нормальными. Два других состояния («11» и «10») будем трактовать как признание предъявленных данных равномерными. В представленной ситуации вероятность ошибок снижается примерно на 20 %: с 0,288 до 0,239.

Соотношение (2) построено с опорой на аналитическую запись критерия Андерсона – Дарлинга, однако может быть выполнен переход к логарифмической форме записи данного критерия. Нейрон, соответствующий логарифмической форме записи, описывается системой следующих преобразований:

$$\left\{ \begin{array}{l} x \leftarrow \text{sort}(x) \\ adL \leftarrow \sum_{i=0}^{20} \left\{ \frac{i+1}{21} \cdot \ln(P(x_i)) + \right. \\ \left. + \left(1 - \frac{i+1}{21} \right) \cdot \ln(1 - P(x_i)) \right\} \quad (3) \\ z \leftarrow "0" \text{ if } adL \leq 10.705 \\ z \leftarrow "1" \text{ if } adL > 10.705 \end{array} \right.$$

⁶ **Иванов А. И.** Нейросетевые алгоритмы биометрической идентификации личности. Серия «Нейрокомпьютеры и их применение». Кн. 15. М. : Радиотехника, 2004 г. 144 с.; Нейросетевая защита персональных биометрических данных // Ю. К. Язов [и др.] // М. : Радиотехника, 2012. 160 с.

На рис. 3 даны распределения откликов нейрона логарифмической формы Андерсона – Дарлингга.

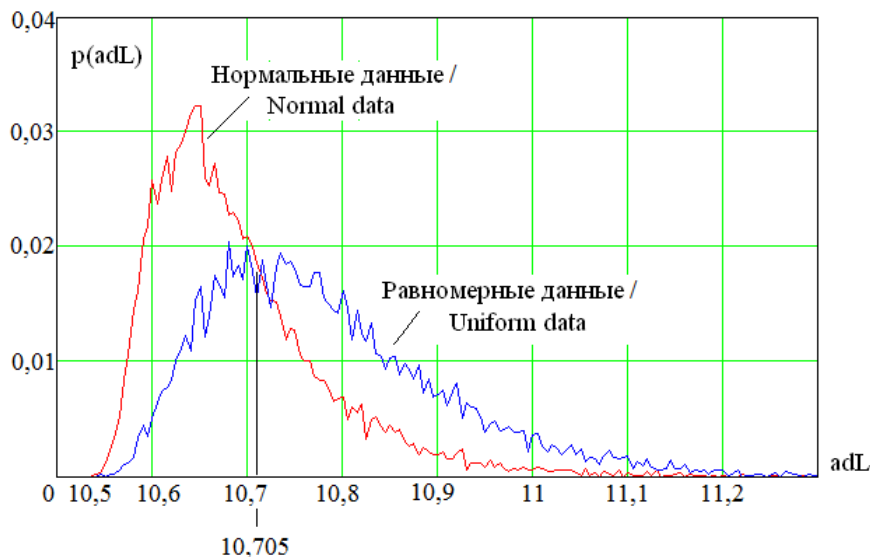
При значении порога квантования 10,705 совпадают значения вероятностей ошибок первого и второго рода: $P_1 = P_2 = P_{EE} = 0,32$. Значение данной величины меньше аналогичного значения нейросетевой реализации классической формы Андерсона – Дарлингга (2). Кроме того, данные две формы нейронов имеют в своих откликах независимые составляющие: $corr(ad^2, adL) = 0,644$. Фактически мы имеем два разных статистических критерия, дополняющих друг друга.

Объединенное использование хи-квадрат нейрона (1) и логарифмической формы нейрона (2) позволяет снизить вероятность ошибок до 0,236. Одновременное использование двух вариантов критерия Андерсона – Дарлингга и хи-квадрат критерия дает дополнительное, но незначительное снижение вероятности ошибок до 0,231.

Материалы и методы

Средневековый принцип бритвы Оккама является оправданием множества процедур обхода «проклятия» размерности за счет понижения размерности задачи. Например, это может быть сделано методом главных компонент, созданным К. Пирсоном в 1901 г. Метод главных компонент является практической реализацией доказанной в 1947 г. теоремы Карунена – Лоэва⁷ [3].

Обоснование бритвы Оккама методом главных компонент кажется оптимальным, однако оно актуально лишь для линейных функционалов (только для линейной алгебры). Если мы строим нелинейную алгебру нейросетевых функционалов, все оказывается сложнее, что мы и постарались продемонстрировать. Бритва Оккама требует отбросить два варианта критериев Андерсона – Дарлингга и пользоваться только хи-квадрат критерием как самым информативным. Однако объединение всех трех крите-



Р и с. 3. Отклик логарифмической формы нейрона Андерсона – Дарлингга при выборке в 21 опыт для данных с нормальным и равномерным распределениями

Fig. 3. The response of the logarithmic form of the Anderson–Darling neuron in a sample of 21 experiments for data with normal and uniform distributions

⁷ Jolliffe I. T. Principal component analysis. 2nd ed. Series: Springer Series in Statistics. Springer–Verlag, 2002. 487 p. URL: [http://cda.psych.uiuc.edu/statistical_learning_course/Jolliffe%20Principal%20Component%20Analysis%20\(2ed.,%20Springer,%202002\)\(518s\)_MVsa_.pdf](http://cda.psych.uiuc.edu/statistical_learning_course/Jolliffe%20Principal%20Component%20Analysis%20(2ed.,%20Springer,%202002)(518s)_MVsa_.pdf)

риев одним слоем искусственных нейронов и корректировка выходного кода дает положительный результат: данные, которые необходимо было отбросить, удается объединить. Обобщенная структура этого направления синтеза новых процедур статистической обработки отображена на рис. 4.

Могут быть построены десятки нейронов, воспроизводящих работу известных и новых статистических критериев. При этом каждый из нейронов будет обладать своей относительной мощностью разделения нормальных и равномерных данных. Для статистических критериев, уже имеющих программные нейроны-аналоги, данные имитационного моделирования приведены в табл. 1.

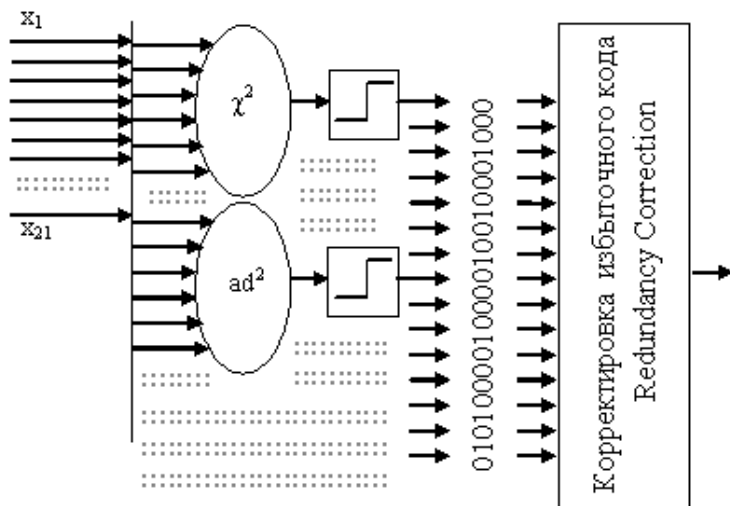
Данные в табл. 1 показывают, что наиболее информативным является

дифференциальный вариант критерия среднего геометрического⁸:

$$\begin{cases} x \leftarrow \text{sort}(x) \\ sg_d \leftarrow \sum_{i=1}^{21} \sqrt{\frac{i+1}{21} \cdot p(x_i)} \\ z \leftarrow "0" \text{ if } sg_d \leq 7.45 \\ z \leftarrow "1" \text{ if } sg_d > 7.45 \end{cases}, \quad (4)$$

где $p(x_i)$ – значение плотности распределения или производная $\frac{\partial P(x_i)}{\partial x}$ функции вероятности.

Вторым по уровню информативности оказывается хи-квадрат нейрон (1), третьим – нейрон Смирнова – Крамера – фон Мизеса:



Р и с. 4. Обобщение большого числа статистических критериев однослойной сетью искусственных нейронов (аналогия с нейросетевыми преобразователями биометрия-код, выполненными в соответствии с российскими стандартами пакета ГОСТ Р 52633.xx)

Fig. 4. Generalizing of a large number of statistical criteria with a single-layer network of artificial neurons (analogy with neural network biometrics-code converters made in accordance with the Russian standards of the GOST R 52633.xx package)

⁸ Иванов А. И., Перфилов К. А. Оценка соотношения мощностей семейства статистических критериев «среднего геометрического» на малых выборках биометрических данных // Современные охраняемые технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов : мат-лы XI Всерос. науч.-практ. конф. Пенза, 2016. С. 223–229.

Т а б л и ц а 1
Table 1

Данные о значениях ошибок первого и второго рода для различных статистических критериев с оценкой порядка их следования по уровню их информативности
Data on the values of the errors of the first and second kinds for various statistical criteria with an assessment of the order of their sequence in terms of their informativeness

Критерий / Criterion	P_{EE}	Информативность / Informativeness
χ^2	0,288	2
$ad^2(2)$	0,349	6
$adL(3)$	0,320	4
sg	0,320	4
sg_d	0,278	1
ω^2	0,351	7
ω_c^2	0,311	3
su^2	0,322	5

$$\left\{ \begin{array}{l} x \leftarrow \text{sort}(x) \\ \omega_c \leftarrow \sum_{i=1}^{21} \left\{ \frac{i+1}{21} - (P(x_i)) \right\}^2 \\ z \leftarrow "0" \text{ if } sg_d \leq 31.6 \\ z \leftarrow "1" \text{ if } sg_d > 31.6 \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x \leftarrow \text{sort}(x) \\ su^2 \leftarrow \frac{1}{\sigma(x)} \left[\sum_{i=0}^9 a_i \cdot (x_{21-i} - x_i) \right]^2 \\ z \leftarrow "0" \text{ if } su^2 \leq 19.88 \\ z \leftarrow "1" \text{ if } su^2 > 19.88 \end{array} \right. \quad (7)$$

Четвертое место по информативности принадлежит логарифмической форме нейрона Андерсона – Дарлингa (3) и интегральному варианту критерия среднего геометрического⁹ [4]:

Наиболее низкой информативностью из рассмотренных обладает нейрон, воспроизводящий наиболее раннюю версию критерия Крамера – фон Мизеса, созданную в 1928 г.¹¹:

$$\left\{ \begin{array}{l} x \leftarrow \text{sort}(x) \\ sg \leftarrow \sum_{i=1}^{21} \sqrt{\frac{i+1}{21}} \cdot (1 - P(x_i)) \\ z \leftarrow "0" \text{ if } sg \leq 8.52 \\ z \leftarrow "1" \text{ if } sg > 8.52 \end{array} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x \leftarrow \text{sort}(x) \\ \omega^2 \leftarrow \sum_{i=0}^{20} \left[\left\{ P(x_i) - \frac{i+1}{21} \right\}^2 \cdot \frac{x_{i+1} - x_i}{x_{20} - x_0} \right] \\ z \leftarrow "0" \text{ if } \omega^2 \leq 0.0043 \\ z \leftarrow "1" \text{ if } \omega^2 > 0.0043 \end{array} \right. \quad (8)$$

Пятое место по информативности независимого применения занимают нейроны Шапиро – Уилка¹⁰:

Принципиально важным является то, что на данный момент созданы десятки различных статистических

⁹ Использование среднего геометрического, ожидаемой и наблюдаемой функций вероятности как статистического критерия оценки качества биометрических данных / Б. С. Ахметов [и др.] // Надежность и качество : тр. XX междунар. симпозиума : в 2 т. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2015. Т. 2. С. 283–285.

¹⁰ Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М. : Физматлит, 2006. 816 с.

¹¹ Там же.

критериев, то есть длина выходного избыточного кода нейронной сети (рис. 4) достаточно велика. Если подавать нормальные данные на нейронную сеть, она будет откликаться кодами с большинством нулевых разрядов, то есть корректоры редких ошибок избыточных кодов оказываются достаточно примитивными. При их создании может быть использован опыт разработки подобных корректоров кода для биометрических приложений [5–8].

Во времена Пирсона не существовало вычислительных машин и искусственных нейронов. В настоящее время ситуация изменилась коренным образом: могут быть созданы программные продукты, комплексно учитывающие десятки и даже сотни статистических критериев. Все это позволяет ожидать появления в ближайшем будущем статистических программ, позволяющих с очень высокой точностью выполнять прогнозы на малых выборках. Если сейчас для достоверного принятия решений о нормальности закона распределения требуются выборки в 200 опытов, то в скором времени появятся прецизионные средства статистических оценок для выборок в 20 опытов. Все это является следствием перехода от попыток обобщений в линейных пространствах к многомерным нейросетевым обобщениям.

Результаты исследования

Следует отметить, что удовлетворительной теории кодов, корректирующих ошибки искусственных нейронных сетей, пока не существует, а классические самокорректирующиеся коды дают низкие результаты. Вместо создания новой теории корректирующих свойств гибрида нейронной сети и избыточного самокорректирующегося кода необходимо переходить от однослойных нейронных сетей к многослойным.

Следует отметить, что впервые многослойные нейронные сети начал обу-

чать А. И. Галушкин¹², создав в 1974 г. метод обратного распространения ошибок. На тот момент реализовать данный метод для многослойных нейронных сетей было технически невозможно. Ситуация изменилась только через 10 лет, когда Дж. Хинтон предложил обучать первые слои нейронов машинами Больцмана [9]. В конечном итоге это и позволило получить в XXI в. промышленно применимый алгоритм обучения глубоких нейронных сетей [10]. В таком контексте промышленно применяемые алгоритмы обучения можно называть алгоритмом Галушкина – Хинтона. Их применение позволяет обучать любые «глубокие» нейронные сети¹³ (например, сеть со структурой, приведенной на рис. 5).

Сеть на рис. 5 имеет три слоя нейронов, при этом нейроны первого и второго слоя должны быть гладкими. Только один выходной нейрон всей «глубокой» сети имеет полностью дискретный квантователь.

Потенциальное качество работы нейронов второго слоя «глубокой» сети зависит от числа входов нейрона, от качества его входных данных и от их взаимной коррелированности.

Значения взаимной корреляции нейронов первого слоя приведены в табл. 2.

При оптимизации выбора связей нейронов необходимо стремиться к минимизации среднего геометрического вероятностей ошибок первого и второго рода $G(P_{EE})$ (данные из табл. 1). Одновременно необходимо минимизировать среднее значение модулей корреляционных входных связей $E(|corr|)$ (данные из табл. 2). Балансировка двух данных факторов для нейронов с двумя входами выполняется следующим образом:

$$\min \left\{ \frac{0.91 \cdot G(P_{EE})^{2-E(|corr|)} + 1.09 \cdot G(P_{EE})^{2-(E|corr|)^2}}{2} \right\}. \quad (9)$$

¹² Галушкин А. И. Синтез многослойных систем распознавания образов. М.: Энергия, 1974. 368 с.

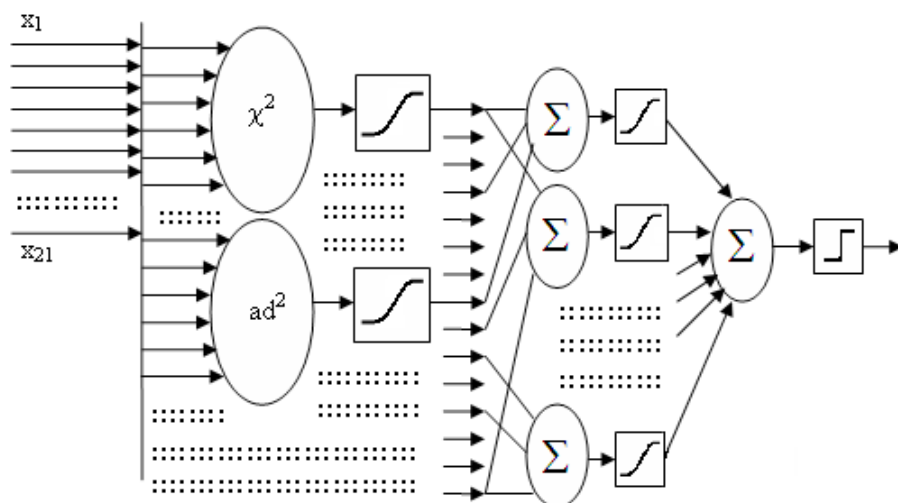
¹³ Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвиль А. Глубокое обучение. М.: ДМК Пресс, 2017. 652 с.

Таблица 2

Table 2

Коэффициенты корреляции между парами рассматриваемых статистических критериев
The coefficients of correlation between pairs of statistical criteria under consideration

	χ^2	ad^2	adL	sg	sg_d	ω^2	ω_c^2	su^2
χ^2	1	0,423	0,672	0,037	-0,042	0,559	0,401	-0,726
ad^2	0,423	1	0,644	0,018	-0,145	0,226	0,393	-0,113
adL	0,672	0,644	1	0,056	0,209	0,827	0,832	-0,917
sg	0,037	0,018	0,056	1	0,132	0,414	0,402	-0,212
sg_d	-0,042	-0,145	0,209	0,132	1	-0,242	-0,142	-0,041
ω^2	0,559	0,226	0,827	0,414	-0,242	1	0,885	-0,667
ω_c^2	0,401	0,393	0,832	0,402	-0,142	0,885	1	-0,764
su^2	-0,726	-0,113	-0,917	-0,212	-0,041	-0,667	-0,764	1



Р и с. 5. Обобщение большого числа статистических критериев многослойной сетью искусственных нейронов (аналогия с использованием глубоких нейронных сетей для распознавания лиц)

F i g. 5. Generalizing a large number of statistical criteria by a multilayered network of artificial neurons (analogy with the use of deep neural networks for face recognition)

Для нейронов с тремя входами связывание двух факторов описывается близким соотношением:

$$\min \left\{ \frac{1.75 \cdot G(P_{EE})^{3-1.5E(\langle \text{corr} \rangle)} + 0.25 \cdot G(P_{EE})^{3-1.5(E(\langle \text{corr} \rangle)^2)}{2} \right\}. \quad (10)$$

При необходимости могут быть построены аналогичные соотношения для нейронов с любым числом входов.

Обсуждение и заключение

Следует отметить, что усилия сотен исследователей, развивавших математическую статистику в XX в., несопоставимы по размерам ресурсов, затраченных США, Канадой, Евросоюзом, Китаем, Россией на развитие технологий биометрической идентификации личности. С начала XXI в. совместными усилиями технологических лидеров в рамках международного комитета

по стандартизации ISO/IEC JTC1 sc 37 (Биометрия) было создано и введено в действие порядка 120 международных стандартов; в стадии разработки находится около 30 стандартов. В России 44 из 120 международных стандартов гармонизованы и введены в действие. В настоящее время развиваются несколько технологий сканирования и обработки уникальных биометрических образов. Данные по биометрическим технологиям отражены в табл. 1.

После создания хи-квадрат критерия К. Пирсоном в 1900 г. его последователями было разработано несколько десятков подобных статистических критериев. Можно рассматривать весь XX в. как время синтеза новых статистических критериев. Видимо, в XXI в. тенденция синтеза новых статистических критериев продолжится, однако акценты развития статистической теории существенно изменятся. В данной статье мы показали, что эффективным является нейросетевое

обобщение уже созданных критериев и критериев, которые еще будут разработаны. Существующих технологий обучения искусственных нейронных сетей вполне достаточно. В данном контексте крайне важным является создание новых статистических критериев, слабо коррелирующих с уже известными. Становится не столь важной относительная мощность нового статистического критерия; важнее то, как он дополняет другие критерии в нейросетевых обобщениях.

В рамках данной статьи мы показали, что нейросетевое объединение всего трех статистических критериев позволяет снизить ошибки первого и второго рода на 22 %. Предположительно, обобщение порядка 100 статистических критериев глубокой нейронной сетью позволит многократно снизить требования к размерам тестовых выборок. Вместо 200 опытов, необходимых сейчас, в ближайшем будущем будет достаточно выборок в 20 опытов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Иванов А. И.** Биометрическая идентификация личности по динамике подсознательных движений : монография. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000. 188 с.
2. **Волчихин В. И., Иванов А. И., Фунтиков В. А.** Быстрые алгоритмы обучения нейросетевых механизмов биометрико-криптографической защиты информации : монография. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. 273 с.
3. Principal manifolds for data visualization and dimension reduction / Eds. A. N. Gorban [et al.]. Lecture Notes in Computational Science and Engineering. Springer, 2007. Vol. 58. 340 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-73750-6>
4. **Иванов А. И., Перфилов К. А., Малыгина Е. А.** Многомерный статистический анализ качества биометрических данных на предельно малых выборках с использованием критериев среднего геометрического, вычисленного для анализируемых функций вероятности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2016. № 2 (16). С. 64–72. URL: <https://imuk.pnzgu.ru/files/imuk.pnzgu.ru/9216.pdf>
5. **Безяев А. В.** Нейросетевой преобразователь биометрии в самокорректирующийся код, совершенно не обладающий избыточностью // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2012. № 3. С. 52–56. URL: <http://www.radiotec.ru/article/10421>
6. **Безяев А. В., Иванов А. И., Фунтикова Ю. В.** Оптимизация структуры самокорректирующегося био-кода, хранящего синдромы ошибок в виде фрагментов хеш-функций // Вестник УРФО. Безопасность в информационной сфере. 2014. № 3 (13). С. 4–13. URL: http://www.info-secur.ru/is_13/bezyaev.htm
7. Оценка эффекта ускорения вычислений, обусловленного поддержкой квантовой суперпозиции при корректировке выходных состояний нейросетевого преобразователя биометрии в код /

В. И. Волчихин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. Информатика, вычислительная техника. 2017. № 1 (41). С. 43–55. URL: https://izvuz_tn.pnzgu.ru/files/izvuz_tn.pnzgu.ru/4117.pdf

8. **Иванов А. И.** Сопоставительный анализ показателей конкурирующих технологий биометрико-криптографической аутентификации личности // Защита информации. ИНСАЙД. 2014. № 3. С. 32–39. URL: http://www.inside-zh.ru/pages/3_2014/32.html

9. **Ackley D. H., Hinton G. E., Sejnowski T. J.** A learning algorithm for boltzmann machines // Cognitive Science. 1985. Vol. 9, issue 1. P. 147–169. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0364-0213\(85\)80012-4](https://doi.org/10.1016/S0364-0213(85)80012-4)

10. **Hinton G. E.** Training products of experts by minimizing contrastive divergence // Neural Computation. 2002. Vol. 14, issue 8. P. 1771–1800. DOI: <https://doi.org/10.1162/089976602760128018>

Поступила 15.02.2019; принята к публикации 25.04.2019; опубликована онлайн 28.06.2019

Об авторах:

Волчихин Владимир Иванович, президент, ФБГОУ ВО «Пензенский государственный университет» (440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: O-9718-2015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9986-521X>, vvi@pnzgu.ru

Иванов Александр Иванович, начальник, лаборатория биометрических и нейросетевых технологий, АО «Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт» (440000, Россия, г. Пенза, ул. Советская, д. 9), доктор технических наук, доцент, ResearcherID: R-4514-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3475-2182>, ivan@pniei.penza.ru

Безяев Александр Викторович, докторант, кафедра информационной безопасности систем и технологий, ФБГОУ ВО «Пензенский государственный университет» (440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), кандидат технических наук, ResearcherID: Q-9589-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0703-3270>, ibst@pnzgu.ru

Куприянов Евгений Николаевич, аспирант, кафедра информационной безопасности систем и технологий, ФБГОУ ВО «Пензенский государственный университет» (440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), Publons: <https://publons.com/researcher/2956834/evgenyi-kupriyanov>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0806-1476>, ibst@pnzgu.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. И. Волчихин – концепция нейросетевого объединения статистических критериев; А. И. Иванов – формализация нейросетевого описания рассматриваемых статистических критериев; А. В. Безяев – корректировка выходных кодов нейронной сети, обобщающей статистические критерии; Е. Н. Куприянов – программная реализация вычислений, формирование таблиц с данными.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Ivanov A.I. Biometric identification based on the dynamics of subconscious movements: a monograph. Penza: Publishing House of PSU; 2000. (In Russ.)

2. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Funtikov V.A. Fast learning algorithms for neural network mechanisms of biometric-cryptographic information protection: a monograph. Penza: Publishing House of PSU; 2005. (In Russ.)

3. Gorban A.N., Kégl B., Wunsch D.C., Zinovyev A.Y. Principal manifolds for data visualisation and dimension reduction. Lecture Notes in Computational Science and Engineering. Springer; 2007. Vol. 58. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-73750-6>

4. Ivanov A.I., Perfilov K.A., Malygina E.A. Multivariate statistical analysis of the quality of biometric data on extremely small samples using the criteria of the geometric mean calculated for the analyzed

probability functions. *Izmereniye. Monitoring. Upravleniye. Kontrol* = Measuring. Monitoring. Management. Control. 2016; 2:64-72. Available at: <https://imuk.pnzgu.ru/files/imuk.pnzgu.ru/9216.pdf> (In Russ.)

5. Bezyaev A.V. Neural network biometrics – to-self-correcting code converter without redundancy. *Neirokompyutery: razrabotka, primeneniye* = Neurocomputers. 2012; 3:52-56. Available at: <http://www.radiotec.ru/article/10421> (In Russ.)

6. Bezyaev A.V., Ivanov A.I., Funtikova Yu.V. Optimization of the structure self-correcting bio-code, storing syndromes error as fragments hash-functions. *Vestnik URFO. Bezopasnost v informatsionnoy sfere* = UrFR Newsletter. Information Security. 2014; 3:4-13. Available at: http://www.info-secur.ru/is_13/bezyaev.htm (In Russ.)

7. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Bezyaev A.V., Elfimov A.V., Yunin A.P. 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. Informatika, vychislitel'naya tekhnika* = University Proceedings. Volga Region. Engineering Sciences. Computer Science, Computer Engineering and Control. 2017; 1:43-55. Available at: https://izvuz_tn.pnzgu.ru/files/izvuz_tn.pnzgu.ru/4117.pdf (In Russ.)

8. Ivanov A.I. Comparative analysis of the indicators of competing technologies of biometric-cryptographic authentication of the person. *Zashchita informatsii. INSAYD* = Protection of Information. INSIDE. 2014; 3:32-39. Available at: http://www.inside-zi.ru/pages/3_2014/32.html (In Russ.)

9. Ackley D.H., Hinton G.E., Sejnowski T.J. A learning algorithm for Boltzmann machines. *Cognitive Science*. 1985; 9(1):147-169. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0364-0213\(85\)80012-4](https://doi.org/10.1016/S0364-0213(85)80012-4)

10. Hinton G.E. Training products of experts by minimizing contrastive divergence. *Neural Computation*. 2002; 14(8):1771-1800. DOI: <https://doi.org/10.1162/089976602760128018>

Received 15.02.2019; revised 25.04.2019; published online 28.06.2019

About authors:

Vladimir I. Volchikhin, President, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: O-9718-2015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9986-521X>, vvi@pnzgu.ru

Aleksandr I. Ivanov, Head, Laboratory of Biometric and Neural Network Technologies, Penza Research Electrotechnical Institute (9 Sovetskaya St., Penza 440000, Russia), D.Sc. (Engineering), Associate Professor, ResearcherID: R-4514-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3475-2182>, ivan@pniei.penza.ru

Alexander V. Bezyaev, Doctoral Candidate, Chair of Information Security of Systems and Technologies, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: Q-9589-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0703-3270>, ibst@pnzgu.ru

Evgeniy N. Kupriyanov, Graduate Student, Chair of Information Security of Systems and Technologies, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russia), Publons: <https://publons.com/researcher/2956834/evgeniy-kupriyanov>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0806-1476>, ibst@pnzgu.ru

Contribution of the authors:

V. I. Volchikhin – the development of the concept of a neural network association of statistical criteria; A. I. Ivanov – the formalization of the neural network description of the statistical criteria under consideration; A. V. Bezyaev – the adjustment of the output codes of a neural network that generalizes statistical criteria; E. N. Kupriyanov – the software implementation of calculations and formation of tables with data.

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

ФИЗИКА / PHYSICS

УДК 621.9.048.4: 001.891.57

DOI: 10.15507/2658-4123.029.201902.218-233



Моделирование температурного поля поверхности при электроискровом легировании металлов

В. Д. Власенко¹, В. И. Иванов², В. Ф. Аулов²,
Л. А. Коневцов³, Е. Г. Мартынова^{4*}, И. Х. Хасан⁴

¹ФГБУН «Вычислительный центр Дальневосточного
отделения Российской академии наук» (г. Хабаровск, Россия)

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

³ФГБУН «Институт материаловедения Хабаровского
научного центра Дальневосточного отделения Российской
академии наук» (г. Хабаровск, Россия)

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

*El.mart2012@yandex.ru

Введение. В настоящее время особую актуальность приобретает проблема повышения эксплуатационных свойств деталей машин, инструментов и технологической оснастки посредством улучшения физико-химико-механических характеристик их исполнительных рабочих поверхностей. Одним из современных методов получения покрытий на поверхностях деталей является метод электроискрового легирования, при котором важную роль играет выбор теплофизических свойств материалов для получения покрытий с заданными физико-механическими и триботехническими свойствами. С целью выбора материала электрода в статье изложены результаты разработки метода расчета нестационарного температурного поля обрабатываемого материала (катода) в виде прямоугольного параллелепипеда, на одной грани которого в процессе электроискрового легирования формируется легированный слой.

Материалы и методы. Для формирования легированного слоя при каплевидном электромассопереносе в качестве обрабатываемого материала (катода) использовалось железо в форме параллелепипеда, а в качестве обрабатывающего материала (анода) – вольфрам. Предложена нелинейная начально-краевая задача и вычислительная схема для определения значений температуры во всех точках температурного поля катода в форме параллелепипеда с расположением нескольких теплоизлучающих капель на его грани.

Результаты исследования. В статье изложен алгоритм решения задачи в соответствии со второй формулой Грина для нахождения температурного поля в катоде, имеющем форму параллелепипеда; при этом описанная нелинейная модель потока из капель в параллелепипед заменяется линейной моделью. Построен алгоритм, проведены расчеты для определения значений температуры во всех точках и температурного потока в катоде в случае одной среднестатистической капли на его грани. По данному алгоритму создан пакет программ, проведены экспериментальные расчеты. Показана динамика значений температуры (во всех точках) и теплового потока исследуемых точек катода.

© Власенко В. Д., Иванов В. И., Аулов В. Ф., Коневцов Л. А., Мартынова Е. Г., Хасан И. Х., 2019



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

Обсуждение и заключение. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что для достижения более высоких свойств покрытий и большей эффективности электроискрового легирования необходим расчет температурного поля и теплового потока исследуемых точек катода. Представленная математическая модель получена для нанесения одной капли, помещенной на границу теплопроводящего полупространства. При выборе анодного материала в зависимости от эрозионной стойкости для получения необходимой толщины поверхностных слоев с заданными функциональными свойствами используется разработанный метод расчета, который позволяет описать процесс остывания одной нанесенной капли и использовать затем полученную информацию для усредненного описания эффекта нагрева тела параллелепипеда рядом таких капель.

Ключевые слова: электроискровое легирование, анод, катод, температурное поле, легирование металлов, моделирование температурного поля

Для цитирования: Моделирование температурного поля поверхности при электроискровом легировании металлов / В. Д. Власенко [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 2. С. 218–233. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.218-233>

Финансирование: Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства РМ в рамках научного проекта № 18-43-130003\18 «Исследование интенсивности изнашивания рабочих поверхностей деталей пар трения, формируемых электроискровыми покрытиями».

Modelling the Temperature Field of a Surface in Using Electrospark Alloying of Metals

V. D. Vlasenko¹, V. I. Ivanov², V. F. Aulov², L. A. Konevtsov³,
E. G. Martynova^{4*}, I. H. Hasan⁴

¹*Computing Center of Far Eastern Branch RAS
(Khabarovsk, Russia)*

²*Federal Scientific Agroengineering Center VIM
(Moscow, Russia)*

³*Institute of Materials Science of the Khabarovsk Scientific
Center of Far Eastern Branch RAS (Khabarovsk, Russia)*

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

**El.mart2012@yandex.ru*

Introduction. At present, the problem of increasing performance properties of machine parts, tools and tooling by improving the physical, chemical and mechanical characteristics of their executive working surfaces is relevant. One of the modern methods of obtaining coatings on the surfaces of parts is the method of electrospark alloying. In the case of electrospark alloying, it is important to select the thermophysical properties of materials to obtain coatings with desired physicomechanical and tribological properties. The paper presents the results of the method development for calculating the unsteady temperature field of the processed material (cathode) having the form of a rectangular parallelepiped, on one side of which a doped layer is formed during electrospark alloying.

Materials and Methods. To form doped layers in a drop-shaped electro-mass transfer, we used iron in the form of a parallelepiped as a being processed material (cathode) and tungsten was used as a processing material (anode). A nonlinear initial boundary value problem and a computational scheme are suggested for determining the temperature at all points (temperature field) of the cathode made in the form of a parallelepiped with the location of several heat-emitting drops on its face.

Results. The paper presents an algorithm for solving the problem by the second Green's formula of finding the temperature field in the cathode made in the form of a parallelepiped, in this case the described nonlinear model of the flow from droplets to the parallelepiped is replaced by a linear model. An algorithm is constructed and calculations are carried out to determine the temperature values at all points and the temperature flow in the cathode in the case of one average drop on its face. According to this algorithm, a software package was created and experimental calculations were carried out. The dynamics of temperature values at all points and the heat flux of the cathode points under study is shown.

Discussion and Conclusion. To achieve higher coating properties and a greater efficiency of the electrospark alloying, it is necessary to calculate the temperature field and heat flow of the cathode points under studying. The proposed mathematical model is calculated for the case of one drop placed on the boundary of a heat-conducting half-space. When choosing an anode material depending on the erosion resistance to obtain the required thickness of the surface layers with the specified functional properties, the developed calculation method is used, which allows us to describe the cooling process of one drop and then use this information to average the description of the effect of heating the parallelepiped body by a number of such drops.

Keywords: electrospark alloying, anode, cathode, temperature field, alloying of metals, modelling the temperature field

For citation: Vlasenko V.D., Ivanov V.I., Aulov V.F., Konevtsov L.A., Martynova E.G., Hasan I.H. Modelling the Temperature Field of a Surface in Using Electrospark Alloying of Metals. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(2):218-233. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.218-233>

Funding: The study was conducted with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Republic of Mordovia in the framework of the research project No. 18-43-130003\18 «Study of the wear intensity of the working surfaces of friction pairs formed by electric spark coatings».

Введение

Проблема улучшения эксплуатационных свойств (износо- и жаростойкости, а также коррозионной стойкости) рабочих поверхностей деталей машин, инструментов и технологической оснастки путем улучшения физико-химико-механических характеристик приобретает все большую актуальность. В настоящее время прогресс в машиностроении во многом связан с применением высокоэффективных методов модификации рабочих поверхностей деталей машин, инструментов и технологической оснастки, основанных на использовании потоков энергии с удельной мощностью в пятне нагрева более 10^2 Вт/мм². К их числу относится современный наукоемкий метод электроискрового легирования (ЭИЛ). Его достоинствами являются высокая прочность сцепления легированного слоя из любых токопроводящих материалов (в том числе тугоплавких металлов и сплавов) с обрабатываемым материалом, низкая энергоемкость процесса,

простота выполнения технологической операции и др. Применение метода ЭИЛ для упрочнения рабочих поверхностей деталей, инструмента и оснастки обеспечивает повышение срока их службы в пять и более раз. В условиях современного машиностроительного производства метод ЭИЛ является востребованным, а его изучение с целью более эффективного использования при получении функциональных покрытий становится актуальным.

Обработка токопроводящей поверхности посредством ЭИЛ представляет собой многоэтапный процесс. Каждый его цикл включает краткосрочный контакт электрода-анода и детали-катода; полярный перенос электродного материала на деталь в зоне действия искрового разряда; микрометаллургический процесс на ее поверхности с химическим взаимодействием элементов материалов электрода, детали и межэлектродной среды; быстрые разогрев и охлаждение микрообъема поверх-

ностного слоя детали. Результатом является изменение структуры, химического и фазового составов, а также свойств поверхностного слоя детали и рельефа ее поверхности.

При каждом цикле ЭИЛ на катоде образуется лунка, заполненная материалом, полученным в результате взаимодействия катода, анода и межэлектродной среды [1; 2].

Одним из основных вариантов становится перенос горячей частицы, температура которой близка к температуре плавления, на холодную поверхность, температура которой близка к температуре окружающей среды. В ходе этого вероятно закрепление частицы на поверхности практически без образования зоны взаимной кристаллизации [1].

Для указанного случая в зависимости от эрозионной стойкости материала и получения необходимой толщины поверхностных слоев с заданными функциональными свойствами рассматривается математическая модель определения температурного поля катода.

Обзор литературы

Многие российские и зарубежные исследования посвящены использованию метода ЭИЛ при создании упрочняющих покрытий на металлах и сплавах. Представлены результаты повышения физических, технологических и эксплуатационных характеристик покрытий, нанесенных методом ЭИЛ на титан и его сплавы [1; 2]; виден положительный эффект применения метода ЭИЛ на твердых сплавах [3; 4]. Кроме того, исследователи начинают проявлять интерес к ЭИЛ легких алюминиевых сплавов. Так, учеными [5] представлены характеристики микроструктуры и кавитационной эрозии покрытия из сплава Al–Si. Однако наиболее широкое распространение метод ЭИЛ получил при обработке поверхностей сталей [6–8]. В названных работах исследователи

добились повышения термостойкости многослойного покрытия. Результаты зарубежных исследований свидетельствуют также об уменьшении коррозионной активности покрытия, полученного на нержавеющей стали методом электроискрового осаждения в расплавленном цинке [7].

В настоящее время проводятся исследования по разработке критериев эффективности [9; 10] и электрофизических моделей процесса ЭИЛ [11], которые позволяют найти зависимость критериев качества покрытия от технологических параметров процесса. Разработанные критерии метода ЭИЛ позволили выделить его в отдельный раздел материаловедения [12].

Однако практическое использование метода ЭИЛ (оптимизация параметров разряда и теплофизических свойств материалов, получение поверхностных слоев с заданной толщиной и функциональными свойствами) сдерживается отсутствием численных методов расчета температурного поля в процессе формирования покрытий на рабочих поверхностях обрабатываемого материала.

При выборе обрабатываемого материала для получения на обрабатываемом материале покрытий с заданными функциональными свойствами возникают сложности определения температурного поля в поверхностном слое при реализации метода¹ [13–15].

В работах зарубежных [16–19] и отечественных исследователей [20; 21] рассмотрены некоторые математические модели определения температурного поля в поверхностном слое катода в процессе ЭИЛ. Однако описанные модели не учитывают ряд факторов и сложны в реализации.

Таким образом, целью данной статьи является получение полной математической модели определения темпера-

¹ Johnson R. N. Principles and applications of electro-spark deposition // Society of Vacuum Coaters 45th Annual Technical Conference, Lake Buena Vista. 1987. URL: https://www.researchgate.net/publication/236399429_Principles_and_applications_of_electro-spark_deposition

турного поля при ЭИЛ в поверхностном слое обрабатываемого материала.

Материалы и методы

Рассмотрена задача нагрева катода, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда ($Q_0 = \{(-a, a) \times (-b, b) \times (0, c)\}$), в декартовой системе координат при ЭИЛ (рис. 1). Здесь $P_0 = \{z = 0, x \in (-a, a), y \in (-b, b)\}$ – рабочая поверхность; $q_0 = q_0\{x, y, t\} = q_0\{x', t\}$ – поверхностный тепловой поток; t – время; N – количество капель [20].

Капли Q_i , равномерно заполняя некоторую часть грани $\{z = 0\}$ (рис. 1), за один искровой разряд отдают посредством теплопроводности и излучения тепловой поток:

$$q_{1i} = \alpha_i (T_i - T_{sr}) + \kappa \sigma T_i^4, \quad i = \overline{1, N},$$

где α_i – коэффициент теплоотдачи капля; T_i – температура i -ой капли; T_{sr} – температура окружающей среды; $\kappa = \lambda / (c\rho)$ – коэффициент температуропроводности; σ – универсальная постоянная Стефана-Больцмана [Там же].

В математическом плане исследование теплового процесса (нагрева параллелепипеда и остывания капель Q_i за некоторый фиксированный промежуток времени t^* от начала воздействия искрового разряда t_0) приводит к необходимости рассмотрения следующей

начально-краевой задачи нелинейной зависимости:

$$\lambda_p \Delta T_0 - c_p \rho_p \frac{\partial T_0}{\partial t} = 0, \quad \vec{x} \in Q_0, \quad t_0 < t < t^*,$$

$$\lambda_k \Delta T_i - c_k \rho_k \frac{\partial T_i}{\partial t} = 0, \quad \vec{x} \in Q_i, \quad t_0 < t < t^*,$$

$$T_0|_{t=0} = \Phi_0(\vec{x}), \quad \vec{x} \in Q_0, \quad T_i|_{t=0} = \Phi_i(\vec{x}),$$

$$\vec{x} \in Q_i, \quad i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_0}{\partial x}|_{x=\pm a} = 0, \quad \frac{\partial T_0}{\partial y}|_{y=\pm b} = 0, \quad \frac{\partial T_0}{\partial z}|_{z=c} = 0,$$

$$\lambda_p \frac{\partial T_0}{\partial z} + \alpha_p (T_0 - T_{sr}) = 0, \quad z = 0,$$

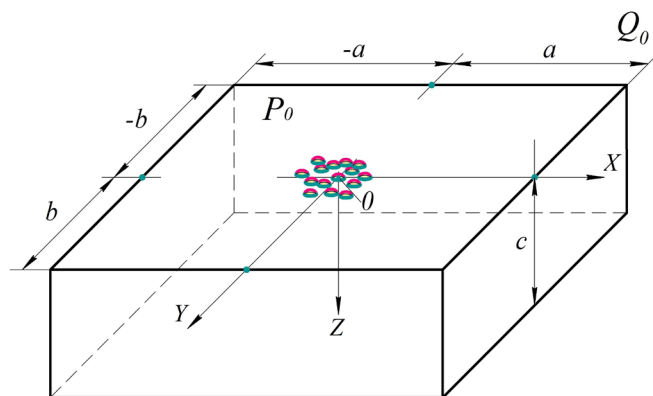
$$(x, y) \notin \bigcup_{i=1}^N \Omega_i,$$

$$T_0 = T_i, \quad \lambda_p \frac{\partial T_0}{\partial z} = \lambda_k \frac{\partial T_i}{\partial z}, \quad z = 0,$$

$$(x, y) \in \bigcup_{i=1}^N \overline{\Omega}_i,$$

$$\lambda_k \frac{\partial T_i}{\partial \vec{n}} + \alpha_k (T_i - T_{cp/sr}) + \kappa \sigma T_i^4 = q_0,$$

$$\vec{x} \in \partial Q_i, \quad z < 0,$$



Р и с. 1. Катод (прямоугольный параллелепипед Q_0) с каплями на его поверхности P_0 ; a, b, c – размеры катода в декартовой системе координат XYZ

F i g. 1. The cathode (rectangular parallelepiped Q_0) with drops on its surface P_0 ; a, b, c – the size of the cathode in the Cartesian coordinate system XYZ

где $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа; T_0 – температура катода; T_{sr} – температура окружающей среды; $\Phi_0(x)$, $\Phi_i(\vec{x})$ – известные заданные функции; $\lambda_p, \lambda_k, c_p, c_k, \rho_p, \rho_k, \alpha_p, \alpha_k$ – коэффициенты теплопроводности, удельной теплоемкости, удельной плотности и теплоотдачи параллелепипеда (p) и капли (k) соответственно; $\vec{x} = \{x, y, z\}$, \vec{n} – внешняя нормаль к $\partial\Omega_i$; здесь и далее коэффициенты с индексом $i = 0$ относятся к катоду Q_0 , с индексами $i \uparrow 0$ – к i -ой капле Q_i ; $\Omega_i = Q_i \cap \{z = 0\}$, $\bar{\Omega}_i = \Omega_i \cup \partial\Omega_i$ [Там же].

Ввиду сложности задачи (1) ее решение требует перехода к новым переменным: $U = T_0 - T_{sr}$; $U_i = T_i - T_{sr}$; $a_0^2 = a_0^2 = \lambda_i / (c_i \rho_i)$. Тогда задача для параллелепипеда Q_0 получит следующий вид:

$$a_0^2 \Delta U - \frac{\partial U}{\partial t} = 0, \quad \vec{x} \in Q_i, \quad i = \overline{0, N},$$

$$t_0 < t < t^*,$$

$$U|_{t=t_0} = \phi(\vec{x}), \quad \vec{x} \in Q_0 \cup \left(\bigcup_{i=1}^N Q_i \right),$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=\pm a} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial y} \Big|_{y=\pm b} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial z} \Big|_{z=c} = 0, \quad (2)$$

$$\lambda_p \frac{\partial U}{\partial z} + \alpha_p U = 0, \quad z = 0, \quad (x, y) \notin \bigcup_{i=1}^N \Omega_i,$$

$$\lambda_k \frac{\partial U}{\partial \vec{n}} + \alpha_k U_i + \kappa \sigma (U_i + T_{sr})^4 = q_0,$$

$$z = 0, \quad (x, y) \in \bigcup_{i=1}^N \bar{\Omega}_i,$$

$$\text{где } \phi(\vec{x}) = \begin{cases} \phi_0(\vec{x}), & \vec{x} \in Q_0, \\ \phi_i(\vec{x}), & z = 0, \quad (x, y) \in \bigcup_{i=1}^N \Omega_i, \end{cases}$$

$$\phi_0(\vec{x}) = \Phi_0(\vec{x}) - T_{sr}, \quad \phi_i(\vec{x}) = \Phi_i(\vec{x}) - T_{sr}$$

[Там же].

Предположим, что размеры капель малы; тогда температура внутри объема капли будет почти постоянна, а существенно изменяться она станет только во времени t .

Будем считать, что при каждом $t > 0$ справедливы приближенные равенства, которые тем более верны, чем меньше размеры капли [Там же]:

$$U(\vec{x}, t) \oplus \text{const},$$

$$\partial U(\vec{x}, t) / \partial t \approx \text{const}, \quad \vec{x} \in Q_i, \quad i = \overline{1, N},$$

$$\partial U(\vec{x}, t) / \partial z \Big|_{z=0} \approx \text{const},$$

$$x' \in P_i, \quad i = \overline{1, N}, \quad (3)$$

где P_i – основание i -ой капли.

Это позволяет усреднить задачу по объемам Q_i , ограничившись только областью Q_0 .

Так как для нашего исследования важна не конкретная геометрическая форма капли, а лишь ее размеры, для простоты вычислений предположим, что капля заключена в параллелепипед определенного размера (рис. 2) [Там же]:

$$Q_i = \{(a_{1i}, a_{2i}) \times (b_{1i}, b_{2i}) \times (0, d)\},$$

$$\Delta a_i = a_{2i} - a_{1i}, \quad \Delta b_i = b_{2i} - b_{1i};$$

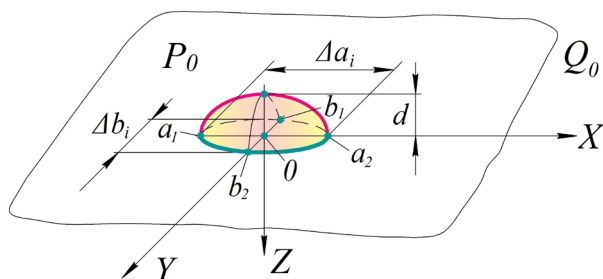
$$\text{тогда } |Q| = \Delta a_i \Delta b_i d, \quad |P| = \Delta a_i \Delta b_i, \quad |S| = 2 \Delta a_i d + 2 \Delta b_i d + \Delta a_i \Delta b_i = 2d(\Delta a_i + \Delta b_i) + |P|.$$

Результатом математических преобразований становится следующая задача для параллелепипеда Q_0 [Там же]:

$$a_0^2 \Delta U - \frac{\partial U}{\partial t} = 0, \quad \vec{x} \in Q_0, \quad t_0 < t < t^*,$$

$$U|_{t=t_0} = \phi(\vec{x}), \quad \vec{x} \in Q_i, \quad i = \overline{0, N},$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=\pm a} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial y} \Big|_{y=\pm b} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial z} \Big|_{z=c} = 0, \quad (4)$$



Р и с. 2. Расположение капли на катоде Q_0 в декартовой системе координат XYZ
 F i g. 2. The location of a drop on the cathode Q_0 in the Cartesian coordinate system XYZ

$$\frac{\partial U}{\partial z} + h_0 U = 0, \quad z = 0, \quad (x, y) \notin \bigcup_{i=1}^N \Omega_i, \quad \frac{\partial U}{\partial z} + h_0 U = \psi(t), \quad (x, y) \in \bigcup_{i=1}^N \bar{\Omega}_i, \quad t > 0.$$

$$\frac{\partial U}{\partial z} + h_0 U = q_0 - \left[c_0 \frac{\partial U}{\partial t} + c_1 U + c_2 f(U) \right],$$

$$z = 0, \quad (x, y) \in \bigcup_{i=1}^N \bar{\Omega}_i.$$

Данная задача определена только в области Q_0 , так как граничное условие для температуры U заменяет все уравнения теплового баланса в каплях.

Результаты исследования

Для определения температуры катода в форме параллелепипеда Q_0 решение задачи (4) состоит из двух этапов [Там же].

Первый этап

Пусть U^0 – решение задачи (5). С помощью найденного решения определим, что

$$\psi(t) = q_0 - \left[c_0 \frac{\partial U^0}{\partial t} + c_1 U^0 + c_2 f(U^0) \right];$$

$$(x, y) \in \Omega_i. \quad (5)$$

Второй этап

Сложный нелинейный теплообмен между каплями Q_i , $i=1, N$ и катодом Q_0 в граничном условии задачи (4) заменяется линейным:

Для решения задачи применим вторую формулу Грина и функцию Грина $G(\vec{x}, \vec{\xi}, t - \tau)$, которая является решением соответствующей задачи² [20], где $\vec{\xi} = (\xi, \eta, \zeta)$, $t, \tau > 0$. Тогда параллелепипед можно рассматривать как полупространство для капли, подставив в формулу (5) $a = b = c = +\infty$.

Наиболее простым для численной реализации является случай полупространства $\{z > 0, x' \in R^2\}$ в качестве параллелепипеда Q_0 , на границу $\{z = 0\}$ которого нанесена единственная капля $\{N = 1\}$, и значения коэффициента теплоотдачи $\alpha_n = 0$; следовательно, $h_0 = 0$, то есть учитывается только теплообмен между каплей и катодом.

Вторая формула Грина и данная функция Грина приводят задачу (4) к эквивалентному ей нелинейному интегральному уравнению следующего вида [20]:

$$U(\vec{x}, t) = U_{\wedge}(\vec{x}, t, t') -$$

$$- a_0^2 \int_{t'}^t d\tau \iint_{00}^{a'b'} G(\vec{x}, \eta, \zeta, 0, t - \tau) Q(U) d\eta d\zeta, \quad (6)$$

где $a' = \Delta a/2$, $b' = \Delta b/2$ – половинные длины сторон капли;

² Ладженская О. А., Солонников В. А., Уральцева Н. Н. Линейные и квазилинейные уравнения параболического типа. М.: Наука, 1967. 736 с.; Friedman A. Partial differential equations of parabolic type. R. E. Krieger Pub. Co., 1983. 347 p.

$$U_{\wedge}(\vec{x}, t) = \iiint_{0 \ 0 \ 0}^{\infty \ \infty \ \infty} G(\vec{x}, \vec{\xi}, t - t') U(\vec{\xi}, t') d\vec{\xi} +$$

$$+ a_0^2 \int_{t'}^t d\tau \iiint_0^a G(\vec{x}, \xi, \eta, 0, t - \tau) q_0(\xi, \eta, 0, \tau) d\xi d\eta,$$

$$Q(U) = c_0 \frac{\partial U(\xi, \eta, 0, \tau)}{\partial \tau} + c_1 U(\xi, \eta, 0, \tau) + c_2 f(U(\xi, \eta, 0, \tau)).$$

Интегральные соотношения (6), как и задача (5), приближенно описывают процесс передачи тепла катоду капель, помещенной на его границу.

В подынтегральном выражении уравнения (6) функция $U = U(\xi, \eta, 0)$ рассматривается в области, в которой она почти постоянна по ξ, η . Поэтому, подставив в уравнение (6) $z = 0$ и проинтегрировав его [Там же], получим нелинейное интегральное уравнение типа Вольтера:

$$\Delta a \Delta b U(t) = U_{\wedge}(t) - a_0^2 \int_0^t G(t - \tau) Q(U(\tau)) d\tau \quad (7)$$

относительно усредненной функции

$$U(t) = \frac{1}{\Delta a \Delta b} \int_0^a \int_0^b U(x, y, 0, t) dx dy.$$

Здесь

$$G(t - \tau) = \int_0^a \int_0^b \int_0^b G \Big|_{\substack{z=0 \\ \xi=0}} dx dy d\xi d\eta =$$

$$+ \frac{1}{\sqrt{\pi a_0(t - \tau)}} \left[a \Phi \left(\frac{a}{\sqrt{a_0(t - \tau)}} \right) + \sqrt{\frac{t - \tau}{\pi}} \left(e^{-\frac{a^2}{a_0(t - \tau)}} - 1 \right) \right] \times$$

$$\times \left[b \Phi \left(\frac{b}{\sqrt{a_0(t - \tau)}} \right) + \sqrt{\frac{a_0(t - \tau)}{\pi}} \left(e^{-\frac{b^2}{a_0(t - \tau)}} - 1 \right) \right],$$

$$U_{\wedge}(x, y, z, t) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^a \int_0^b G \Big|_{\tau=0} d\xi d\eta dz dx dy,$$

где $\Phi(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^x e^{-t^2} dt$ – интеграл вероятности³.

Для численного решения задачи (6) введем пространственную и временную сетку (x_i, y_j, z_k) , $i = \overline{1, N_1}$, $j = \overline{1, N_2}$, $k = \overline{1, N_3}$, $\{0 = t_0 < t_1 < \dots < t_{N_0} = t^*\}$.

Тогда $U_n^{ijk} = (x_i, y_j, z_k, t_n)$ – температура в узле (x_i, y_j, z_k) в момент времени $t = t_n$. Производную по времени заменяем разностным соотношением $\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{U_n - U_{n-1}}{\Delta \tau_n}$, где $U_n = U|_{t=t_n}$, $\Delta \tau_n = t_n - t_{n-1}$.

В уравнении (7) заменяем в подынтегральном выражении $U(t)$ на $\frac{U_n + U_{n-1}}{2}$ и получаем:

$$\Delta a \Delta b U_n = U_{\wedge n} - G_n \left[c_0 \frac{U_n - U_{n-1}}{\Delta \tau} + c_1 \frac{U_n + U_{n-1}}{2} + c_2 f \left(\frac{U_n + U_{n-1}}{2} \right) \right], \quad (8)$$

где: $G_n = \int_{t_{n-1}}^{t_n} G(t_n - \tau) d\tau$.

Решение нелинейного уравнения (5) описывает температурное поле катода под основанием капли в момент $t = t_n$. Поле внутри параллелепипеда определяется простой квадратурой (6), имеющей следующий вид [20]:

$$U(x, y, z, t_n) = U_{\wedge}(x, y, z, t_n) - a_0^2 \int_{t_{n-1}}^{t_n} G(x, y, z, t_n - \tau) Q_n(U_n) d\tau, \quad (9)$$

³ Friedman A. Partial differential equations of parabolic type. R. E. Krieger Pub. Co., 1983. 347 p.; Санчес-Паленсия Э. Неоднородные среды и теория колебаний / Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 472 с. URL: <http://bookre.org/reader?file=441528>

где

$$U_{\wedge}(x, y, z, t_n) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} G_{|_{\tau=t_{n-1}}} U_{n-1}(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta + \int_0^{t_n} G(x, y, z, t_n - \tau) q_0(\tau) d\tau, \quad (10)$$

$$G(x, y, z, t - \tau) = \int_0^a \int_0^b G_{|\zeta=0} d\xi d\eta = \frac{\exp\left\{-\frac{z^2}{4a_0(t-\tau)}\right\}}{4\sqrt{\pi a_0(t-\tau)}} \left[\Phi\left(\frac{x+a}{2\sqrt{a_0(t-\tau)}}\right) - \Phi\left(\frac{x-a}{2\sqrt{a_0(t-\tau)}}\right) \right] \times \\ \times \left[\Phi\left(\frac{y+b}{2\sqrt{a_0(t-\tau)}}\right) - \Phi\left(\frac{y-b}{2\sqrt{a_0(t-\tau)}}\right) \right],$$

$$Q_n(U_n) = c_0 \frac{U_n - U_{n-1}}{\Delta \tau} + c_1 \frac{U_n + U_{n-1}}{2} + c_2 f\left(\frac{U_n + U_{n-1}}{2}\right).$$

Для численных расчетов интеграл (10) заменим на тройную сумму следующего вида:

$$\int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} G_{|_{\tau=t_{n-1}}} U_{n-1}(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta = \sum_{i_1}^{N_1} \sum_{j_1}^{N_2} \sum_{k_1}^{N_3} G_{n i_1 j_1 k_1}^{ijk} \bar{U}_{n-1}^{i_1 j_1 k_1},$$

$$\text{где } G_{n i_1 j_1 k_1}^{ijk} = \int_{x_{i-1}}^{x_i} \int_{y_{j-1}}^{y_j} \int_{z_{k-1}}^{z_k} G(x_i, y_j, z_k, \Delta t) d\xi d\eta d\zeta.$$

Среднеарифметическое значение функции относительно восьми узлов параллелепипеда $(x_{i-1}, x_i) \times (y_{j-1}, y_j) \times (z_{k-1}, z_k)$, $U_n^{ijk} = U(x_i, y_j, z_k, t_n)$, $i = \overline{1, N_1}$, $j = \overline{1, N_2}$, $k = \overline{1, N_3}$, определяется по формуле:

$$\bar{U}_{n-1}^{ijk} = \frac{U_{n-1}^{i-1, j-1, k-1} + U_{n-1}^{i-1, -1, k} + U_{n-1}^{i-1, j, k-1} + U_{n-1}^{i-1, j, k} + U_{n-1}^{i, j-1, k-1} + U_{n-1}^{i, j-1, k} + U_{n-1}^{i, j, k-1} + U_{n-1}^{i, j, k}}{8}. \quad (11)$$

Так как решение $U_{n-1}(\xi, \eta, \zeta)$ является убывающим от нуля до бесконечности по переменным ξ, η, ζ , очевидно, что узловые точки $\{x_i\}_{i=1}^{N_1}$, $\{y_j\}_{j=1}^{N_2}$, $\{z_k\}_{k=1}^{N_3}$

следует уплотнить вблизи начала координат. С учетом вышеизложенного получаем окончательные выражения для определения температурного поля в узлах x_i, y_j, z_k параллелепипеда [Там же]:

$$U_n^{ijk} = U_{\wedge}^{ijk} - a_0^2 Q_n \int_{t_{n-1}}^{t_n} G(x_i, y_j, z_k, t_n - \tau) d\tau, \\ U_{\wedge}^{ijk} = \sum_{i_1=1}^{N_1} \sum_{j_1=1}^{N_2} \sum_{k_1=1}^{N_3} G_{n i_1 j_1 k_1}^{ijk} U_{n-1}^{i_1 j_1 k_1} + q_0 \int_{t_{n-1}}^{t_n} G_n(x_i, y_j, z_k, t_n - \tau) d\tau \quad (12)$$

После этого получим все данные для перехода к следующему временно-му отрезку $[t_n, t_{n+1}]$.

Отметим, что такая математическая модель не учитывает влияние остальных капель на искомый поток. Для учета подобного влияния необходимо рассмотреть систему нелинейных интегральных уравнений следующего вида:

$$\Delta a_i \Delta b_i U_i(t) = U_{\wedge i}(t) - a_0^2 \int_{t_{n-1}}^{t_n} \sum_{j=1}^N G_{ij}(t - \tau) Q(U_j(\tau)) d\tau, \quad (13)$$

где $G_{ij}(t - \tau) = \int_{a_{1i}}^{a_{2i}} \int_{b_{1i}}^{b_{2i}} \int_{a_{1i}}^{a_{2i}} \int_{b_{1i}}^{b_{2i}} G \Big|_{\substack{z=0 \\ \zeta=0}} dx dy d\xi d\eta$, $a_{1i}, a_{2i}, b_{1i}, b_{2i}$ – координаты i -ой капли; $N = 4$ (в данном случае).

Дискретизация по времени t преобразует систему (13) в систему нелинейных алгебраических уравнений:

$$\Delta a_i \Delta b_i U_i = U_{\wedge i} - a_0^2 \sum_{j=1}^N G_{ij} Q(U_j). \quad (14)$$

При этом поле внутри параллелепипеда определяется так:

$$U(x, y, z, t) = U_{\wedge}(x, y, z, t) - a_0^2 \sum_{i=1}^N \int_{t_{n-1}}^{t_n} \int_{a_{1i}}^{a_{2i}} \int_{b_{1i}}^{b_{2i}} G_{|\zeta=0} Q(U) \Big|_{\zeta=0} d\xi d\eta d\tau. \quad (15)$$

Таким образом, определив поток $Q(U)$ из одной капли в параллелепипед, можем начать рассмотрение упорядоченного (периодического по переменным x, y) множества капель [Там же].

Однако решение системы нелинейных уравнений вида (14) с последующим определением поля в области Q по формуле вида (15) становится трудоемким. Поэтому для решения задачи нелинейный поток из капель в параллелепипед заменяется линейным, что является более предпочтительным [Там же].

По представленному алгоритму создан пакет программ и проведены численные расчеты определения температурного поля параллелепипеда⁴.

С учетом функций в выражениях (7) и (9) для численного интегрирования применялись квадратурные формулы⁵ с весовой функцией $1/\sqrt{t}$. Пробные вычисления по разработанному алгоритму показали эффективность выбранного метода.

Расчеты проводились с учетом следующих данных [Там же].

1. Размеры капли: $\Delta a_i / 2 = 10^{-2}$ см; $\Delta b_i / 2 = 2 \cdot 10^{-2}$ см; $d = 10^{-2}$ см. Здесь размеры капли приняты неодинаковыми в ее основании, что соответствует более общей задаче – обработке посредством ЭИЛ не плоской ($\Delta a = \Delta b$), а криволинейной поверхности.

2. Теплофизические константы: $T = 20$ °С; $T_0 = 1\,400$ °С (начальная температура капли); $q_0 = 0$.

3. Материал капли – вольфрам (W): $\lambda_k = 1,73$ Вт/см · °С; $\rho_k = 19,25$ г/см³; $c_k = 0,15$ Дж/г · К; $\alpha_k = 0,001$ Вт/(см² · °С).

4. Материал катода – железо (Fe): $\lambda_k = 0,733$ Вт/см · °С; $\rho_k = 7,87$ г/см³; $c_k = 0,46$ Дж/г · К; $\alpha_k = 0,001$ Вт/(см² · °С).

5. Узлы пространственной сетки, см:

$\{x_{i=1}^6\} = 0; 0,005; 0,01; 0,011; 0,013; 0,017;$
 $\{y_{i=1}^6\} = 0; 0,01; 0,02; 0,022; 0,026; 0,034;$
 $\{z_{i=1}^6\} = 0; 0,001; 0,003; 0,006; 0,01; 0,015.$

Динамика температурного поля некоторых точек поверхности представлена в таблице. В круглых скобках даны координаты точек, обозначенных на

Т а б л и ц а

Table

Динамика температурного поля точек на поверхности в зависимости от времени

The dynamics of the temperature field of points on the surface depending on time

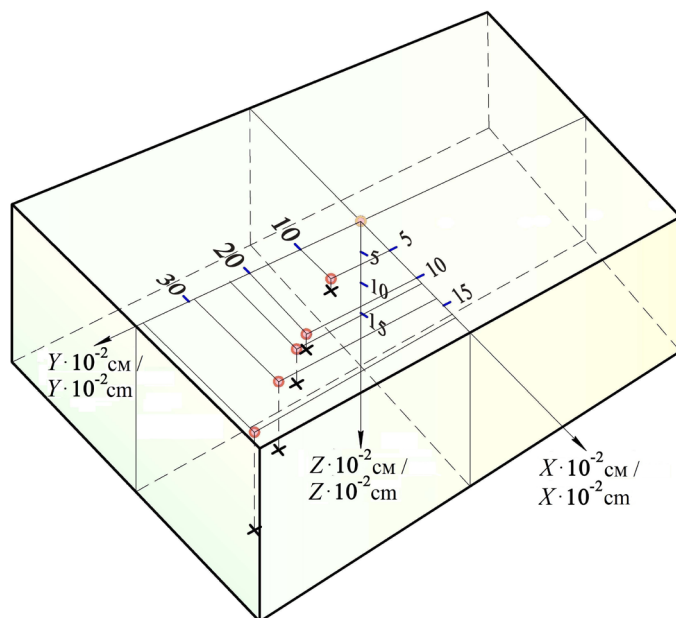
Время / Time	Координаты точек / The coordinates of the points									
	(1,1)	(2,1)	(2,2)	(3,1)	(3,2)	(3,3)	(4,1)	(4,2)	(4,3)	(4,4)
$t = 1 \cdot 10^{-5}$ с / $t = 1 \cdot 10^{-5}$ s	1 078	1 043	1 042	541	540	270	294	293	147	65
$t = 2 \cdot 10^{-5}$ с / $t = 2 \cdot 10^{-5}$ s	904	835	790	467	439	228	323	299	156	96
$t = 3 \cdot 10^{-5}$ с / $t = 3 \cdot 10^{-5}$ s	775	712	660	419	386	209	310	281	155	105
$t = 4 \cdot 10^{-5}$ с / $t = 4 \cdot 10^{-5}$ s	670	617	568	375	342	193	287	258	148	106
$t = 5 \cdot 10^{-5}$ с / $t = 5 \cdot 10^{-5}$ s	585	538	495	334	305	177	260	234	139	103

⁴ Программный комплекс для моделирования теплопереноса материала при электрофизическом воздействии : свидетельство о гос. регистрации прог. для ЭВМ / Власенко В. Д., Колисова М. В. № 2017611479 ; заявл. 06.12.16 ; опубл. 03.02.17. URL: http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=EVM&rn=4256&DocNumber=2017611479&TypeFile=html

⁵ Крылов В. И., Шульгина Л. Т. Справочная книга по численному интегрированию. М. : Наука, 1966. 372 с.

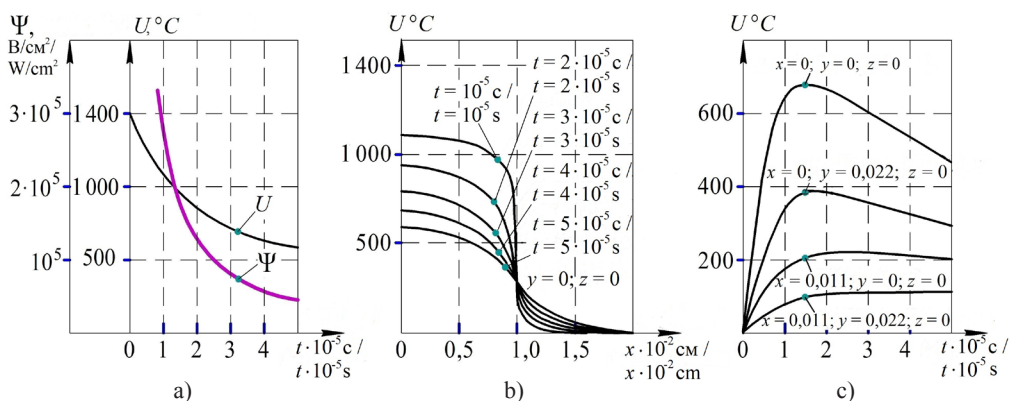
рис. 3. Числа n и m в круглых скобках указывают на номер координаты вектора $\vec{x} = \{x_i\}$ и вектора $\vec{y} = \{y_i\}$ (например, точка (3, 1) таблицы соответствует точке (x_3, y_1) на плоскости xOy) [Там же].

На рис. 4 представлена динамика температурного поля и вычисляемого потока в соответствии с формулой (5). Кривые на рис. 4, а иллюстрируют убывание температурного поля начала ко-



Р и с. 3. Схема расположения точек, в которых вычислялась температура

F i g. 3. The location of the points at which the temperature was calculated



Р и с. 4. Динамика температурного поля и теплового потока: а) изменение температуры капли (линия U) и теплового потока (линия ψ) во времени; б) зависимость температуры поверхности октанта от координаты в сечении $y = 0, z = 0$; в) изменение температуры внутренних точек октанта, расположенных вне основания капли, во времени

F i g. 4. The dynamics of the temperature field and heat flux: а) change in temperature of the droplet (line U) and heat flux (line ψ); б) the dependence of the octant surface temperature on the coordinate in the section $y = 0, z = 0$; в) the temporal variation of the temperature of the internal octant points located outside the base of the drop

ординат (линия U) и потока (линия ψ). На рис. 4, б показана динамика температурного поля сечения $y = 0, z = 0$; на рис. 4, с – динамика точек, расположенных вне основания капли [Там же].

Обсуждение и заключение

Анализ полученных результатов показывает, что поле в точках, расположенных в основании капли, постоянно убывает (рис. 4, а); в точках, расположенных вне основания капли (как на поверхности, так и в глубине катода), сначала возрастает, а затем убывает вместе с полем капли (рис. 4, с). Это свидетельствует о том, что, пока капля достаточно горячая, тепла к данным точкам прибывает больше, чем убывает, что и приводит к увеличению температуры. Однако по мере охлаждения капли приток тепла становится меньшим, чем отток, что приводит к уменьшению температуры [Там же].

Чем ближе расположена точка к поверхности капли, тем более резко возрастает температура в начальный момент времени и тем раньше она стабилизируется и начинает убывать.

Температура в точках, расположенных симметрично относительно границы капли, симметрично изменяется относи-

тельно температуры границы. Температура на границе капли примерно в два раза ниже температуры в центре капли.

Предложенная модель реализована численно для случая одной капли, помещенной на границу теплопроводящего полупространства. Разработанный численный метод расчета позволяет приближенно описать процесс остывания одной капли и затем использовать полученную информацию для усредненного описания эффекта нагрева параллелепипеда группой капель [Там же].

Применительно к ЭИЛ построен алгоритм и проведены численные расчеты для определения значений температуры во всех точках, а также температурного потока в катоде (параллелепипеде) в случае одной среднестатистической капли на его грани. Сложный нелинейный теплообмен между каплей и катодом заменяется линейным теплообменом. Предложенный метод расчета для усредненного описания эффекта нагрева тела параллелепипеда рядом таких капель находит практическое применение в выборе материала анода в зависимости от эрозионной стойкости при получении покрытий с заданными функциональными свойствами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Electrospray alloying of titanium and its alloys: the physical, technological, and practical aspects. Part I. The peculiarities of the mass transfer and the structural and phase transformations in the surface layers and their wear and heat resistance / V. V. Mikhailov [et al.] // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2013. Vol. 49, issue 5. P. 373–395. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375513050074>
2. Власенко В. Д., Мулин Ю. И. Формирование износо- и жаростойких покрытий на поверхностях титановых сплавов методом электроискрового легирования // *Физика и химия обработки материалов*. 2015. № 1. С. 79–84.
3. The formation of protective coatings on tungsten-containing hard alloys by electrospray alloying with metals and borides / A. D. Verkhoturov [et al.] // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2011. Vol. 2, issue 2. P. 180–185. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2075113311020213>
4. Contribution of electrospray alloying to the oxidation resistance of hard tungsten alloys / A. D. Verkhoturov [et al.] // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2008. Vol. 47, no. 1-2. P. 112–115. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11106-008-0015-2>
5. Microstructure and cavitation erosion characteristics of Al–Si alloy coating prepared by electrospray deposition / W. Wang [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. 2008. Vol. 202, issue 21. P. 5116–5121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.05.013>

6. Исследование жаростойких свойств покрытий после электроискрового легирования стали 45 хромоникелевыми сплавами / А. В. Козырь [и др.] // Письма о материалах. 2018. Т. 8, № 2. С. 140–145. DOI: <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2018-2-140-145>
7. **Sun P.-F., Zhang L.-Q., Lin J.-P.** Corrosion behaviour of Ti-45Al-8Nb coating on 304 stainless steel by electrospark deposition in molten zinc // Transactions of materials and heat treatment. 2014. Vol. 35, issue 2. P. 151–156. URL: https://www.researchgate.net/publication/289541667_Corrosion_behaviour_of_Ti-45Al-8Nb_coating_on_304_stainless_steel_by_electrospark_deposition_in_molten_zinc
8. Fabrication of stainless steel microstructure surface by electro-spark deposition / W. Wang [et al.] // Surface technology. 2017. Vol. 46, issue 5. P. 159–164. DOI: <https://doi.org/10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.05.026>
9. **Ivanov V. I., Verkhoturov A. D., Konevtsov L. A.** The development of criteria for evaluating the effectiveness of the surface layer formation and its properties in the process of electrospark alloying. Part I. The state of the issue. Kinetic and functional criteria of the efficiency of a doped layer's formation // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2017. Vol. 53, issue 3. P. 218–223. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375517030061>
10. **Ivanov V. I., Verkhoturov A. D., Konevtsov L. A.** The development of criteria for evaluating the effectiveness of the surface layer formation and its properties in the process of electrospark alloying (ESA). Part 2. The criteria of the effectiveness of the ESA process and electrospark coatings // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2017. Vol. 53, issue 3. P. 224–228. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375517030073>
11. Electrophysical model of the erosion of electrodes under the energy pulse effect / P. S. Gordienko [et al.] // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2011. Vol. 47, issue 3. P. 206–216. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375511030045>
12. On the problem of creating a new scientific school in the field of electric erosion machining: Electrode material science / A. D. Verkhoturov [et al.] // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2010. Vol. 46, issue 5. P. 523–533. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375510050194>
13. Влияние природы электродных материалов на эрозию и свойства легированного слоя. Критерии оценки эффективности электроискрового легирования / А. Д. Верхотуров [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 302–320. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.302-320>
14. **Смагин С. И., Власенко В. Д., Мулин Ю. И.** Моделирование параметров процесса электроискрового легирования для образования функциональных поверхностей // Вычислительные технологии. 2009. Т. 14, № 3. С. 79–85. URL: <http://www.ict.nsc.ru/jct/annotation/1303>
15. **Верхотуров А. Д., Иванов В. И., Коневцов Л. А.** Критерии оценки эффективности процесса электроискрового легирования // Труды ГОСНИТИ. 2011. Т. 107, № 2. С. 131–137.
16. **Xie Y.-J., Wang M.-C.** Epitaxial MCrAlY coating on a Ni-base superalloy produced by electrospark deposition // Surface and Coatings Technology. 2006. Vol. 201, no. 6. P. 3564–3570. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.08.107>
17. Electro-spark alloying using graphite electrode on titanium alloy surface for biomedical applications / T. Chang-bin [et al.] // Applied Surface Science. 2011. Vol. 257, no. 15. P. 6364–6371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.01.120>
18. Single-spark analysis of electro-discharge deposition process / B. Muralidharan [et al.] // Materials and Manufacturing Processes. 2016. Vol. 31, issue 14. P. 1853–1864. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1127936>
19. **Beck J. V.** Transient temperatures in a semi-infinite cylinder heated by a disk heat source // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1981. Vol. 24, issue 10. P. 1631–1640. DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(81\)90071-5](https://doi.org/10.1016/0017-9310(81)90071-5)
20. **Верхотуров А. Д., Козырь А. В., Коневцов Л. А.** Научные основы разработки и получение слоистых материалов на поверхности твердых сплавов : монография. Владивосток : Дальнаука. 2016. 475 с. URL: http://www.im.khv.ru/metod/Science_basics_of_hard_materials.pdf

21. **Vlasenko V. D., Kolisova M. V.** Modeling of the temperature field on the cathode's surface during electrophysical impact // Contemporary Engineering Sciences. 2016. Vol. 9, no 6. P. 249–256. DOI: <https://doi.org/10.12988/ces.2016.611>

Поступила 11.02.2019; принята к публикации 22.04.2019; опубликована онлайн 28.06.2019

Об авторах:

Власенко Виктор Дмитриевич, ученый секретарь, ФГБУН «Вычислительный центр Дальневосточного отделения Российской академии наук» (680000, Россия, г. Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, д. 65), кандидат физико-математических наук, ResearcherID: E-2432-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7782-4532>, centik1960@yandex.ru

Иванов Валерий Игоревич, заведующий, лаборатория электроискровых и термодиффузионных процессов, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат технических наук, ResearcherID: H-4076-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4568-8553>, tehnoinvest-vip@mail.ru

Аулов Вячеслав Федорович, ведущий научный сотрудник, лаборатория электроискровых и термодиффузионных процессов, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат технических наук, ResearcherID: E-4179-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6925-1260>, gosniti@mail.ru

Коневцов Леонид Алексеевич, научный сотрудник, ФГБУН «Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук» (680042, Россия, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, д. 153), кандидат технических наук, ResearcherID: H-4087-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7212-3953>, konevts@narod.ru

Мартынова Елена Геннадьевна, аспирант, кафедры технического сервиса машин, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), ResearcherID: C-5023-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6870-0498>, el.mart2012@yandex.ru

Хасан Исмаил Халил, аспирант, кафедры физики твердого тела, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), ResearcherID: C-5025-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4560-1016>, srorismael@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

В. Д. Власенко – разработка концепции и плана статьи, проведение теоретических исследований; В. И. Иванов – разработка алгоритма нахождения температурного поля, редактирование статьи; В. Ф. Аулов – анализ результатов; Л. А. Коневцов – формулировка выводов, написание текста; Е. Г. Мартынова – экспериментальные исследования, обзор и анализ литературы; И. Х. Хасан – участие в подготовке исходных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Mikhailov V.V., Gitlevich A.E., Mikhailyuk A.I., Verkhoturov A.D., Belyakov A.V., Konevtsov L.A. Electrospark alloying titanium and its alloys: the physical, technological, and practical aspects. Part I. The peculiarities of the mass transfer and the structural and phase transformations in the surface layers and their wear and heat resistance. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2013; 49(5):373-395. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375513050074>
2. Vlasenko V.D., Mulin Yu.I. Formation of wear- and heat-resistant coatings on the surface of Ti alloys by electro-sparking alloying. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* = Physics and Chemistry of Materials Treatment. 2015; 1:79-84. (In Russ.)

3. Verkhoturov A.D., Gordienko P.S., Podchernyaeva I.A., Konevtsov L.A., Panin E.S. The formation of protective coating on tungsten-containing hard alloys by electrospark alloying with metals and borides. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2011; 2(2):180-185. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2075113311020213>
4. Verkhoturov A.D., Konevtsov L.A., Shpilev A.M., Gordienko P.S., Panin E. S., Podchernyaeva I.A., et al. Contribution of the electrospark alloying to the oxidation resistance of hard tungsten alloys. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2008; 47(1-2):112-115. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11106-008-0015-2>
5. Wang W., Wang M., Sun F., Zheng Y., Jiao J. Microstructure and cavitation erosion characteristics of Al-Si alloy coating prepared by electrospark deposition. *Surface and Coatings Technology*. 2008; 202(21):5116-5121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.05.013>
6. Kozyr A.V., Konevtsov L.A., Kononov S.V., Kovalenko S.V., Ivashenko V.I. Research on heat resistance properties of coatings deposited by electrospark alloying on steel C45 by nickel-chromium alloys. *Pisma o materialakh* = Letters on Materials. 2018; 8(2):140-145. DOI: <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2018-2-140-145>
7. Sun P.-F., Zhang L.-Q., Lin J.-P. Corrosion behaviour of Ti-45Al-8Nb coating on 304 stainless steel by electrospark deposition in molten zinc. *Transactions of Materials and Heat Treatment*. 2014; 35(2):151-156. Available at: https://www.researchgate.net/publication/289541667_Corrosion_behaviour_of_Ti-45Al-8Nb_coating_on_304_stainless_steel_by_electrospark_deposition_in_molten_zinc
8. Wang W., Xie J., Zhang B., Ruan W., Han C. Fabrication of stainless steel microstructure surface by electro-spark deposition. *Surface Technology*. 2017; 46(5):159-164. DOI: <https://doi.org/10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.05.026>
9. Ivanov V.I., Verkhoturov A.D., Konevtsov L.A. The development of criteria for evaluating the effectiveness of the surface layer formation and its properties in the process of electrospark alloying. Part I. The state of the issue. Kinetic and functional criteria of the efficiency of a doped layer's formation. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2017; 53(3):218-223. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375517030061>
10. Ivanov V.I., Verkhoturov A.D., Konevtsov L.A. The development of criteria for evaluating the effectiveness of the surface layer formation and its properties in the process of electrospark alloying (ESA). Part 2. The criteria of the effectiveness of the ESA process and electrospark coatings. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2017. 53(3):224-228. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375517030073>
11. Gordienko P.S., Zhevzun I.G., Panin E.S., Shabalin I.A., Verkhoturov A.D., Dostovalov V.A., et al. Electrophysical model of the erosion of electrodes under the energy pulse effect. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2011; 47(3):206-216. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375511030045>
12. Verkhoturov A.D., Podchernyaeva I.A., Ivanov V.I., Konevtsov L.A. On the problem of creating a new scientific school in the field of electric erosion machining: electrode material science. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2010; 46(5):523-533. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375510050194>
13. Verkhoturov A.D., Ivanov V.I., Dorokhov A.S., Konevtsov L.A., Velichko S.A. Effect of the nature of electrode materials on erosion and properties of doped layers. The criteria for evaluating the effectiveness of electrospark alloying. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):302-320. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.302-320> (In Russ.)
14. Smagin S.I., Vlasenko V.D., Mulin Y.I. Parameters modelling for an electro-sparking alloying process for formation of functional surfaces. *Vychislitelnyye tekhnologii* = Computational Technologies. 2009; 14(3):79-85. Available at: <http://www.ict.nsc.ru/jct/annotation/1303> (In Russ.)
15. Verkhoturov A.D., Ivanov V.I., Konevtsov L.A. Evaluation criteria of efficiency of process of electric-spark alloying. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2011; 107(2):131-137. (In Russ.)
16. Xie Y.J., Wang M.C. Epitaxial MCrAlY coating on a Ni-base superalloy produced by electrospark deposition. *Surface and Coatings Technology*. 2006; 201(6):3564-3570. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.08.107>

17. Chang-Bin T., Dao-Xin L., Zhan W., Yang G. Electro-spark alloying using graphite electrode on titanium alloy surface for biomedical applications. *Applied Surface Science*. 2011; 257(15):6364-6371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.01.120>
18. Muralidharan B., Chelladurai H., Singh P., Kumar M. Single spark analysis of electro-discharge deposition process. *Materials and Manufacturing Processes*. 2016; 31(14):1853-1864. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1127936>
19. Beck J.V. Transient temperatures in a semi-infinite cylinder heated by a disk heat source. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1981; 24(10):1631-1640. DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(81\)90071-5](https://doi.org/10.1016/0017-9310(81)90071-5)
20. Verkhoturov A.D., Kozyr A.V., Konevtsov L.A. [Scientific basis for the development and production of layered materials on the surface of hard alloys]. Vladivostok: Dalnauka; 2016. Available at: http://www.im.khv.ru/metod/Science_basics_of_hard_materials.pdf (In Russ.)
21. Vlasenko V.D., Kolisova M.V. Modeling of the temperature field on the cathode's surface during electrophysical impact. *Contemporary Engineering Sciences*. 2016; 9(6):249-256. DOI: <https://doi.org/10.12988/ces.2016.611>

Received 11.02.2019; revised 22.04.2019; published online 28.06.2019

About authors:

Victor D. Vlasenko, Scientific Secretary, Computing Center of Far Eastern Branch RAS (65 Kim Yu Chen St., Khabarovsk 680000, Russia), Ph.D. (Physics and Mathematics), ResearcherID: E-2432-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7782-4532>, centik1960@yandex.ru

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

Vyacheslav F. Aulov, Leading Researcher, Laboratory of Electrosark and Thermal Diffusion Processes, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: E-4179-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6925-1260>, gosniti@mail.ru

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

Elena G. Martynova, Postgraduate Student, Chair of Technical Service of Machines, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), ResearcherID: C-5023-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6870-0498>, el.mart2012@yandex.ru

Ismail H. Hasan, Postgraduate Student, Chair of Solid State Physics, Institute of Physics and Chemistry, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), ResearcherID: C-5025-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4560-1016>, srorismael@gmail.com

Contribution of the authors:

V. D. Vlasenko – the development of concept and plan of the article, conducting theoretical research; V. I. Ivanov – the development of algorithm for finding the temperature field, edition of the article; V. F. Aulov – the analysis of the results; L. A. Konevtsov – the formulation of conclusions, writing the text; E. G. Martynova – experimental research, review and analysis of literature; I. H. Hasan – participation in the preparation of the initial data.

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



Согласованные движения электронов на поверхности графена

А. В. Юденков¹, А. М. Володченков^{2*}, М. А. Юденкова³

¹ФГБОУ ВО «Смоленская государственная академия физической культуры, спорта и туризма» (г. Смоленск, Россия)

²Смоленский филиал ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова» (г. Смоленск, Россия)

³ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (г. Долгопрудный, Россия)

*alexmw2012@yandex.ru

Введение. Актуальной задачей является развитие теории графена для поиска способов управления его физическими и механическими свойствами. В статье исследованы электропроводные свойства графена (в частности, линейный закон дисперсии электронов и следствия из этого закона).

Материалы и методы. В качестве материала для построения теории были использованы проверенные экспериментальные данные, а также основные положения физики твердого тела и квантовой механики. В статье использован универсальный синергетический принцип, согласно которому строятся две разноуровневые согласованные математические модели движения квазичастиц в графене при воздействии электрического поля. На макроскопическом уровне графен предложено рассматривать как кристалл, состоящий из трех параллельных плоскостей: две плоскости представляют собой электронный газ, еще одна является основной частью кристалла. На микроскопическом уровне движение квазичастиц электронной волны описывается уравнением Шредингера.

Результаты исследования. Получен альтернативный метод вывода линейного закона дисперсии в графене на макроскопическом уровне. На основе анализа модели предложена гипотеза о согласованном движении пар электронов, образующих бозон. Данная гипотеза отличается от традиционной, согласно которой квазичастицы в графене являются фермионами Дирака. Для проверки непротиворечивости гипотезы рассмотрен эффект Холла в графене. Также из уравнения Шредингера выведен линейный закон дисперсии для пары электронов. Как макроскопическая, так и микроскопическая модели в достаточной степени согласуются с опытными данными.

Обсуждение и заключение. Основным результатом статьи является построение многоуровневой математической модели, адекватно описывающей электропроводные свойства графена (линейный закон дисперсии, аномальный эффект Холла). Практическая значимость состоит в создании возможности регулирования электропроводных свойств графена путем воздействия на электронные пары.

Ключевые слова: графен, дисперсионный закон, эффект Холла, уравнение Шредингера, фермион Дирака

Для цитирования: Юденков А. В., Володченков А. М., Юденкова М. А. Согласованные движения электронов на поверхности графена // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 2. С. 234–247. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.234-247>

© Юденков А. В., Володченков А. М., Юденкова М. А., 2019



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

Cooperative Motion of Electrons on the Graphene Surface

A. V. Yudenzov¹, A. M. Volodchenkov^{2*}, M. A. Iudenzova³

¹Smolensk State Academy of Physical Culture, Sport and Tourism
(Smolensk, Russia)

²Smolensk Branch of Plekhanov Russian University of Economics
(Smolensk, Russia)

³Moscow Institute of Physics and Technology
(Dolgoprudnyy, Russia)

*alexmw2012@yandex.ru

Introduction. Today, the development of the graphene theory to control its physical and mechanical properties is a relevant objective. The paper deals with the conducting properties of graphene. In particular, the paper investigates the linear law of electron dispersion and traces its corollaries.

Materials and Methods. The development of the theory is based on the verified experimental data and on the fundamental principles of the solid body theory and quantum mechanics. The study follows the universal synergetic principle according to which, there have been developed two split-level mathematical models of the quasi-particle motion in graphene on exposure to the electric field. On the macroscopic level, we suggest that graphene should be analyzed as a crystal consisting of three parallel planes. Two of them are electron gas. The remaining one is the main body of the crystal. On the microscopic level, the quasi-particle motion of the electron wave is described through the Schroedinger equation.

Results. The study has developed the alternative method for the explanation of the linear dispersion law in graphene on the macroscopic level. Basing on the analysis of the model, the paper provides a hypothesis of the cooperative motion of the electron pairs, which make up a boson particle. The given hypothesis is different from the traditional one. In accordance with the latter, quasi-particles in graphene are Dirac fermions. To prove the hypothesis consistency, the study examines Hall's effect in graphene. The linear dispersion law for a pair of electrons is also deduced from the Schroedinger equation. Both the macroscopic and microscopic models are in a reasonable agreement with the experimental data.

Discussion and Conclusion. The main result of the research is the development of the multi-level mathematical model which properly features the conducting properties of graphene (linear dispersion law, anomalous Hall effect). The practical relevance consists in revealing the possibility to control the conducting properties of graphene through impacts on electron pairs.

Keywords: graphene, dispersion law, Hall effect, Schroedinger equation, Dirac fermion

For citation: Yudenzov A.V., Volodchenkov A.M., Iudenzova M.A. Cooperative Motion of Electrons on the Graphene Surface. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(2):234-247. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.234-247>

Введение

Графен – первый и наиболее известный двумерный кристалл, полученный из обычного графита. Интерес к двумерным объектам появился достаточно давно; существуют теоретические исследования по изучению двумерно-

го газа. Л. Д. Ландау предполагал, что двумерный кристалл в принципе не может быть устойчивым. Однако в 2004 г. в университете Манчестера выпускники МФТИ А. Гейм и К. Новоселов получили образцы графена – двумерной модификации углерода [1–4].

Наличие образцов двумерного кристалла позволило вести целенаправленные экспериментальные и теоретические исследования. На данный момент известны свойства графена, делающие его действительно уникальным материалом. Графен обладает высокой механической прочностью, хорошо проводит электрический ток и тепло и т. д. [5–10]. Естественно, подобные свойства нуждаются в теоретическом описании.

В статье основное внимание будет уделено линейному закону дисперсии электронов в графене. Линейный закон дисперсии действует для безмассовых частиц; следовательно, квазичастицы, возникающие при прохождении тока в графене, имеют нулевую эффективную массу. Кроме того, считается, что квазичастицы в графене являются фермионами. Линейный закон дисперсии позволяет моделировать в графене процессы, аналогичные процессам в квантовой электродинамике, без привлечения высоких энергий. На наш взгляд, изучение и объяснение линейного закона дисперсии являются ключевыми вопросами для построения законченной

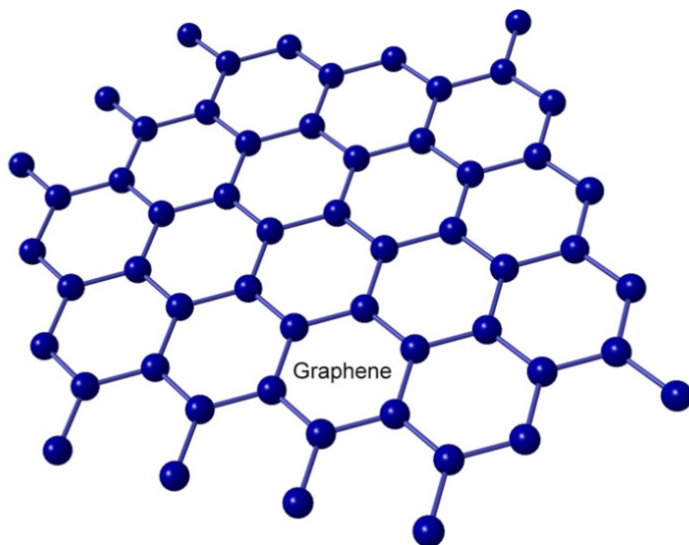
теории графена. К настоящему времени объяснению линейного закона дисперсии посвящено достаточно большое число работ.

В представленной статье предложено подойти к изучению линейного закона дисперсии электронов в графене с использованием универсального метода моделирования, предложенного в исследованиях по синергетике [11]. Авторами предложена макроскопическая модель движения электронов в графене; после ее анализа будет рассмотрена микроскопическая модель. В результате исследования должна быть получена простая и адекватная модель распространения электронной волны по поверхности графена, а также рассмотрено парное взаимодействие электронов.

Обзор литературы

Кристаллическая решетка графена представляет собой гексагональные соты (рис. 1).

Сама элементарная ячейка состоит из двух видов атомов. Расстояние между ближайшими атомами углерода $a = 0,142$ Нм; расстояние между двумя



Р и с. 1. Строение решетки графена
F i g. 1. The graphene lattice structure

одинаковыми атомами $a = 0,246$ Нм. Из четырех электронов, находящихся на внешней оболочке атома, три «жестко» зафиксированы связью sp^2 -гибридизированных орбиталей с соседними атомами. Оставшийся электрон располагается перпендикулярно основной плоскости кристалла, находясь в $2p_z$ состоянии. Именно данный электрон отвечает за электронные свойства графена [12]. С учетом требований минимума энергии для устойчивого состояния объемная модель сотовой ячейки имеет вид, представленный на рис. 2.

Одной из основополагающих работ, посвященных изучению дисперсионного закона электронов в угле-роде, считается статья П. Р. Уоллеса, опубликованная в 1947 г. [13]. Автором было показано, что энергетическая щель между валентной зоной и зоной проводимости отсутствует. Это приводит к выводу о линейности закона дисперсии, то есть линейной зависимости энергии от импульса квазичастицы:

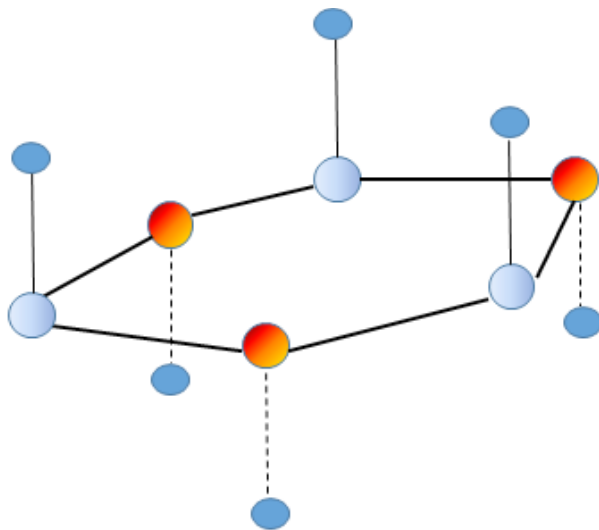
$$E = \hbar k v_F. \quad (1)$$

Здесь v_F – скорость Ферми; E – энергия квазичастицы.

Линейный закон дисперсии соответствует безмассовым частицам; следовательно, эффективная масса электрона в графите равна нулю. Обнаружить такое свойство в многослойном объемном кристалле экспериментально было практически невозможно. Однако после получения графена линейный закон дисперсии был обнаружен. Рассчитаны значимые характеристики, например, фазовая скорость электронов Дирака; изучен квантовый эффект Холла, который оказался дробным [14].

Успешные эксперименты привели к появлению теоретических работ, посвященных поведению электронов в графене. К настоящему времени построена достаточно обширная теория. Приведем необходимые для дальнейшего исследования сведения.

Построена зонная теория графена. В частности, на основе линейного закона дисперсии было составлено уравнение Дирака [2; 12]; точнее, уравнение, аналогичное уравнению Дирака, следующего вида:



Р и с. 2. Объемная модель сотовой ячейки

F i g. 2. The solid model of the cell

$$H = i\hbar \begin{pmatrix} \sigma \nabla & 0 \\ 0 & \sigma^* \nabla \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где σ – двумерный вектор, составленный из матриц Паули.

Общий вид решения уравнения (2) представлен формулой:

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \exp(i\theta) \end{pmatrix} \exp(k_x x + k_y y), \quad (3)$$

где k – квазиимпульс электрона в графене.

Подробно изучена система «электрон – дырка» [2]; сделан вывод о возможности образования электронно-дырочных пар, аналогичных парам Бардина – Купера – Шифера¹; исследованы свойства указанных пар.

В данной статье продолжено исследование электронных явлений в графене, при этом основное внимание уделено построению достаточно простой, но вполне адекватной модели распространения электронных волн, а также гипотезы об образовании системы «электрон – электрон».

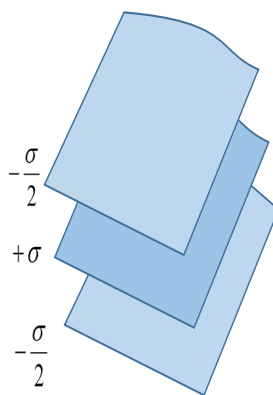
Материалы и методы

Построение макроскопической модели

Если рассматривать макроскопический образец графена, то распределение электронов сверху и снизу кристалла можно считать непрерывным.

Предложим следующую модель.

1. Графен представляет собой двумерную плоскость с поверхностной плотностью заряда $+\sigma$. Сверху и снизу кристалла расположены плоскости, состоящие из электронов с зарядовой плотностью $-\sigma/2$ (рис. 3).



Р и с. 3. Макроскопическая модель графена
F i g. 3. The macroscopic model of graphene

2. Будем считать, что электроны в верхней и нижней плоскости представляют собой двумерный идеальный газ.

В пользу последнего положения говорит высокая проводимость графена.

Пусть под воздействием внешнего электрического поля в верхней и нижней проводящих плоскостях графена возникло изменение плотности и давления электронов. Будем считать данные изменения достаточно малыми в сравнении с начальными давлением и плотностью.

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_0 + \Delta\sigma, \\ P &= P_0 + \Delta P. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь P – давление; σ – плотность.

Проведем исследование предложенной модели, используя известные методы гидродинамики².

Результаты исследования

Запишем уравнение непрерывности для поверхностной плотности электронов.

¹ Киттель Ч. Введение в физику твердого тела : учеб. пособ. по физике. М. : Книга по требованию, 2012. 789 с.

² Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика : учеб. пособ. : в 10 т. Т. 6. Гидродинамика. – 4-е изд., испр. М. : Наука, 1989. 626 с. URL: http://www.immssp.kiev.ua/postgraduate/Biblioteka_trudy/GidrodinamikaLanday1986.pdf



$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \operatorname{div} \sigma v = 0. \quad (5)$$

Здесь

$$v_F^2 = \frac{\partial P}{\partial \sigma}. \quad (12)$$

Отметим, что данное уравнение справедливо и для поверхностной плотности заряда.

Запишем теперь уравнение Эйлера:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \nabla) v = -\frac{1}{\sigma} \nabla P. \quad (6)$$

Воспользуемся тем, что изменения плотности и давления малы; получим, что:

$$\frac{\partial \Delta \sigma}{\partial t} + \sigma_0 \operatorname{div} v = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial v_F}{\partial t} = -\frac{1}{\sigma} \nabla P.$$

Поскольку, согласно предположению, электронный газ является идеальным, то все макроскопические процессы в нем адиабатические. Воспользуемся известным соотношением:

$$\Delta P = \left(\frac{\partial P}{\partial \sigma_0} \right) \Delta \sigma. \quad (8)$$

Из уравнений (7; 8) получим:

$$\frac{\partial \Delta \sigma}{\partial t} + \left(\frac{\partial P}{\partial \sigma_0} \right) \sigma_0 \operatorname{div} v = 0. \quad (9)$$

Уравнение (9) является волновым уравнением. Для придания ему более удобного вида введем потенциал векторного поля скоростей:

$$v = \operatorname{grad} \phi. \quad (10)$$

Получим, что:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + v_F^2 \Delta \phi = 0. \quad (11)$$

Рассмотрим монохроматическую волну. В данном случае потенциал волны имеет вид:

$$\phi = \operatorname{Re}[\phi_0 e^{-i\omega t}]. \quad (13)$$

Функция ϕ_0 удовлетворяет следующему условию:

$$\frac{\partial^2 \phi_0}{\partial t^2} + \frac{\omega^2}{v_F^2} \Delta \phi_0 = 0.$$

Если предположить, что волна распространяется в направлении x , то:

$$\phi_0 = \operatorname{Re}[A \exp(i\omega x / v_F)],$$

$$\phi = \operatorname{Re}[A e^{-i\omega(t - x/v_F)}]. \quad (14)$$

Из (14) получим дисперсионный закон:

$$\omega / v_F = k. \quad (15)$$

Закон дисперсии является линейным; следовательно, квант электронных волн в графене является безмассовым.

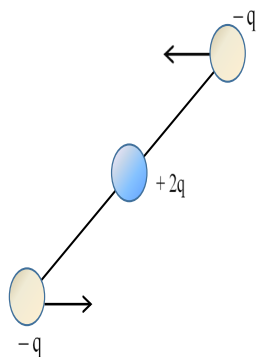
Вопрос о том, фермионом или бозоном является данный квант, в рамках представленной модели не рассматривается.

Выскажем гипотезу, отличную от принятой на данный момент [15]. Предположим, что квазичастица электронной волны в графене является бозоном, но достаточно необычной структуры: он состоит из двух электронов, как известные в теории сверхпроводимости куперовские пары.

При анализе макроскопической модели мы рассматривали только одну плоскость электронного облака, но та-

кое же облако находится с противоположной стороны кристалла. С точки зрения симметрии по ней также должна распространяться волна. Возможно, что при этом образуются пары отрицательно заряженных частиц. Наиболее вероятны пары, состоящие из соседних электронов, находящихся с противоположных сторон кристалла. В таком случае две пары будут образованы внутри одной ячейки, еще два электрона будут связаны с электронами двух соседних ячеек. Каждая такая пара будет иметь две степени свободы.

Для качественного описания данного явления вновь обратимся к рис. 2. В случае образования пары в сотовой ячейке графена расположение отрицательного заряда в верхнем электроне смещено в противоположную сторону от среднего положительного заряда ячейки по сравнению с нижним электроном. Схематично распределение зарядов представлено на рис. 4.



Р и с. 4. Схематичное распределение зарядов в элементарной ячейке графена

F i g. 4. The scheme of the charge distribution in the graphene elementary cell

При движении такой конструкции положительный заряд будет, к примеру, ускорять верхнюю часть и тормозить нижнюю. При этом эффективная масса связанных между собой электронов станет равна нулю, что согласуется с линейным законом дисперсии. Суммарный спин электронов при этом бу-

дет целым, то есть квант электронной волны окажется бозоном.

Определим скорость распространения электронной волны v_F . Для этого воспользуемся известным термодинамическим соотношением:

$$v_F \approx \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}}, \quad (16)$$

где $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$, R – универсальная газовая постоянная; M – молярная масса электронного газа; T – температура.

Коэффициент γ можно считать постоянным. Определим его по формуле:

$$\gamma = \frac{i+2}{i}.$$

Пусть квантом электронной волны является электрон Ферми. Учитывая двумерность графена, получим, что $\gamma = 2$. При определении температуры следует учитывать, что за электропроводимость отвечают только электроны, находящиеся на уровне Ферми. Температура Ферми составляет $\sim 5 \cdot 10^4$ К. Таким образом, $v_F \sim 1,29 \cdot 10^6$ м/с.

Предположим также, что квантом электронной волны является пара связанных электронов, зафиксированных в одном направлении. В таком случае $v_F \sim 0,92 \cdot 10^6$ м/с.

Экспериментальные данные показывают, что скорость Ферми в графене составляет $\sim 10^6$ м/с. Это говорит о том, что предложенная в статье математическая модель в целом адекватно описывает электропроводные свойства графена.

Аномальный эффект Холла

Напомним, что квантовые эффекты при воздействии магнитного поля на проводник с током становятся существенными при низкой температуре в том случае, когда толщина проводника мала [16; 17]. Для экспериментального исследования квантового эффекта Холла

используется система, схожая с плоским конденсатором (рис. 5).

Сам квантовый эффект Холла состоит в том, что при определенных значениях сопротивления

$$R_H = \frac{h}{ke^2} \quad (k = 0, 1, \dots) \quad (17)$$

ток в проводнике отсутствует. Здесь h – постоянная Планка; e – заряд электрона; k – число полностью заполненных уровней Ландау. Данное явление связано с тем, что на плоскости проводника может разместиться конечное число электронов, совершающих вращательное движение.

В графене как в истинно двумерном кристалле также наблюдается квантовый эффект Холла. Однако значения запирающего сопротивления оказываются в два

раза меньше, чем это следует из формулы (17). Поэтому эффект Холла в графене называют аномальным. Объясним данный эффект, исходя из предположения о существовании электронных пар, аналогичных куперовским парам.

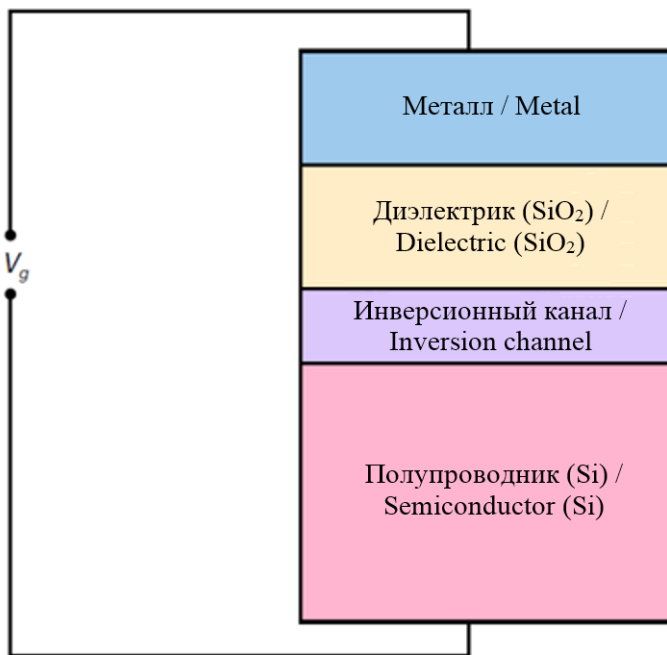
Введем следующие обозначения: S_0 – площадь проводника; B – вектор магнитной индукции; m – масса электрона. Пара электронов, естественно, будет обладать вдвое большими массой и зарядом.

Воспользуемся принципом неопределенности Гейзенберга в следующей форме³:

$$\Delta E \Delta t \sim h, \quad (18)$$

где E – энергия частицы; t – время.

Поскольку при наблюдении квантового эффекта Холла происходит кон-



Р и с. 5. Пример двумерной электронной системы (МДП-структура)

F i g. 5. A two-dimensional electron system (MIS structure)

³ Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика : учеб. пособ. : в 10 т. Т. 3. Квантовая механика (нерелятивистская теория). – 4-е изд., испр. М. : Наука, 1989. 768 с. URL: <https://www.math.purdue.edu/~eremenko/dvi/LL.pdf>

такт макроскопического наблюдателя с микроскопической системой, оправданным является использование квазиклассического уровня описания. Учитывая то, что электроны совершают под воздействием постоянного магнитного поля вращательное движение, получим:

$$\Delta E \sim \frac{1}{2} 2m\omega^2 R^2; \quad (19)$$

$$\Delta t \sim \frac{2\pi}{\omega}. \quad (20)$$

Циклическую частоту определим с использованием формулы для силы Лоренца:

$$\omega = \frac{eB}{m}. \quad (21)$$

Из формул (18–21) получим выражение для минимальной площади, занимаемой парой электронов:

$$S_e = \frac{h}{2eB}. \quad (22)$$

Максимальное число электронов, способных разместиться на одном энергетическом уровне Ландау, равно:

$$N_0 = \frac{S_0}{S_e} = \frac{2S_0 eB}{h}.$$

Следовательно, величина запирающего сопротивления будет равна:

$$R_H = \frac{S_0 B}{ekN_0} = \frac{h}{2ke^2}. \quad (23)$$

Таким образом, можно предположить, что аномальный эффект Холла в графене связан с образованием электронных пар, схожих с куперовскими парами.

Микромодель графена

В данном случае не будем строить достаточно точную модель графена на микроуровне: такая задача достаточно сложна. Графен по сути является гигантской двумерной молекулой, схожей со сложными ароматическими соединениями. В перспективе возможно использование численных методов, разработанных для расчетов сложных ароматических соединений (например, [18]), по отношению к графену.

Предложим приближенную модель, которая описывает только реакцию пары электронов на возмущение в виде электрического поля.

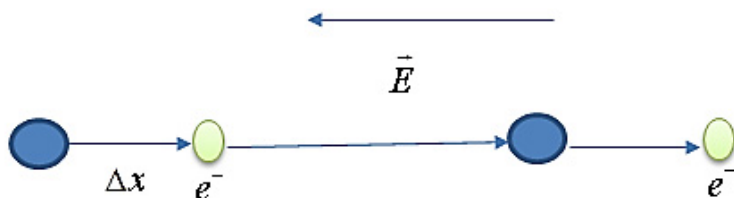
Выскажем следующие предположения.

1. Возмущение достаточно слабо по сравнению с взаимодействием электронов с основным кристаллом.

2. На выбранную пару электронов существенное влияние оказывают только ближайшие к ней узлы решетки.

В данном случае воздействие электрического поля можно представить следующим образом (рис. 6).

Запишем выражение, отражающее изменение потенциальной энергии пары электронов в результате возмущения, учитывая взаимодействие только с ближайшими узлами решетки.



Р и с. 6. Смещение пары электронов в результате внешнего воздействия

F i g. 6. The dislocation of the electron pair as the result of the external effects

$$W = W_1 + W_2 \approx -\frac{2ke^2}{r_0 + \Delta x} + \frac{ke^2}{a_0 + \Delta x} + \frac{ke^2}{a_0 - \Delta x} - \frac{2ke^2}{a_0} + 2eU. \quad (24)$$

Здесь a_0 – расстояние между соседними атомами углерода; r_0 – радиус орбиты sp_z электрона; U – разность потенциалов внешнего электрического поля, вызвавшего возмущение.

Второе и третье слагаемое в правой части выражения (24) характеризуют энергию, с которой один электрон из пары «подтягивает» другой электрон. Выстроим данные слагаемые в ряд и ограничимся линейным приближением:

$$\begin{aligned} \frac{ke^2}{a_0 + \Delta x} + \frac{ke^2}{a_0 - \Delta x} &\approx \\ \approx \frac{ke^2}{a_0} \left(1 + \frac{\Delta x}{a_0} + 1 - \frac{\Delta x}{a_0}\right) &= \frac{2ke^2}{a_0}. \end{aligned} \quad (25)$$

Из выражений (24; 25) следует, что пара электронов при небольшом возмущении будет двигаться в поле с почти постоянным потенциалом. Отсюда непосредственно следует равенство эффективной массы нулю.

В случае постоянной потенциальной энергии решение уравнения Шредингера имеет вид:

$$\Psi(x, y, t) = A \exp(-iEt / \hbar). \quad (26)$$

Здесь A – некоторая константа.

Воспользуемся принципом неопределенности Гейзенберга:

$$\Delta E \Delta t \sim \Delta p_0 \Delta x_0 \sim \hbar.$$

Получим, что:

$$\Psi(x, y, t) = A \exp(-ip_0 x_0 / \hbar). \quad (27)$$

Выражение (27) формально совпадает с выражением для волновой функции свободного фотона⁴. В данном смысле графен действительно можно использовать для моделирования некоторых процессов в квантовой электродинамике [19].

Уравнение Шредингера неприменимо к спинам частиц, поскольку является нерелятивистским. Оценим возможные значения спина для предполагаемой квазичастицы, образованной парным взаимодействием электронов, исходя из ее безмассовости.

Для векторной частицы, находящейся в четырехмерном пространстве-времени, справедливо представление:

$$k_\mu e_\mu = k_0 e_0 - k_1 e_1 - k_2 e_2 - k_3 e_3. \quad (28)$$

Для двумерного пространства один из единичных ортогональных векторов отсутствует; допустим, что это вектор e_3 . Для безмассовых частиц справедливо соотношение:

$$k_0 e_0 = k_1 e_1 + k_2 e_2. \quad (29)$$

Таким образом, у квазичастицы в графене будет всего две возможных независимых поляризации.

Обсуждение и заключение

Основным результатом исследования является макроскопическая модель двумерного кристалла, согласно которой графен можно рассматривать как три плоскости. Одна из них является основным телом кристалла и заряжена положительно, две другие представляют собой почти свободный электронный газ. С использованием предложенной модели в статье описано распространение электронной волны, при этом получен линейный закон дисперсии и проведена оценка фазовой скорости электронной волны. Получен-

⁴ Грибов В. Н. Квантовая электродинамика. Ижевск : РХД, 2001. 288 с.

ные результаты подтверждены экспериментальными данными, что говорит об адекватности модели.

Наличие двух электронных плоскостей позволяет предположить, что в графене, помимо взаимодействия «электрон – дырка», возможно образование системы «электрон – электрон». Наличие таких пар объясняет аномальный эффект Холла в графене.

Также в статье построена микромодель воздействия электрического поля на графен. Показано, что пара электронов имеет нулевую эффективную массу. При этом отмечено, что указанный эффект возможен, если вызванное полем возмущение невелико.

Из предположения о наличии электронных пар следует, что безмассовая квазичастица электронной волны является бозоном. Данное положение отличается от общепризнанной теории, со-

гласно которой квазичастица является фермионом.

Из двумерности электронных плоскостей и равенства эффективной массы электронной пары нулю следует, что спин может иметь только два независимых значения.

Статья имеет в основном теоретическую направленность; ее практическая значимость состоит в следующем. Простота основной модели позволяет использовать ее для проведения расчетов макроскопических характеристик графена. Если гипотеза о существовании электронных пар верна, то можно регулировать проводимость графена посредством воздействия на пары, то есть разрушения их или создания условий для их образования. Это можно осуществить, например, с помощью внешнего монохроматического электромагнитного излучения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гейм А. К. Случайные блуждания: непредсказуемый путь к графену // Успехи физических наук. 2011. Т. 181, № 12. С. 1284–1298. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0181.201112e.1284>
2. Лозовик Ю. Е., Меркулова С. П., Соколик А. А. Коллективные электронные явления в графене // Успехи физических наук. 2008. Т. 178, № 7. С. 757–776. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0178.200807h.0757>
3. Geim A. K. Graphene prehistory // Physica Scripta. 2012. Vol. 146, P. 014003. DOI: <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2012/T146/014003>
4. Морозов С. В., Новоселов К. С., Гейм А. К. Электронный транспорт в графене // Успехи физических наук. 2008. Т. 178, № 7. С. 776–780. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0178.200807i.0776>
5. Рутков Е. В., Галль Н. Р. Необычные оптические свойства графена на поверхности Rh // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2014. Т. 100. № 9-10. С. 708–711.
6. Yudenkov A. V., Volodchenkov A. M., Yudenkova M. A. Thermodynamic foundations of the graphene optical properties // T-Comm. 2018. Vol. 12, no. 11. P. 79–83. URL: <http://media-publisher.ru/wp-content/uploads/2018/12/Nom-11-2018-sait.pdf>
7. Mechanical properties of graphene containing elongated tetravacancies (575757-666-5757 defects) / A. S. Kochnev [et al.] // Reviews on Advanced Materials Science. 2017. Vol. 48, no 2. P. 142–146. URL: http://www.ipme.nw.ru/e-journals/RAMS/no_24817/05_24817_kochnev.pdf
8. The electronic properties of graphene / A. H. C. Neto [et al.] // Reviews of Modern Physics. 2009. Vol. 81, issue 1. P. 109–162. DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.109>
9. Optical transparency of graphene layers grown on metal surfaces / E. V. Rut'kov [et al.] // Semiconductors. 2017. Vol. 51, issue 4. P. 492–497. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063782617040182>
10. The mechanics of graphene nanocomposites: a review / R. J. Young [et al.] // Composites Science and Technology. 2012. Vol. 72, issue 12. P. 1459–1476. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.05.005>

11. **Yudnikov A. V., Terentyev S. E., Kovaleva A. E.** Informational Description of Systemic Crises // International Journal of Engineering & Technology. 2018. Vol. 7, no. 4.36. P. 899–903. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.36.24917>
12. **Katsnelson M. I.** Graphene: carbon in two dimensions. New York : Cambridge University Press, 2012. 351 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139031080>
13. **Wallace P. R.** The band theory of graphite // Physical Review. 1947. Vol. 71, issue 9. P. 622–634. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.71.622>
14. **Novoselov K. S., Geim A. K.** Quantum hall effect in graphene // 2008 Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest. IEEE, 2008. P. 488–489. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEM.2008.4574866>
15. From one electron to one hole: quasiparticle counting in graphene quantum dots determined by electrochemical and plasma etching / S. Neubeck [et al.] // Small. 2010. Vol. 6, issue 14. P. 1469–1473. DOI: <https://doi.org/10.1002/sml.201000291>
16. **Кибис О. В.** Квантовый эффект Холла // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 9. С. 89–93. URL: <http://stat.phys.spbu.ru/Metod/Holl2.pdf>
17. **Laughlin R. B.** Quantized Hall conductivity in two dimensions // Physical Review B. 1981. Vol. 23, issue 10. P. 5632–5633. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.23.5632>
18. **Грибов Л. А.** Метод расчета уровней энергии нанообъектов с периодической структурой скелета. // Журнал структурной химии. 2010. Т. 51, № 1. С. 131–136. URL: <http://www.sibran.ru/upload/iblock/8a9/8a94d0a31d5f2b6abf1cda9fbbe9da6c.pdf>
19. **Katsnelson M. I., Novoselov K. S.** Graphene: new bridge between condensed matter physics and quantum electrodynamics // Solid State Communications. 2007. Vol. 143, issues 1-2. P. 3–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2007.02.043>

Поступила 18.03.2019; принята к публикации 06.05.2019; опубликована онлайн 28.06.2019

Об авторах:

Юденков Алексей Витальевич, заведующий, кафедра менеджмента и естественно-научных дисциплин, ФГБОУ ВО «Смоленская государственная академия физической культуры, спорта и туризма» (214000, Российская Федерация, г. Смоленск, пр. Гагарина, д. 23), доктор физико-математических наук, профессор, Publons: <https://publons.com/researcher/2929429/alexey-vitalevich>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8329-1146>, aleks-yudnikov@mail.ru

Володченков Александр Михайлович, заведующий, кафедра естественнонаучных и гуманитарных дисциплин, Смоленский филиал ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова» (214030, Российская Федерация, г. Смоленск, ул. Нормандия-Неман, д. 21), кандидат физико-математических наук, доцент, Publons: <https://publons.com/researcher/2927666/aleksandr-volodchenkov>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9314-7324>, alexmw2012@yandex.ru

Юденкова Мария Алексеевна, студентка, ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9), Publons: <https://publons.com/researcher/2929527/maria-iudenkova>, <https://orcid.org/0000-0003-3226-2403>, mayudenkova@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

А. В. Юденков – научное руководство, формулирование основной концепции исследования и структуры статьи, математическое описание моделей, написание первоначального варианта статьи, формулирование выводов; А. М. Володченков – формулирование задач, анализ научных источников, обсуждение результатов; М. А. Юденкова – обзор литературы, верстка и редактирование текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Geim A.K. Random walk: Unpredictable way to graphene. *Uspekhi fizicheskikh nauk* = Physics–Uspekhi. 2011; 181(12):1284-1298. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0181.201112e.1284> (In Russ.)
2. Lozovik Yu.E., Merkulova S.P., Sokolik A.A. Collective electron phenomena in graphene. *Uspekhi fizicheskikh nauk* = Physics–Uspekhi. 2008; 178(7):757-776. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0178.200807h.0757> (In Russ.)
3. Geim A.K. Graphene prehistory. *Physica Scripta*. 2012; 146:014003. DOI: <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2012/T146/014003>
4. Morozov S.V., Novosylov K.S., Geim A.K. Electronic transport in graphene. *Uspekhi fizicheskikh nauk* = Physics–Uspekhi. 2008; 178(7):776-780. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0178.200807i.0776> (In Russ.)
5. Rutkov E.V., Gall N.R. Unusual optical properties of graphene on an Rh surface. *Pisma v Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki* = JETP Letters. 2014; 100(9-10):708-711. (In Russ.)
6. Yudenkov A.V., Volodchenkov A.M., Yudenkova M.A. Thermodynamic foundations of graphene optical properties. *T-Comm*. 2018; 12(11):79-83. Available at: <http://media-publisher.ru/wp-content/uploads/2018/12/Nom-11-2018-sait.pdf>
7. Kochnev A.S., Ovidko I.A., Semenov B.N., Sevastyanov Ya.A. Mechanical properties of graphene containing elongated tetravacancies (575757-666-5757 defects). *Reviews on Advanced Materials Science*. 2017; 48(2):142-146. Available at: http://www.ipme.nw.ru/e-journals/RAMS/no_24817/05_24817_kochnev.pdf
8. Neto A.H.C., Guinea F., Peres N.M.R., Novoselov K.S., Geim A.K. The electronic properties of graphene. *Reviews of Modern Physics*. 2009; 81(1):109-162. DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.109>
9. Rut'kov E.V., Lavrovskaya N.P., Sheshenya E.S., Gall N.R. Optical transparency of graphene layers grown on metal surfaces. *Semiconductors*. 2017; 51(4):492-497. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063782617040182>
10. Young R.J., Kinloch I.A., Gong L., Novoselov K.S. The mechanics of graphene nanocomposites: A review. *Composites Science and Technology*. 2012; 72(12):1459-1476. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.05.005>
11. Yudenkov A.V., Terentyev S.E., Kovaleva A.E. Informational description of systemic crises. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018; 7(4.36):899-903. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.36.24917>
12. Katsnelson M.I. Graphene: Carbon in two dimensions. New York: Cambridge University Press; 2012. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139031080>
13. Wallace P.R. The band theory of graphite. *Physical Review*. 1947; 71(9):622-634. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.71.622>
14. Novoselov K.S., Geim A.K. Quantum Hall effect in graphene. In: *2008 Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest*. IEEE; 2008. p. 488-489. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEM.2008.4574866>
15. Neubeck S., Ponomarenko L.A., Freitag F., Novoselov K.S., Giesbers A.J.M., Zeitler U., et al. From one electron to one hole: Quasiparticle counting in graphene quantum dots determined by electrochemical and plasma etching. *Small*. 2010; 6(14):1469-1473. DOI: <https://doi.org/10.1002/smll.201000291>
16. Kibis O.V. Hall quantum effect. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal* = Soros Educational Journal. 1999; 9:89-93. Available at: <http://stat.phys.spbu.ru/Metod/Holl2.pdf> (In Russ.)
17. Laughlin R.B. Quantized Hall conductivity in two dimensions. *Physical Review B*. 1981; 23(10):5632-5633. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.23.5632>
18. Gribov L.A. A method to calculate the energy levels of nanoobjects with a periodic framework structure. *Zhurnal strukturnoy khimii* = Journal of Structural Chemistry. 2010; 51(1):131-136. Available at: <http://www.sibran.ru/upload/iblock/8a9/8a94d0a31d5f2b6abf1cda9fbb9da6c.pdf> (In Russ.)

19. Katsnelson M.I., Novoselov K.S. Graphene: New bridge between condensed matter physics and quantum electrodynamics. *Solid State Communications*. 2007; 143(1-2):3-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2007.02.043>

Received 18.03.2019; revised 06.05.2019; published online 28.06.2019

About authors:

Aleksey V. Yudenkov, Head, Chair of Management, Sciences and Humanities, Smolensk State Academy of Physical Culture, Sport and Tourism (23 Prospekt Gagarina, Smolensk 214000, Russia), D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Publons: <https://publons.com/researcher/2929429/alexey-vitalevich>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8329-1146>, aleks-ydenkov@mail.ru

Aleksandr M. Volodchenkov, Head, Chair of Humanities and Sciences, Smolensk Branch of Plekhanov Russian University of Economics (21 Normandia-Neman St., Smolensk 214030, Russia), Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Publons: <https://publons.com/researcher/2927666/aleksandr-volodchenkov>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9314-7324>, alexm2012@yandex.ru

Maria A. Iudenkova, Student, Moscow Institute of Physics and Technology (9 Institutskiy Pereulok lane, Dolgoprudnyy 141701, Russia), Publons: <https://publons.com/researcher/2929527/maria-iudenkova>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3226-2403>, mayudenkova@gmail.com

Contribution of the authors:

A. V. Yudenkov – the scientific guidance, basic concept of research and structure of the article, mathematical description of the models, draft article, conclusion; A. M. Volodchenkov – tasking, analysing research studies and scholarly works, discussion; M. A. Iudenkova – reviewing the literature, editing and desktop publishing.

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

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

УДК 631.362.3

DOI: 10.15507/2658-4123.029.201902.248-264



Исследование параметров движения зерна в жидкости устройства для удаления спорыньи

В. А. Сысцев¹, В. Е. Саитов^{1*}, В. Г. Фарафонов²,
А. В. Саитов²

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

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

*vicsait-valita@e-kirov.ru

Введение. При уборке зерновых культур в бункер комбайна кроме зерна поступают также различные сорные и вредные примеси. К вредным примесям относятся ядовитые склероции спорыньи. Различные современные зерноочистительные машины не обеспечивают полного отделения склероциев спорыньи от зерен вследствие близости линейных размеров (ширины, толщины и длины) и скорости витания склероциев и зерен. Очистка семян от склероциев спорыньи, имеющих меньшую плотность, чем у зерна, возможна в водном растворе соли. Для механизации выделения склероциев спорыньи из семян ржи мокрым способом актуальным вопросом является разработка устройства очистки зернового материала.

Материалы и методы. Исследуется погружение отдельно взятых зерен ржи в воду (плотность $\rho_{zh} = 1,0 \cdot 10^3$ кг/м³) и водные растворы хлористого натрия (NaCl) плотностью $1,09 \cdot 10^3$ кг/м³ и $1,15 \cdot 10^3$ кг/м³. За геометрическую модель зерновки принимается эллипсоид. Теоретические исследования проведены на основе методов математического моделирования с использованием законов гидродинамики при плотности зерна ρ_z от $1,2 \cdot 10^3$ кг/м³ до $1,5 \cdot 10^3$ кг/м³, длине l_z от $5,0 \cdot 10^{-3}$ м до $10,0 \cdot 10^{-3}$ м, ширине b от $1,4 \cdot 10^{-3}$ м до $3,6 \cdot 10^{-3}$ м и толщине δ от $1,2 \cdot 10^{-3}$ м до $3,5 \cdot 10^{-3}$ м. Для проведения практических опытов использовано зерно озимой ржи сорта Фаленская 4 плотностью ρ_z от $1,1 \cdot 10^3$ кг/м³ до $1,3 \cdot 10^3$ кг/м³, длиной l_z от $5,0 \cdot 10^{-3}$ м до $8,0 \cdot 10^{-3}$ м, шириной b от $1,4 \cdot 10^{-3}$ м до $3,6 \cdot 10^{-3}$ м и толщиной δ от $1,2 \cdot 10^{-3}$ м до $3,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Результаты исследования. Скорость v_z и длительность t_n погружения зерна в жидкость являются одними из основных параметров, учитываемых при разработке машины очистки зернового материала мокрым способом от склероциев спорыньи. Значения данных величин определяют конструктивно-технологические параметры разрабатываемой машины. Для определения данных параметров необходимо учесть геометрические формы зерновок, которые обладают значительным многообразием. В качестве формы, наиболее близкой к форме зерновки, предлагается эллипсоид

© Сысцев В. А., Саитов В. Е., Фарафонов В. Г., Саитов А. В., 2019



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

с малой $2c_z = \delta$, средней $2b_z = b$ и большой $2a_z = l_z$ осями. Из основного закона динамики движения зерновки в жидкостях различной плотности (ρ_{zh}) получена формула для определения скорости, расчетные значения которой согласуются с полученными экспериментальными данными.

Обсуждение и заключение. Установлено, что расчетные значения скоростей погружения зерна в жидкости различной плотности имеют один порядок с экспериментальными значениями: они отличаются не более чем на 10 %. Данный подход к определению скорости погружения зерна в жидкость можно использовать при разработке машины очистки зернового материала по плотности мокрым способом для обоснования ее конструктивно-технологических параметров.

Ключевые слова: очистка зерна, мокрый способ очистки зерна, эллипсоидальная зерновка, водный раствор соли, скорость погружения зерновки в жидкость

Для цитирования: Исследование параметров движения зерна в жидкости устройства для удаления спорыньи / В. А. Сысцев [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 2. С. 248–264. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.248-264>

Investigation of Grain Movement Parameters in the Liquid of the Device for Removing Ergot

V. A. Sysuev¹, V. E. Saitov^{1*}, V. G. Farafonov², A. V. Saitov²

¹*Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (Kirov, Russia)*

²*Vyatka State Agricultural Academy (Kirov, Russia)*

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

Introduction. When harvesting grain crops, various trash and harmful impurities come to the combine bunker together with grains. These harmful impurities include ergot sclerotia, which are poisonous. Various modern grain cleaning machines do not provide for complete separation of ergot sclerotia from grains, because of the closeness of their linear dimensions (width, thickness and length) and speed of soaring. Cleaning seeds from ergot sclerotia having the density less than density of grain, is possible in an aqueous solution of salt. For the mechanization of the allocation of sclerotium ergot from rye seeds by a wet method, the urgent issue is the development of a device for cleaning grain material.

Materials and Methods. The immersion of separately taken rye grains in water ($\rho_{zh} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$) and aqueous solutions of sodium chloride (NaCl) with density $\rho_{zh} = 1,09 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ and $\rho_{zh} = 1,15 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. The ellipsoid is taken as the geometric model of the grains. Theoretical studies were performed for the grain density ρ_z from $1,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ to $1,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, lengths l_z from $5,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ to $10,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, widths b from $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ to $3,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ and thickness δ from $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ to $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ based on the methods of mathematical modelling using the laws of hydrodynamics. For practical experiments, there was chosen the gains of the winter rye variety Falenskaya 4 having the gain density ρ_z from $1,1 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ to $1,3 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, length l_z from $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ to $8,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, width b from $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ to $3,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, and thickness δ from $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ to $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Results. The speed v_z and duration t_n of grain immersion in liquids are main parameters taken into account when developing a machine for cleaning the grain material from ergot sclerotia with a wet method. The values of these quantities determine the structural and technological parameters of the machine under developing. To determine these parameters, it is necessary to take into account the geometric shapes of the grains, which have a large variety. An ellipsoid with a small $2c_z = \delta$, an average $2b_z = b$ and a large $2a_z = l_z$ axes is proposed as the closest to the shape of the grain. From the basic law of the dynamics of the grain movement in liquids of various densities ρ_{zh} , a formula was obtained for determining its velocity, the calculated values for which are consistent with the experimental data obtained.

Discussion and Conclusion. It is established that the calculated values of the speed of grain immersion in liquids of different density are comparable with the experimental values of the same order. They are close and differ by no more than 10 %. This approach to determining the speed of grain immersion in a liquid can be used in developing a machine for cleaning a grain material with the wet method to substantiate its structural and technological parameters.

Keywords: grain cleaning, wet method of cleaning grains, ellipsoidal caryopsis, aqueous solution of salt, speed of grain immersion in liquid

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

Введение

С древнейших времен зерно использовалось людьми для приготовления пищи. Впоследствии с увеличением урожайности зерновых культур за счет применения агротехники и, следовательно, с ростом производства зерно стало применяться также в качестве необходимого корма для сельскохозяйственных животных с целью повышения их продуктивности¹.

В настоящее время технология производства зерна в достаточной степени механизирована и предусматривает применение различных сельскохозяйственных машин. Поступающая с полей от зерноуборочных комбайнов на пункты и комплексы послеуборочной обработки бункерная зерновая масса кроме полного зерна содержит зерновую примесь, а также различные сорные и вредные примеси, что обусловлено невозможностью полной очистки обмолачиваемой хлебной массы молотилкой комбайна [1].

К зерновой примеси относятся мелкие, щуплые или битые и поврежденные молотилкой комбайна зерна основной культуры, а также зерна других сельскохозяйственных культур. Зерновая примесь после соответствующей переработки является ценным продук-

том для вскармливания сельскохозяйственных животных [Там же].

В бункерной зерновой массе могут также содержаться песок, комки земли, галька и камешки, которые попадают туда в основном при подборе хлебной массы из валков, лежащих на поверхности поля, и подаче ее на платформу жатки комбайна. Подобные компоненты бункерной зерновой массы относятся к минеральным примесям и могут оказывать болезненное влияние на желудочно-кишечный тракт людей и животных. Полова, частицы листьев, стержней, стеблей, колоса и соцветий различных растений и трав также не могут быть полностью удалены из бункерной зерновой массы в процессе очистки комбайном. Данные органические примеси также ухудшают качество зерна и изменяют цвет, вкус и запах продуктов его переработки [1].

К вредной примеси относятся ядовитые семена вязеля, горчака, мышатника, плевела, куколя и других ядовитых растений, а также паразитические грибки, в том числе склероции (рожки) спорыньи, мешочки и споры головни [2–6].

Спорами спорыньи часто заражаются основные злаковые культуры (рожь, пшеница, овес и ячмень). Степень пора-

¹ Послеуборочная обработка и хранение зерна / Е. М. Вобликов [и др.]. Ростов н/Д : МарТ, 2001. 229 с.; Энергия ржи для здоровья человека / В. А. Сысоев [и др.]. Киров : НИИСХ Северо-Востока, 2010. 103 с.

жения особенно возрастает во влажные годы. В период созревания колосьев данных культур вместо зерен образуются склеротии (рожки), по форме схожие с зерном. Склеротии спорыньи достаточно ядовиты даже при небольшой их концентрации в готовом продукте. При употреблении такого продукта происходит отравление, признаками которого являются головокружение, слабость, судороги и наркотические галлюцинации. Результатом постоянного употребления хлеба, зараженного спорыньей, является развитие гангрены конечностей у человека и животных. Попадание значительной дозы яда спорыньи в организм может привести к летальному исходу в результате паралича дыхательного центра [2; 4].

Таким образом, очистка бункерной зерновой массы от всех примесей, в особенности вредных, является первоочередной задачей сельскохозяйственного производителя для получения элитного посевного материала, экологически чистого продовольственного и фуражного зерна.

Для очистки бункерной зерновой массы от примесей в технологической линии зерноочистительного пункта или комплекса применяют сложные по конструкции и технологическим регулировкам воздушно-решетные машины предварительной и первичной очистки, на конечной стадии – воздушно-решетно-триерные машины, а для извлечения трудноотделимых сорных примесей – специальные машины. Существующие зерноочистительные устройства в ходе одного технологического процесса не обеспечивают полного выделения всех зерновых и сорных примесей, в том числе и склеротиев спорыньи² [1; 7].

Целью статьи является создание несложного по конструкции устройства для удаления склеротиев спорыньи из зерна в ходе одного технологического

процесса при снижении энергоемкости работы.

Обзор литературы

Анализ научно-технической литературы показал, что существующие конструкции машин для послеуборочной очистки не обеспечивают полного выделения из зерна различных примесей, в том числе ядовитых склеротиев спорыньи, поскольку линейные размеры (ширина, толщина и длина) и аэродинамические свойства (скорость витания) данных примесей вследствие мутаций приблизились к параметрам зерен основной культуры или сравнялись с ними. Так, зерна ржи, пшеницы, ячменя, овса имеют скорость витания v_{vit} от 7,0 м/с до 11,5 м/с, толщину δ от $1,2 \cdot 10^{-3}$ м до $4,5 \cdot 10^{-3}$ м, ширину b от $1,4 \cdot 10^{-3}$ м до $5,0 \cdot 10^{-3}$ м и длину l_z от $4,2 \cdot 10^{-3}$ м до $18,6 \cdot 10^{-3}$ м. У склеротиев спорыньи скорость витания v_{vit} составляет от 4,5 м/с до 9,6 м/с, толщина δ – от $0,8 \cdot 10^{-3}$ м до $1,8 \cdot 10^{-3}$ м, ширина b – от $1,0 \cdot 10^{-3}$ м до $3,0 \cdot 10^{-3}$ м, длина l_z – от $3,4 \cdot 10^{-3}$ м до $14,6 \cdot 10^{-3}$ м [7–11].

Для очистки различных сыпучих материалов (в том числе зерна) от примесей разработаны фотоэлектронные сепараторы на основе инновационных технологий. Процесс очистки в них заключается в скоростном фотосканировании зернового потока, ускоренно движущегося по наклонному лотку, и удалении некондиционных компонентов, цвет которых не соответствует цвету очищаемого зерна, воздушным импульсом узкого сжатого воздуха. Однако при получении в ходе одного технологического процесса очистки зерна, соответствующего агротехническим требованиям, в отходы отправляется значительное количество полновесного зерна. Для снижения подобных потерь фракция отходов должна направляться на очистку вторично. Это обуславливает снижение производительности, возрастание энер-

² Послеуборочная обработка и хранение зерна / Е. М. Вобликов [и др.]. Ростов н/Д : МарТ, 2001. 229 с.

гоемкости рабочего процесса фотосепаратора и увеличение количества зерна, травмированного необходимыми транспортирующими органами. Также следует отметить, что склерозии (рожки) спорыньи зачастую мутируют и подстраиваются под цвет зерна основной культуры. Поэтому современные фотоэлектронные сепараторы, очищающие зерновой материал по способу разности цветов примесей и зерна, не способны выделять ядовитые склерозии спорыньи, схожие по цвету с зерном основной культуры. К тому же фотосепаратор является достаточно сложным оборудованием, его стоимость достигает нескольких миллионов рублей, а время эксплуатации производитель ограничивает лишь пятью годами. При этом эксплуатация таких машин должна осуществляться в беспыльном помещении с температурой воздуха 25 °С. Следовательно, большинство сельскохозяйственных предприятий не имеет финансовых возможностей для приобретения и эксплуатации фотосепараторов, поэтому требуется дальнейший поиск способа отделения склерозиев спорыньи от зерна основной культуры [12; 13].

Зерна основных зерновых культур (ржи, пшеницы, ячменя, овса) имеют большую плотность ρ_z (от $1,2 \cdot 10^3$ кг/м³ до $1,5 \cdot 10^3$ кг/м³), чем склерозии (рожки) спорыньи (ρ_s составляет от $0,9 \cdot 10^3$ кг/м³ до $1,15 \cdot 10^3$ кг/м³). Поэтому практически 100-процентная очистка зерна, предназначенного для пищевых и семенных целей, от ядовитых склерозиев спорыньи в ходе одного технологического процесса возможна в водных растворах различных неорганических солей (например, в растворе поваренной или калийной соли). Пребывание семян ржи в вод-

ном растворе калийной соли обогащает их калием и очищает от вредных микроорганизмов, что повышает процент и скорость всхожести, улучшает соломиность зерновой культуры, снижает ее полеглость и, следовательно, увеличивает урожайность при работе зерноуборочных комбайнов³.

Мокрый способ очистки зерна от ядовитых примесей также может использоваться для протравливания семян перед посевом. Способ мокрого протравливания по сравнению с сухим и мелкодисперсным способами обеспечивает более глубокое и полное обеззараживание семян, при этом не происходит загрязнения воздуха. Преимущества данного метода заключаются в его высокой биологической эффективности против широкого спектра заболеваний за счет обработки всей поверхности семян и активации их прорастания путем увеличения влажности семени [3; 5].

При закладке на хранение семян, очищенных мокрым способом, удаление лишней влаги с поверхности зерен, побывавших в водном растворе соли не более минуты, происходит за 10 секунд с помощью продувки воздухом наружной температуры, что исключает применение сложных и энергоемких сушильных агрегатов⁴ [1].

Поэтому для механизации выделения ядовитых склерозиев спорыньи из семян зерновых культур мокрым способом актуальной задачей является разработка несложного по конструкции устройства для очистки зернового материала при малой энергоемкости технологического процесса (в сравнении с существующими зерноочистительными машинами). Следовательно, при разработке такой машины очистки зернового материала по плотности мокрым

³ Волков А. И., Жарский И. М. Большой химический справочник. Минск : Современная школа, 2005. 608 с.; Павловский Г. Т., Птицын С. Д. Очистка, сушка и активное вентилирование зерна. – 2-е изд., испр. и доп. М. : Высшая школа, 1972. 256 с.

⁴ Послеуборочная обработка и хранение зерна / Е. М. Вобликов [и др.]. Ростов н/Д : МарТ, 2001. 229 с.; Павловский Г. Т., Птицын С. Д. Очистка, сушка и активное вентилирование зерна. – 2-е изд., испр. и доп. М. : Высшая школа, 1972. 256 с.

способом и выполнении ею процесса выделения ядовитых склеротических спорыньи с надлежащей эффективностью требуется обоснование ее конструктивно-технологических параметров, для чего необходимо исследование показателей движения зерновок в жидкостях различной плотности.

Материалы и методы

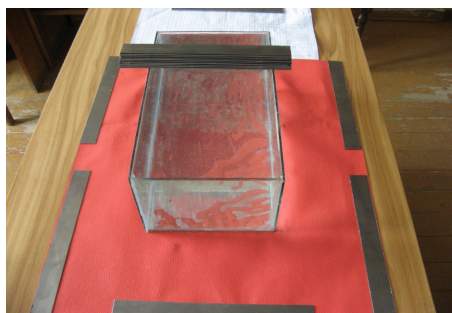
Рассматривается движение отдельных взятых зерен ржи в жидкостях различной плотности устройства для отделения спорыньи от зерна мокрым способом. Теоретические исследования проведены на основе методов математического моделирования с использованием законов гидродинамики.

При проведении практических экспериментов⁵ исследовалось движение в воде (плотность $\rho_{zh} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) и водных растворах хлористого натрия NaCl (плотность $\rho_{zh} = 1,09 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_{zh} = 1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) зерен озимой ржи сорта Фаленская 4 плотностью ρ_z от $1,1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ до $1,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, длиной l_z от $5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ до $8,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, шириной b

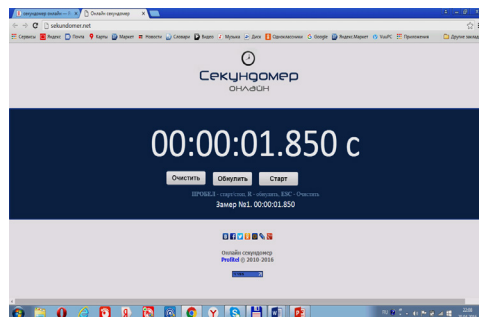
от $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ до $3,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и толщиной δ от $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ до $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ [1; 14].

Для этого использован прозрачный стеклянный сосуд, имеющий длину 0,35 м, ширину 0,20 м и высоту 0,15 м. Объем налитой в него воды составлял 9,6 л. За высоту h_{nl} столба воды или водного раствора соли в нем принято значение 0,135 м между метками. Метки располагались на расстоянии 0,01 м от верхней кромки жидкости и от дна сосуда (рис. 1).

Высота h падения зерновок в воду или водные растворы соли обеспечивалась при помощи набора металлических пластин, устанавливаемых над сосудом. Каждая пластина имела толщину $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, длину 0,28 м и ширину 0,04 м. Зерновки в количестве 20 штук устанавливались на пластинку и сбрасывались в воду или в водный раствор соли с высоты $h = 0,050 \text{ м}$, при которой происходило 100-процентное преодоление поверхностного натяжения жидкости зерновками без захвата пузырьков воздуха и погружение их в жидкость⁶ [15].



a)



b)

Р и с. 1. Экспериментальная установка для исследования погружения зерна в жидкость:

a) стеклянный сосуд с установленными на нем металлическими пластинами;

b) компьютерный секундомер

Fig. 1. The experimental unit for studying grain immersion in liquid:

a) glass vessel with metal plates mounted on it; b) computer stopwatch

⁵ Павловский Г. Т., Птицын С. Д. Очистка, сушка и активное вентилирование зерна. – 2-е изд., испр. и доп. М.: Высшая школа, 1972. 256 с.

⁶ Саитов В. Е., Фарафонов В. Г., Саитов А. В. Оценка высоты расположения выхода бункера с питателем относительно уровня раствора соли в ванне машины для очистки зернового материала по удельному весу // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства: Мосоловские чтения : мат-лы междунар. науч.-практ. конф. Йошкар-Ола : Мар. гос. ун-т, 2016. Вып. XVIII. С. 241–244. URL: https://www.marsu.ru/units/ati/doc/mosolovskie_chteniya/18_mosolovskie_chteniya_2016.pdf

Геометрические параметры прозрачного стеклянного сосуда, высоту h_{n1} столба воды или водного раствора соли между метками, а также высоту h сбрасывания зерновки в воду или в водный раствор соли измеряли при помощи линейки с миллиметровым делением. Время t_n движения зерновки в воде или водном растворе соли между метками определяли при помощи компьютерного секундомера; оно отображалось на экране до тысячных долей секунды. Процесс движения зерновки в жидкости и показания секундомера фиксировались с помощью видеосъемки телефоном OnePlus 3T с частотой 120 кадров в секунду и просматривались покадрово. В результате время падения зерновки между метками столба жидкости определялось с точностью до 0,02 с с учетом фиксации двух кадров, соответствующих касанию зерновкой двух меток.

Относительную погрешность δ_z скорости погружения зерновки в жидкость в опытах оценивали из соотношения⁷:

$$\delta_z = \frac{\Delta v_z}{v_{z \text{ sr exper.}}} = \frac{\Delta t_z}{t_{z \text{ sr}}} + \frac{\Delta h_{n1}}{h_{n1}}, \quad (1)$$

где Δv_z – абсолютная погрешность определения скорости погружения зерновки в жидкость, м/с; $v_{z \text{ sr exper.}}$ – средняя скорость погружения зерновки в жидкость (по результатам предварительных экспериментов $v_{z \text{ sr exper.}} \leq 0,10$ м/с); Δt_z – абсолютная погрешность определения времени падения зерновки в жидкости ($\Delta t_z = 0,02$ с); $t_{z \text{ sr}}$ – среднее время падения зерновки в жидкости в опытах ($t_{z \text{ sr}} > 1,0$ с); Δh_{n1} – абсолютная погрешность определения высоты столба жидкости (половина цены деления линейки; $\Delta h_{n1} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м).

Тогда относительная погрешность δ_z определения скорости погружения зерновки в жидкость в опытах, согласно выражению (1), составляет 0,02.

Оценка сверху абсолютной погрешности Δv_z скорости погружения зерновки в жидкость, определяемая по формуле

$$\Delta v_z = \delta_z \cdot v_{z \text{ sr exper.}} \quad (2)$$

согласно вышеприведенным данным, равна 0,002 м/с. Поэтому результаты по скорости падения зерновки в жидкость были в последующих расчетах выполнены в соответствии с данной точностью.

Обработка полученных теоретических и экспериментальных данных проведена на персональном компьютере при помощи пакета программ офисной документации по статистической обработке информации Microsoft Excel 2013 и специальной программы по статистической обработке данных Sigma Plot 8.0⁸.

Результаты исследования

Скорость v_z и длительность t_n погружения зерна в жидкость являются одними из основных параметров, учитываемых при разработке машины для очистки зернового материала от склеротических спорыньи мокрым способом. Значения данных величин определяют конструктивно-технологические параметры разрабатываемого устройства.

Для определения данных параметров необходимо учесть геометрические формы зерновок, которые весьма разнообразны. Наиболее близок к зерновке по форме эллипсоид с малой $2c_z = \delta$, средней $2b_z = b$ и большой $2a_z = l_z$ осями.

Результаты наблюдений свидетельствуют о том, что при падении зернов-

⁷ Румшиский Л. З. Математическая обработка результатов измерений. М. : Глав. ред. физ.-мат. лит. изд-ва «Наука», 1971. 192 с.; Зайдель А. Н. Погрешности измерений физических величин / Под ред. Ж. И. Алферова. Л. : Наука, 1985. 112 с.

⁸ Леонов В. Большая энциклопедия компьютера. М. : Эксмо, 2015. 400 с.; Лебедев А. Н. Полный самоучитель Excel 2013. СПб. : Питер, 2014. 128 с.; SigmaPlot – Scientific Data Analysis and Graphing Software. URL: <http://www.sigmaplot.co.uk/products/sigmaplot/sigmaplot-details.php>

ки на поверхность жидкости и преодолении силы поверхностного натяжения она движется в жидкости, ориентируясь в основном плашмя вследствие асимметричности расположения в ней центра тяжести. Поэтому движение в жидкости эллипсоидальной зерновки рассматриваем вдоль малой оси $2c_z$ (плашмя).

Общий вид навески зерен озимой ржи сорта Фаленская 4 и схема сил, действующих на зерновку при движении в жидкости, приведены на рис. 2.

После падения зерновки на поверхность жидкости и преодоления поверхностного натяжения на нее будут действовать сила тяжести $m_z \vec{g}$, сила Архимеда \vec{F}_A и сила гидродинамического сопротивления \vec{F}_C .

Основной закон динамики движения зерновки вдоль оси y имеет вид⁹:

$$m_z g - F_A - F_C = m_z a, \quad (3)$$

где m_z – масса зерновки, кг; g – ускорение свободного падения ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$); a – ускорение зерновки при ее движении в жидкости, м/с^2 .

Масса эллипсоидальной зерновки будет равна¹⁰:

$$m_z = V_z \rho_z = \frac{4}{3} \pi a_z b_z c_z \rho_z, \quad (4)$$

где V_z – объем зерновки, м^3 ; ρ_z – плотность массы зерновки, кг/м^3 .

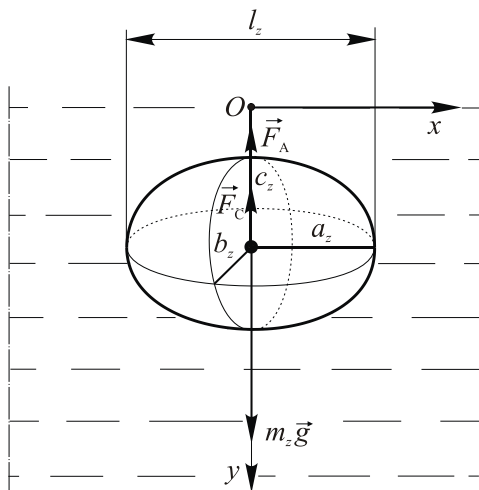
Сила Архимеда F_A , выталкивающая зерновку из жидкости, выражается следующим образом:

$$F_A = m_{zh} g = \frac{4}{3} \pi a_z b_z c_z \rho_{zh} g, \quad (5)$$

где m_{zh} – масса жидкости, вытесняемая зерновкой, кг; ρ_{zh} – плотность жидкости, кг/м^3 .



a)



b)

Р и с. 2. Озимая рожь сорта Фаленская 4: а) общий вид навески зерен; б) схема сил, действующих на зерновку при погружении ее в жидкость

Fig. 2. The variety of the winter rye Falenskaya 4: a) the general view of the weighed portion of grains; b) the diagram of the forces acting on grains when immersing in liquid

⁹ Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: учеб. пособ. для вузов. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 5-е изд., стер. М.: Физматлит, 2001. 736 с.; Седов Л. И. Механика сплошной среды: учеб. для вузов: в 2 т. Т. 2. – 6-е изд., стер. СПб.: Лань, 2004. 560 с.

¹⁰ Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1980. 976 с.

Сила гидродинамического сопротивления F_c , действующая со стороны жидкости на зерновку, определяется по формуле¹¹:

$$F_c = \frac{cS\rho_{zh}v_z^2}{2}, \quad (6)$$

где c – коэффициент гидродинамического сопротивления, зависящий от геометрической формы зерновки, скорости ее движения в жидкости и вязкости жидкости; S – площадь проекции зерновки на плоскость, перпендикулярную направлению ее движения (миделевое сечение), m^2 .

При движении зерновки в жидкости вдоль малой оси $2c_z$ эллипсоида (плашмя) площадь миделевого сечения (эллипса) равна¹²:

$$S = \pi a_z b_z. \quad (7)$$

Тогда уравнение (3) с учетом (4–7) примет вид:

$$\frac{4}{3}\pi a_z b_z c_z \rho_z g - \frac{4}{3}\pi a_z b_z c_z \rho_{zh} g - \frac{c\pi a_z b_z \rho_{zh} v_z^2}{2} = \frac{4}{3}\pi a_z b_z c_z \rho_z a. \quad (8)$$

Выразим ускорение a зерновки из уравнения (8):

$$a = \frac{g(\rho_z - \rho_{zh})}{\rho_z} - \frac{3c\rho_{zh}}{8c_z\rho_z} \cdot v^2. \quad (9)$$

Введем следующие обозначения:

$$b^2 = \frac{g(\rho_z - \rho_{zh})}{\rho_z}, \quad d^2 = \frac{3c\rho_{zh}}{8c_z\rho_z}. \quad (10)$$

С учетом обозначений (10) получим выражение для определения ускорения зерновки при ее движении в жидкости после преодоления поверхностного натяжения:

$$a = \frac{dv}{dt} = b^2 - d^2 v^2, \quad (11)$$

где v – скорость движения зерновки в жидкости как функция времени t , m/s ; t – текущее время, s .

Скорость v движения зерновки в жидкости находим интегрированием дифференциального уравнения (11):

$$\int dt = t = \int \frac{dv}{b^2 - d^2 v^2} = \frac{1}{2bd} \ln \left| \frac{\frac{b}{d} + v}{\frac{b}{d} - v} \right| + C_1, \quad (12)$$

где C_1 – постоянная интегрирования.

Полагаем, что после падения зерновки и преодоления ею поверхностного натяжения жидкости ее скорость будет нулевой ($v(0) = 0$), что предотвращает захват зерновкой пузырька воздуха. Тогда постоянная интегрирования $C_1 = 0$. После введения обозначений

$$\tau = \frac{1}{2bd} = \sqrt{\frac{2c_z \rho_z^2}{3cg\rho_{zh}(\rho_z - \rho_{zh})}}, \quad (13)$$

$$v_0 = \frac{b}{d} = \sqrt{\frac{8c_z g(\rho_z - \rho_{zh})}{3c\rho_{zh}}} \quad (14)$$

и преобразований уравнения (12) получим:

¹¹ Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика : учеб. пособ. для вузов : в 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 5-е изд., стер. М. : Физматлит, 2001. 736 с.; Курс физики : учеб. пособ. Т. 1. Механика. Акустика. Теплота и молекулярная физика / Сост. Н. Н. Андреев, С. Н. Ржевкин, Г. С. Горелик ; ред. Н. Д. Папалекси. М. : Гостехиздат, 1948. 600 с.

¹² Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М. : Наука, 1980. 976 с.

$$\ln \left| \frac{v_0 + v}{v_0 - v} \right| = \frac{t}{\tau}, \quad (15)$$

где v_0 – скорость зерновки, к которой после преодоления поверхностного натяжения жидкости стремится скорость v (с ней в дальнейшем зерновка будет двигаться в жидкости), м/с; τ – параметр, определяющий время движения зерновки с момента преодоления поверхностного натяжения жидкости до установления постоянной скорости v_0 , с.

Время τ является характерным временем для ускоренного или замедленного (если скорость зерновки после преодоления поверхностного натяжения жидкости будет больше v_0) движения каждой зерновки и определяется геометрической формой и физико-механическими свойствами зерновки (ρ_z , c_z), плотностью жидкости ρ_{zh} , коэффициентом c гидродинамического сопротивления жидкости.

Скорость v зерновки в жидкости будет возрастать от нуля до v_0 , поэтому модуль в уравнении (15) при его преобразовании можно отбросить; тогда

$$v = \frac{dy}{dt} = v_0 \frac{e^{\frac{t}{\tau}} - 1}{e^{\frac{t}{\tau}} + 1}. \quad (16)$$

Интегрируем дифференциальное уравнение (16):

$$\int_0^{h_1} dy = v_0 \int_0^{t_1} \frac{e^{\frac{t}{\tau}} - 1}{e^{\frac{t}{\tau}} + 1} dt, \quad (17)$$

где h_1 – текущее расстояние, пройденное зерновкой в жидкости, м; t_1 – время,

за которое зерновка проходит расстояние h_1 , с.

Получим зависимость расстояния h_1 , пройденного зерновкой в жидкости, от затраченного на это времени t_1 :

$$h_1 = v_0 \left(2\tau \ln(e^{\frac{t_1}{\tau}} + 1) - t_1 \right). \quad (18)$$

Заменяя в уравнении (18) расстояние h_1 на высоту столба жидкости h_n в ванне машины выделения склероциев спорыньи, а t_1 – на время погружения зерновки t_n в жидкость от момента преодоления поверхностного натяжения до дна ванны, получим выражение:

$$2\tau \ln \left(e^{\frac{t_n}{\tau}} + 1 \right) - t_n = \frac{h_n}{v_0}. \quad (19)$$

Уравнение (19) дает зависимость времени погружения зерновки t_n до дна от высоты столба жидкости h_n в ванне.

Найдем значение времени τ из выражения (13) для промежуточных значений физико-механических свойств зерновки ($c_{z, sr} = 1,17 \cdot 10^{-3}$ м, $\rho_{z, sr} = 1,3 \cdot 10^3$ кг/м³) и жидкости ($\rho_{zh} = 1,0 \cdot 10^3$ кг/м³), а также от коэффициента $c = 0,9$ гидродинамического сопротивления¹³ [15], которое составит 0,02 с.

Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют, что если время погружения зерновки в жидкость до дна ванны машины для выделения склероциев спорыньи составляет больше одной секунды, то $\frac{t_n}{\tau} \gg 1$ и, следо-

вательно, $e^{\frac{t_n}{\tau}} \gg 1$; тогда уравнение (19) примет вид:

¹³ Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление : справ. пособ. М. : Энергоатомиздат, 1990. 367 с.; Идельчик И. Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов. (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов). М. : Машиностроение, 1983. 351 с.; Справочник по гидравлическим расчетам. – 5-е изд., перераб. и доп. / П. Г. Киселев [и др.] ; под ред. П. Г. Киселева. М. : Энергия, 1974. 312 с. URL: http://books.totalarch.com/handbook_of_hydraulic_calculations

$$2\tau \cdot \frac{t_n - t_n}{\tau} = \frac{h_n}{v_0} \text{ или } t_n = \frac{h_n}{v_0} \quad (20)$$

С точки зрения проектирования и создания машины для выделения склероциев спорыньи из зерна ржи важно знать время t_0 (время переходного процесса), за которое зерновка достигнет постоянного значения скорости v_0 . Как принято в исследованиях по физике¹⁴, это время t_0 достижения скоростью v зерновки $(1 - \frac{1}{e})$ части скорости v_0 в формуле (16):

$$\frac{e^{\frac{t_0}{\tau}} - 1}{e^{\frac{t_0}{\tau}} + 1} = 1 - \frac{1}{e} \quad (21)$$

После преобразования выражения (21) получим:

$$t_0 = \ln(2e - 1) \cdot \tau = 1,49\tau. \quad (22)$$

Найдем значение времени t_0 переходного процесса по формуле (22) и расстояние h_0 , на котором происходит этот процесс, из выражения (18). Для $\tau = 0,02$ с и скорости $v_0 = 0,1$ м/с, определенной в ходе предварительных опытов, получим следующие значения: $t_0 = 0,03$ с; $h_0 = 4,0 \cdot 10^{-3}$ м.

При других возможных значениях c_z , ρ_z и ρ_{zh} время t_0 достижения постоянной скорости будет иметь тот же малый порядок; то же можно сказать и о расстоянии h_0 , пройденном зерновкой в переходном процессе.

Из приведенных выше результатов следует, что время t_0 и расстояние h_0 , на котором происходит достижение

постоянной скорости v_0 , малы в сравнении со временем t_n погружения зерновки в жидкость до дна ванны машины выделения склероциев спорыньи (оно составляет больше секунды), а высота h_n столба жидкости в ванне может достигать десятков сантиметров. Тогда скорость зерновки можно считать постоянной ($v_0 = v_z$), а ускорение a в уравнении (3) – равным нулю. Следовательно, в течение всего времени t_n движения зерновки от начала погружения до падения на дно ванны ее скорость v_z можно определять по формуле (14).

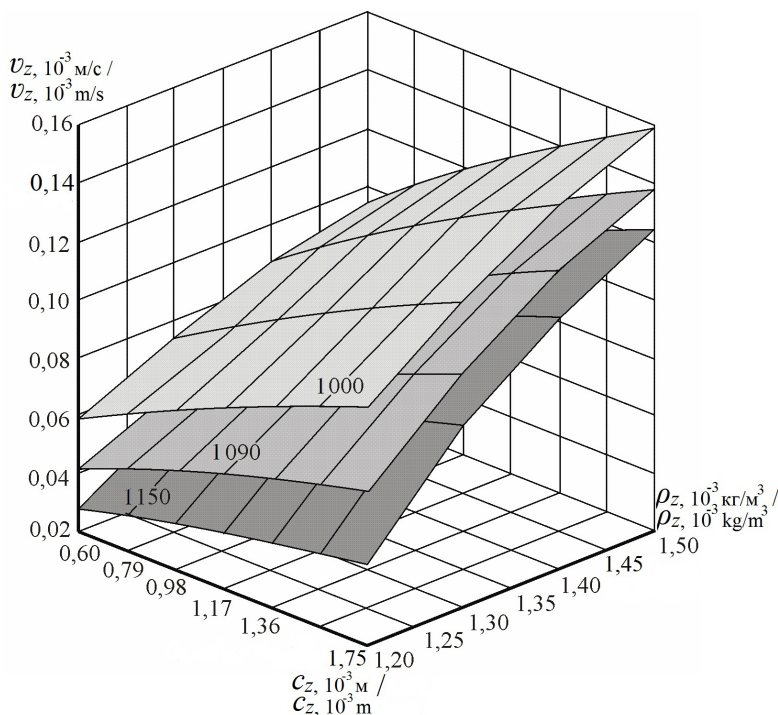
Соответствующие формуле (14) зависимости скорости v_z погружения эллипсоидальной зерновки в жидкость плотностью $1,0 \cdot 10^3$ кг/м³, $1,09 \cdot 10^3$ кг/м³ и $\rho_{zh} = 1,15 \cdot 10^3$ кг/м³ от величины малой полуоси c_z и плотности ρ_z зерна представлены в виде поверхностей на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что для зерновки при возрастании величины малой полуоси c_z и ее плотности ρ_z значение скорости v_z повышается. При увеличении плотности жидкости ρ_{zh} значения скорости погружения зерновок v_z уменьшаются. Это объясняется тем, что противодействующие падению зерновки сила Архимеда \vec{F}_A (5) и сила гидродинамического сопротивления \vec{F}_C (6) растут с ростом плотности жидкости ρ_{zh} .

Минимальные скорости $v_{z \min}$ погружения зерновок в жидкость определяются при значениях параметров зерна ржи $c_z = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м и $\rho_z = 1,2 \cdot 10^3$ кг/м³. При данных параметрах $v_{z \min}$ составляет 0,059 м/с, 0,042 м/с и 0,028 м/с для жидкостей плотностью ρ_{zh} $1,0 \cdot 10^3$ кг/м³, $1,09 \cdot 10^3$ кг/м³ и $1,15 \cdot 10^3$ кг/м³ соответственно.

Максимальные скорости погружения зерновок $v_{z \max}$ в жидкость определя-

¹⁴ Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика : учеб. пособ. для вузов : в 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 5-е изд., стер. М. : Физматлит, 2001. 736 с.; Седов Л. И. Механика сплошной среды : учеб. для вузов : в 2 т. Т. 2. 6-е изд., стер. СПб. : Лань, 2004. 560 с.; Курс физики : учеб. пособ. Т. 1. Механика. Акустика. Теплота и молекулярная физика / Сост. Н. Н. Андреев, С. Н. Ржевкин, Г. С. Горелик ; ред. Н. Д. Папалекси. М. : Гостехиздат, 1948. 600 с.



Р и с. 3. Зависимости скорости v_z погружения эллипсоидальной зерновки в жидкости плотностью $\rho_{zh} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{zh} = 1,09 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_{zh} = 1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ от величины малой полуоси c_z и плотности ρ_z зерна

Fig. 3. The dependence of the speed v_z of immersing ellipsoidal grains in the liquids with a density of $\rho_{zh} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{zh} = 1,09 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ and $\rho_{zh} = 1,15 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ on the value of the minor semiaxis c_z and density of grains ρ_z

ются при значениях параметров зерна ржи $c_z = 1,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и $\rho_z = 1,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. При данных параметрах $v_{z \max}$ составляет 0,159 м/с, 0,138 м/с и 0,124 м/с для жидкостей плотностью $\rho_{zh} 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $1,09 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и $1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ соответственно.

При движении в жидкости зернового материала потоком вследствие столкновения зерновок между собой их скорости будут усредняться. Для 28 пар значений малой полуоси c_z и плотности ρ_z (рис. 3) расчетное среднее арифметическое значение скорости погружения зерновок $v_{z, sr \text{ theor}}$ (14) в воду плотностью $1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ составляет 0,106 м/с; в водный раствор соли плотностью $1,09 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и $1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 0,087 и 0,072 м/с соответственно.

Результаты проведенных практических экспериментов представлены в виде зависимости скорости погружения зерновок v_z озимой ржи Фаленская 4 в воду и водные растворы хлористого натрия (NaCl) на глубину $h_{n1} = 0,135 \text{ м}$ между метками от номера проведенного опыта x_{Nb} (рис. 4).

Зависимость скорости погружения зерна v_z озимой ржи сорта Фаленская 4 в воду ($\rho_{zh} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) от номера проведенного опыта x_{Nb} показывает, что минимальная скорость погружения зерна $v_{z \min, 1000}$ равна 0,074 м/с, а максимальная скорость $v_{z \max, 1000}$ составляет 0,121 м/с. Среднее арифметическое значение скорости зерновок $v_{z, sr \text{ exper}, 1000}$ согласно экспериментальным данным, составляет 0,091 м/с.

Пределы варьирования скорости v_z в опытах при погружении зерен в водный раствор хлористого натрия (NaCl) плотностью $\rho_{zh} = 1,09 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ составляют 0,061–0,096 м/с. Среднее арифметическое значение скорости зерновок $v_{z, sr\text{exper.}1090}$ при данной плотности равно 0,078 м/с.

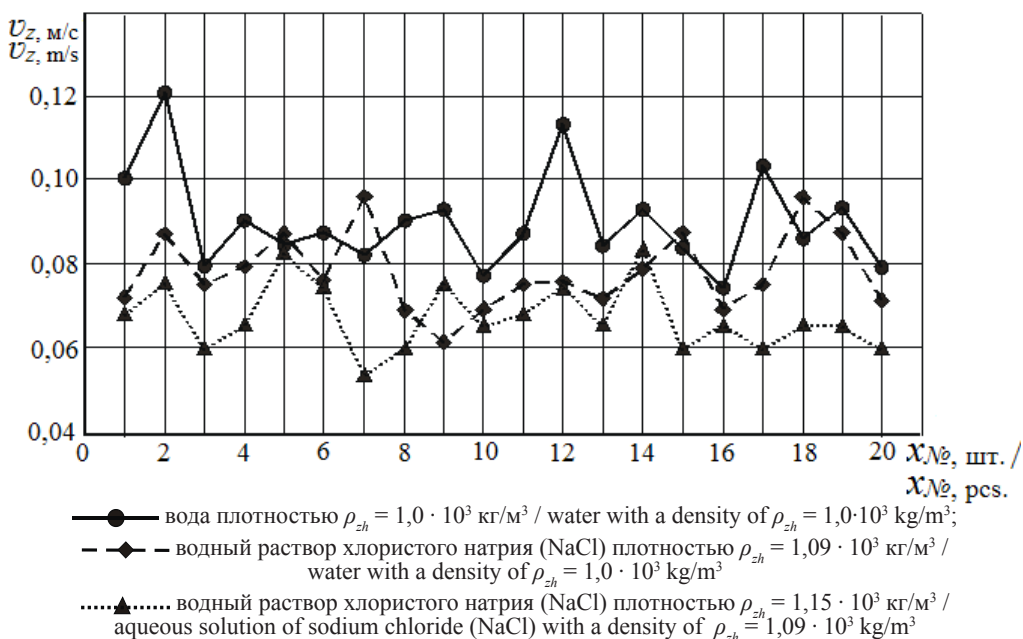
В ходе практических опытов при погружении зерен в водный раствор хлористого натрия (NaCl) плотностью $\rho_{zh} = 1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ выявлено, что минимальная скорость погружения зерна $v_{z, min.1150}$ равна 0,053 м/с, а максимальная скорость $v_{z, max.1150}$ составляет 0,083 м/с. Среднее арифметическое значение скорости зерновок $v_{z, sr\text{exper.}1150}$ из полученных опытных данных равно 0,067 м/с.

Сопоставление значений скорости погружения зерновок в жидкости различной плотности, полученных в экспериментах и рассчитанных для эллипсоидальной модели зерновки, показало,

что они относятся к одному порядку. Относительное отличие данных скоростей в процентах, определяемое по формуле

$$\delta_{v_z} = \frac{|v_{z, sr\text{theor.}} - v_{z, sr\text{exper.}}|}{v_{z, sr\text{theor.}}} \cdot 100, \quad (23)$$

показывает, что при погружении зерновки в воду ($\rho_{zh} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) оно составляет не более 14 %; при погружении в водные растворы хлористого натрия (NaCl) плотностью $1,09 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и $1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 10 % и 7 % соответственно. Относительное отличие скорости погружения зерновок в жидкости различной плотности, полученной экспериментально и теоретически, уменьшается с увеличением плотности жидкости ρ_{zh} . Это связано с тем, что зерновки имеют неосесимметричную геометрическую форму, поэтому многие зерновки погружаются по волнистой



Р и с. 4. Зависимость скорости v_z погружения зерновок озимой ржи сорта Фаленская 4 в воду и водные растворы хлористого натрия (NaCl) от номера x_{Nb} проведенного опыта

F i g. 4. The dependence of the speed v_z of immersing the grains of the variety of the winter rye Falenskaya 4 in water and in an aqueous solution of sodium chloride (NaCl) on the number x_{Nb} of the experiment

траектории. Скорость зерновки при волнистой траектории имеет вертикальную и горизонтальную составляющие. В горизонтальном направлении движению зерновки противодействует только сила гидродинамического сопротивления \vec{F}_c (6), которая возрастает с увеличением плотности жидкости ρ_{zh} . Это приводит к уменьшению амплитуды волнистой траектории и приближению ее длины к длине теоретической прямой траектории и, следовательно, к приближению скорости падения зерновки в эксперименте к теоретически рассчитанной скорости и уменьшению относительного отличия данных скоростей в процентах при увеличении плотности жидкости ρ_{zh} .

В устройствах для удаления спорыньи из ржи должно осуществляться погружение зерна в водные растворы неорганических солей. Как показано в статье, в таком случае относительное отличие скоростей составляет не более 10 %. Это свидетельствует о том, что проведенные эксперименты по погружению зерен в жидкости различной плотности согласуются с теоретическими исследованиями для эллипсоидальных зерновок. Относительное отличие объясняется принятой моделью и погрешностями эксперимента¹⁵.

Обсуждение и заключение

В результате проведенных исследований получены выражения (формулы), по которым можно определить одни из основных параметров движения зерна в жидкости устройства очистки ржи от спорыньи. Это скорость падения зерна

$$\text{ржи } v_z = \sqrt{\frac{8c_z g(\rho_z - \rho_{zh})}{3c\rho_{zh}}} \text{ в жидкости}$$

устройства, время t_0 достижения зерновкой постоянного значения скоро-

сти v_z после падения и преодоления ею поверхностного натяжения жидкости, а также расстояние h_0 , на котором данный переходный процесс происходит.

Для устройств удаления спорыньи из ржи теоретически показано, что в воде время $t_0 = 0,03$ с и расстояние $h_0 = 4,0 \cdot 10^{-3}$ м переходного процесса малы. В данных устройствах в качестве жидкости применяются водные растворы солей, плотность которых больше плотности воды. Для них, как показано в статье, параметры переходного процесса будут иметь тот же порядок малости. При разработке машины для очистки ржи от спорыньи значения величин скорости v_z падения зерна необходимы для расчета угла наклона днища ванны и конструктивно-технологических параметров устройства вывода очищенных семян. Полученные значения величин переходного процесса позволяют определить места расположения устройства для разрушения слипшихся в жидкости зерен и склероциев спорыньи; для отделения пузырьков воздуха, прилипших к зернам; для транспортера удаления спорыньи из ванны с водным соевым раствором [16; 17].

Параметры движения зависят от геометрической формы, физико-механических свойств зерновок c_z , ρ_z , плотности жидкостей ρ_{zh} , коэффициента c гидродинамического сопротивления жидкостей. Данные показатели присущи всем зерновым культурам и жидкостям, поэтому предложенный подход и полученные формулы можно применять при разработке устройств для очистки любого зернового материала по плотности мокрым способом с целью обоснования их конструктивно-технологических параметров, если геометрическая форма зерновок будет близка к форме эллипсоида.

¹⁵ Румицкий Л. З. Математическая обработка результатов измерений. М. : Глав. ред. физ.-мат. изд-ва «Наука», 1971. 192 с.; Зайдель А. Н. Погрешности измерений физических величин / Под ред. Ж. И. Алферова. Л. : Наука, 1985. 112 с.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сантов В. Е. Инновации в послеуборочной обработке зернового материала : монография. Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 152 с.
2. Щеклеина Л. М., Шешегова Т. К. Проблема спорыньи злаков (*Claviceps purpurea* (Fr.) Tul.): история и современность (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2013. № 1. С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2013-1-005-012>
3. Шешегова Т. К., Щеклеина Л. М. Некоторые приемы и средства защиты озимой ржи от спорыньи // Достижения науки и техники АПК. 2014. № 3. С. 47–50. URL: <http://agroapk.ru/28-archive/03-2014/172-03-2014>
4. Шешегова Т. К., Щеклеина Л. М. Зависимость вредоносности спорыньи от биометрических показателей склероциев // Защита и карантин растений. 2017. № 11. С. 9–12.
5. Хазиев А. З., Пономарева М. Л. Ущерб от спорыньи на озимой ржи и меры его предупреждения // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2007. Т. 2, № 2 (6). С. 80–82. URL: https://repository.kpfu.ru/?p_id=124462
6. Increasing spread of *Claviceps purpurea* (Fr). Tul. and it's effect on the quantity and quality of winter rye / M. L. Ponomareva [et al.] // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2016. Vol. 7, issue 3. P. 1865–1871. URL: [https://www.rjpbcs.com/pdf/2016_7\(3\)/%5B227%5D.pdf](https://www.rjpbcs.com/pdf/2016_7(3)/%5B227%5D.pdf)
7. Astanakulov K. D., Karimov Y. Z., Fozilov G. Design of a grain cleaning machine for small farms // AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. 2011. Vol. 42, no. 4. P. 37–40.
8. Development and theoretical studies of grain cleaning machine for fractional technology of flattening forage grain / P. Savinyh // Proceedings of 17th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. 2018. P. 124–130. DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N156>
9. Saitov V. E., Kurbanov R. F., Suvorov A. N. Assessing the adequacy of mathematical models of light impurity fractionation in sedimentary chambers of grain cleaning machines // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. P. 107–110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.728>
10. Substantiation of basic scheme of grain cleaning machine for preparation of agricultural crops seeds / A. M. Gievsky [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. P. 042035. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042035>
11. Дринча В. М., Борисенко И. Б. Применение и функциональные возможности пневмосортировальных столов // Научно-агрономический журнал. 2008. № 2 (83). С. 33–36. URL: <http://nvniish.ru/wp-content/uploads/2011/08/nazh5.pdf>
12. Шафоростов В. Д., Припоров И. Е. Качественные показатели работы фотосепаратора по фракционной технологии при разделении семян подсолнечника // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 1 (32), ч. 3. С. 23–25. URL: <https://research-journal.org/technical/kachestvennyy-pokazateli-raboty-fotoseparatora-po-frakcionnoj-tehnologii-pri-razdelenii-semyan-podsolnechnika>
13. Сантов А. В. Особенности функционирования фотосепараторов для очистки зерна и семян от примесей // Методы и технологии в селекции растений и растениеводстве : монография / Под общ. ред. В. А. Сысуева, Г. А. Баталовой, Е. М. Лисицына. Киров : НИИСХ Северо-Востока, 2016. С. 352–355.
14. Статистическая оценка интервала значений удельной массы зерна озимой ржи Фаленская 4 и склероций спорыньи / В. А. Сысуев [и др.] // Успехи современного естествознания. 2017. № 10. С. 48–53. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36559>
15. Theoretical background of calculation of the parameters of the device for grain cleaning from ergot sclerotia / V. A. Sysuev [et al.] // Russian Agricultural Sciences. 2017. Vol. 43, issue 3. P. 273–276. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068367417030156>
16. Машина для отделения спорыньи от семян ржи : пат. 2616037 Рос. Федерация : МПК В 03 В 5/48, В 02 В 1/04 / Сысуев В. А. [и др.] ; заявитель и патентообладатель ФГБНУ «Зональный научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого». № 2015148311 ; заявл. 10.11.2015 ; опубл. 12.04.2017, Бюл. № 11.
17. Машина для отделения спорыньи от семян ржи : пат. 2667066 Рос. Федерация, МПК В 03 В 5/48, В 02 В 1/04 / Сысуев В. А. [и др.] ; заявитель и патентообладатель ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого». № 2017115170/03 ; заявл. 27.04.2017 ; опубл. 18.09.2018, Бюл. № 26.

Поступила 05.02.2019; принята к публикации 10.04.2019; опубликована онлайн 28.06.2019

Об авторах:

Сысеев Василий Алексеевич, научный руководитель, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а), академик РАН, доктор технических наук, профессор, ResearcherID: B-8519-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1172-005X>, sisuev@mail.ru

Саитов Виктор Ефимович, старший научный сотрудник, лаборатория механизации полеводства, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: B-6098-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5548-8483>, vicsait-valita@e-kirov.ru

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

Саитов Алексей Викторович, магистрант, направление подготовки «Агроинженерия», ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (610017, Россия, г. Киров, Октябрьский пр-т, д. 133), ResearcherID: B-7315-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0266-4727>, alexseysaitov@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. А. Сысеев – научное руководство, формулирование основной концепции исследования; В. Е. Саитов – проведение критического анализа исследования, подготовка первоначального варианта текста и формулирование выводов; В. Г. Фарафонов – проведение теоретических исследований погружения зерна в жидкость и доработка текста; А. В. Саитов – анализ литературных данных и проведение экспериментальных работ.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Saitov A.V. Innovations in post-harvest handling of grain material. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publ.; 2012. (In Russ.)
2. Shchekleina L.M., Sheshhegova T.K. The problem of ergot grains (*Claviceps purpurea* (Fr.) Tul.): past and present (review). *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* = Theoretical and Applied Ecology. 2013; 1:5-12. DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2013-1-005-012> (In Russ.)
3. Sheshhegova T.K., Shchekleina L.M. Some ways and means of ergot protection of winter rye. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AIC. 2014; 3:47-50 Available at: <http://agroapk.ru/28-archive/03-2014/172-03-2014> (In Russ.)
4. Sheshhegova T.K., Shchekleina L.M. The dependence of the harmfulness of ergot on the biometric indicators of sclerotia. *Zashchita i karantin rasteniy* = Plant Protection and Quarantine. 2017; 11:9-12 (In Russ.)
5. Khaziev A.Z., Ponomareva M.L. [Damage from ergot on winter rye and measures for preventing]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2007; 2(2):80-82. Available at: https://repository.kpfu.ru/?p_id=124462 (In Russ.)
6. Ponomareva M.L., Ponomarev S.N., Mannapova G.S., Gilmullina L.F. Increasing spread of *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul. and its effect on the quantity and quality of winter rye. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2016; 7(3):1865-1871. Available at: [https://www.rjpbcs.com/pdf/2016_7\(3\)/%5B227%5D.pdf](https://www.rjpbcs.com/pdf/2016_7(3)/%5B227%5D.pdf)
7. Astanakulov K.D., Karimov Y.Z., Fozilov G. Design of a grain cleaning machine for small farms. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2011; 42(4):37-40.
8. Savinyh P., Sychugov Y., Kazakov V., Ivanovs S. Development and theoretical studies of grain cleaning machine for fractional technology of flattening forage grain. In: *Proceedings of 17th International Scientific Conference Engineering for Rural Development Engineering for Rural Development*. 2018. p. 124-130. DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N156>

9. Saitov V.E., Kurbanov R.F., Suvorov A.N. Assessing the adequacy of mathematical models of light impurity fractionation in sedimentary chambers of grain cleaning machines. *Procedia Engineering*. 2016; 150:107-110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.728>
10. Gievsky A.M., Orobinsky V.I., Tarasenko A.P., Chernyshov A.V., Kurilov D.O. Substantiation of basic scheme of grain cleaning machine for preparation of agricultural crops seeds. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 327:042035. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042035>
11. Drincha V.M., Borisenko I.B. Application and functionality of pneumatic sorting tables. *Nauchno-agronomicheskii zhurnal* = Scientific and Agronomical Journal. 2008; 2:33-36. Available at: <http://nvniish.ru/wp-content/uploads/2011/08/nazh5.pdf> (In Russ.)
12. Shaforostov V.D. Priporov I.E. Quality indicators of work of the photoseparator on fractional technologies at division of sunflower seed. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* = International Research Journal. 2015; 1(3):23-25. Available at: <https://research-journal.org/technical/kachestvennye-pokazateli-raboty-fotoseparatora-po-frakcionnoj-texnologii-pri-razdelenii-semyan-podsolnechnika> (In Russ.)
13. Saitov A.V. Features of the operation of photoseparators for cleaning grain and seeds from impurities. In: *Methods and Technologies in Plant Breeding and Crop Production*. Kirov: Agricultural Research Institute of the North-East Publ.; 2016. p. 352-355. (In Russ.)
14. Sysuev V.A., Saitov V.E., Farafonov V.G., Saitov A.V. Statistical evaluation of value interval of grain specific weight of winter rye Falenskaya 4 and ergot sclerotia. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya* = Advances in Current Natural Sciences. 2017; 10:48-53. Available at: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36559> (In Russ.)
15. Sysuev V.A., Saitov V.E., Farafonov V.G., Suvorov A.N., Saitov A.V. Theoretical background of calculation of the parameters of the device for grain cleaning from ergot sclerotia. *Russian Agricultural Sciences*. 2017; 43(3):273-276. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068367417030156>
16. Sysuev V.A., Saitov V.E., Savinykh P.A., Saitov A.V., inventors. Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, assignee. Machine for separating ergot from rye seeds. Ru Patent 2616037. 2017 Apr 12. (In Russ.)
17. Sysuev V.A., Saitov V.E., Gataullin R.G., Saitov A.V., Utkina E.I., Sheshegova T.K., inventors. Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, assignee. Machine for separating ergot from rye seeds. Ru Patent 2667066. 2018 Sep 18. (In Russ.)

Received 05.02.2019; revised 10.04.2019; published online 28.06.2019

About authors:

Vasily A. Sysuev, Scientific Director, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (166a Lenin st., Kirov 610007, Russia), Academician of RAS, D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: B-8519-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1172-005X>, sisuev@mail.ru

Viktor E. Saitov, Senior Researcher, Laboratory for Field Agriculture, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (166a Lenin st., Kirov 610007, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: B-6098-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5548-8483>, vicsait-valita@e-kirov.ru

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

Aleksey V. Saitov, Master's Degree Student in Agricultural Engineering, Vyatka State Agricultural Academy (133 Oktyabrskiy Prospekt, Kirov 610017, Russia), ResearcherID: B-7315-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0266-4727>, alexeysaitov@yandex.ru

Contribution of the authors:

V. A. Sysuev – scientific leadership, the formulation of the basic concept of the study; V. E. Saitov – the conduction of the study critical analysis, preparation of the initial text and conclusions; V. G. Farafonov – the theoretical studies of grain immersion in liquid and the completion of the text; A. V. Saitov – the analysis of literature data and experimental work.

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



Технологические свойства растений редиса

А. А. Ашитко, Е. А. Гавриш, А. Ю. Несмиян*,
Р. Ю. Колесник

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

**nesmian.andrei@yandex.ru*

Введение. При возделывании корнеплодов одной из важнейших операций является уборка. В промышленном производстве широко известна техника для уборки различных видов овощей (свеклы, моркови, редьки, цикория и др.), за исключением одной из наиболее перспективных овощных культур – редиса, который существенно отличается схемой посева, сроками созревания и физико-механическими свойствами самих растений. В связи с этим в рамках исследования, посвященного разработке средств малой механизации уборки редиса, авторами было проведено определение его основных физико-механических свойств.

Материалы и методы. Исследование проводилось на растениях двух сортов (Селеста и Белокрайка), типичных для Южного и Северо-Кавказского федеральных округов. При этом по известным методикам определялись размерные, массовые и фрикционные характеристики растений редиса.

Результаты исследования. Установлено, что редис сорта Селеста в 1,2–2,1 раза крупнее и в 1,8–2,8 раза тяжелее редиса сорта Белокрайка. Масса головок корнеплодов (10–28 г) в общей массе растения составляет 52–90 %, а масса корешков – 0,5–0,6 %. Средний диаметр головок корнеплодов составляет 26,7–34 мм при коэффициенте вариации (V) около 13–14 %; высота головок – 29–45 мм при V около 18–20 %. Выявлено наличие прямой корреляции между всеми рассмотренными размерами. Коэффициент трения покоя корнеплодов о неокрашенную сталь составил 0,63–0,66, движения – 0,44–0,58. Фрикционные характеристики стеблей ботвы в среднем в 1,25 раза выше. Диаметр пучка стеблей в месте предполагаемого среза – 9–12 мм.

Обсуждение и заключение. В целом физико-механические характеристики растений редиса существенным образом зависят от их сорта, степени созревания, свежести и других факторов, поэтому результаты исследования варьируются в значительных пределах. Тем не менее, они могут быть использованы в качестве первичной информации при проектировании машин для уборки и переработки редиса.

Ключевые слова: редис, механизация процесса, сорт, физико-механическое свойство, размерная характеристика, фрикционное свойство, масса

Для цитирования: Технологические свойства растений редиса / А. А. Ашитко [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 2. С. 265–278. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.265-278>



Technological Properties of Radish

A. A. Ashitko, E. A. Gavrish, A. Yu. Nesmiyan*,
R. Yu. Kolesnik

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

*nesmiyan.andrei@yandex.ru

Introduction. When cultivating root crops, harvesting is one of the most important operations. In industrial production, the technique for harvesting beets, carrots, black radishes, chicory, etc. is widely known, except for radishes, which differ significantly in the sowing scheme, maturation periods, and in physical and mechanical properties of the plants. In the study dealing with the development of small-scale mechanization for harvesting radishes, the authors made a determination of basic physical and mechanical properties of this plant.

Materials and Methods. The study was conducted for the two radish varieties (Celeste and Belokrayka), typical for the Southern and North Caucasus federal districts of Russia. In doing so, the known methods were used to determine the size, mass and frictional characteristics of radishes.

Results. It was established that the Celeste radish was 1.2–2.1 times larger than the Belokrayka radish and 1.8–2.8 times heavier. The weight of the radish roots (10...28 g.) in the total mass of the plant was 52–90 %, and the weight was 0.5–0.6 %. The average diameter of the radish roots was 26.7–34 mm, with a coefficient of variation (V) about 13–14 %, radish root height was 29–45 mm (at $V \approx 18$ –20 %). A direct correlation between all the dimensions considered was found. The coefficient of the static friction of radish roots with unpainted steel was 0.63–0.66, the movement was 0.44–0.58. Frictional characteristics of the stems of the radish leaves were 1.25 times higher on the average. The diameter of the bundle of stems at the proposed cut end was 9–12 mm.

Discussion and Conclusion. In general, the physical and mechanical characteristics of radishes depend significantly on their variety, maturity, freshness and other factors, so the results of the study vary significantly. Nevertheless, they can be used as primary information for designing radish harvesting machines.

Keywords: radish, mechanization of process, variety, physical and mechanical property, dimensional characteristic, friction property, weight

For citation: Ashitko A.A., Gavrish E.A., Nesmiyan A.Yu., Kolesnik R.Yu. Technological Properties of Radish. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(2):265-278. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.265-278>

Введение

Овощеводство – важная отрасль сельского хозяйства, позволяющая не только получать ценную, богатую витаминами и микроэлементами продукцию для питания людей, но и способствующая повышению рентабельности использования посевных площадей. В России уровень потребления овощей

на одного человека в среднем составляет 62–70 % от нормы, рекомендованной Институтом питания. При этом существенная часть реализуемой на отечественном рынке продукции вырабатывается за рубежом, что говорит о необходимости увеличения объемов отечественного производства овощных культур¹ [1].

¹ Котов В. П., Адрицкая Н. А., Завьялова Т. И. Биологические основы получения высоких урожаев овощных культур : учеб. пособ. СПб. : 2010, 128 с. URL: <https://ours-nature.ru/lib/b/book/360683215>; Diop N., Jaffee S. M. Fruits and vegetables: global trade and competition in fresh and processed product markets // Global Agricultural Trade and Developing Countries / Eds. M. Ataman Aksoy, John C. Beghin. 2005. P. 237–257. URL: <https://siteresources.worldbank.org/INTGAT/Resources/GATChapter13.pdf>; Civil Rights Information & Resources. URL: www.extension.umass.edu/civilrights; К 2020 году производство овощей в России должно вырасти до 17 млн тонн. URL: <https://www.gyazagro.ru/news/1813>

Особенностью овощеводства как сельскохозяйственной отрасли является то, что наибольшее количество продукции производится в личных и подсобных хозяйствах. Так, по данным Росстата, в 2015 г. в сельскохозяйственных организациях России было произведено всего около 20,7 % (6484 тыс. ц) овощей, а остальная продукция производилась в «хозяйствах населения» (74,9 %) и в других организациях. Причем данную тенденцию можно считать устоявшейся, поскольку и двадцатью годами ранее, в 1995 г., соотношение было схожим².

В объемах производства овощеводческой продукции важное место занимают корнеплоды, к которым относятся растения различных семейств. Например, хрен, редис, репа и редька относятся к семейству капустных; свекла – к семейству маревых; морковь, пастернак и сельдерей – к зонтичным; скорцонера и цикорий – к астровым. Наиболее ценной частью корнеплодов являются мясистые крупные корни. Они содержат в различных пропорциях клетчатку, 86–93 % воды, углеводы, белки, аминокислоты, омега-3 ненасыщенные жирные кислоты, пектин, гликозиды, фенолы, минеральные соли и витамины С, А, В, Е, РР, К. Для корнеплодов, в отличие от других типов овощей, характерны относительно низкая себестоимость производства, а также высокие показатели лежкости и транспортабельности³.

В технологиях возделывания корнеплодов, как и при возделывании большинства других сельскохозяйственных культур, одной из важнейших операций является уборка, сроки и качество выполнения которой существенным образом определяют эффективность всего предыдущего технологического цикла⁴. Поэтому разработку новых и совершенствование существующих корнеплодоуборочных машин можно считать перспективным направлением развития сельскохозяйственной техники, реализация которого будет способствовать решению части важных продовольственных и экономических задач.

Обзор литературы

В промышленном производстве из корнеплодов наибольшее распространение получили сахарная и кормовая свекла⁵, в меньшей степени – кормовая морковь. Именно для уборки этих культур и предназначено большинство серийно выпускаемых машин, имеющих достаточно проработанную конструкцию⁶ [2–4]. Ежегодно предприятиями сельхозмашиностроения выпускаются новые, все более мощные и производительные свеклоуборочные комбайны, весьма качественно реализующие необходимый набор операций. Машины для уборки столовых корнеплодов изначально были востребованы меньше, однако постепенное развитие технической оснащенности сельского хозяйства позволило при-

² Росстат. URL: <http://cbsd.gks.ru>

³ Relf D., McDaniel A. Root crops. URL: https://www.pubs.ext.vt.edu/content/dam/pubs_ext_vt.edu/426/426-422/426-422_pdf.pdf; Vegetable Production Guide for Commercial Growers, 2018–19. URL: <http://www2.ca.uky.edu/agcomm/pubs/id/id36/id36.pdf>; Корнеплоды. URL: <http://dom-eda.com/ingredient/item/korneplody.html>

⁴ Kitinoja L., Kader A. A. Small-scale postharvest handling practices : a manual for horticultural crops. 4th ed. Davis : University of California. Postharvest Technology Research and Information Center, 2002. URL: <http://www.fao.org/inpho/EN/resources/library/index.asp>

⁵ Beets. Horticulture Information Leaflets. URL: <https://content.ces.ncsu.edu/beets>

⁶ Small M. Study of rotary cutter of haulm. Fundamental and applied studies in EU and CIS countries // The 1st International Academic Conference. Oxford, 2014. № 1. P. 14–21; Properties of the sugar beet tops during the harvest / V. M. Bulgakov [et al.] // Proceeding of 6th International Conference on Trends in Agricultural Engineering / Eds. R. Chotěborský, S. Kovář, V. Křepčík. Prague : Czech University of Life Sciences Prague, 2016. P. 102–108. URL: <http://lib.tsatu.edu.ua/handle/123456789/3779>

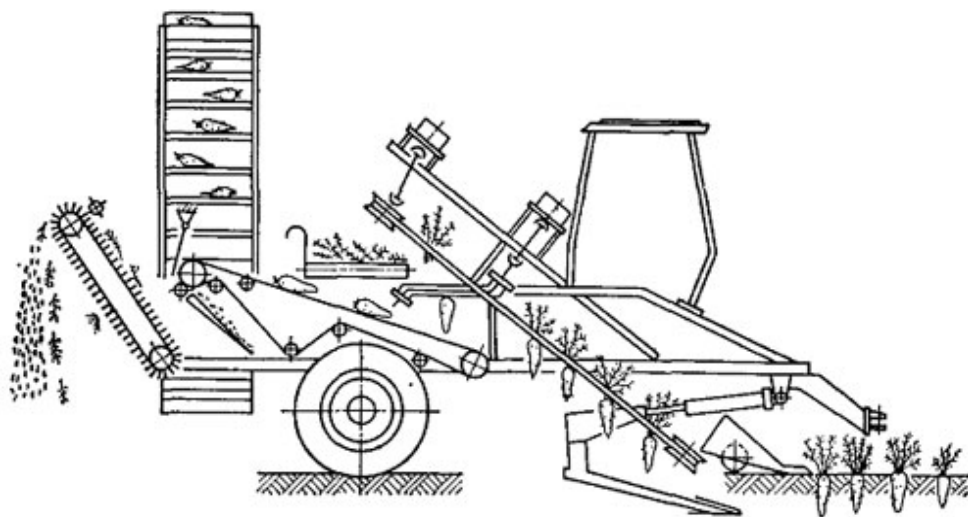
ступить и к их производству. В СССР целенаправленные работы в данном направлении были инициированы еще в 1950 г.⁷, а с 1975 г. начались поставки из ГДР однорядной прицепной машины ЕМ-11, которая агрегатировалась с тракторами класса 1,4. При движении агрегата вдоль ряда специальный лемех машины подкапывал корнеплоды. Одновременно лежащая на земле ботва поднималась ботвоподъемниками, формировалась в пучок и подавалась в пространство между теребильными ремнями. Ремни извлекали подкопанные корнеплоды из почвы за ботву и подавали их к роторно-планчатому механизму. Здесь корнеплоды отделялись от ботвы и падали на сепарирующий элеватор, а сама ботва сбрасывалась отводным щитком на поверхность убранного поля. Корнеплоды после очистки на продольном и поперечном элеваторах подавались погрузочным транспор-

том в кузов идущего рядом транспортного средства⁸.

С 1983 г. в СССР заводом «Лидсельмаш» начат выпуск однорядной уборочной машины ММТ-1, разработанной на базе машины ЕМ-11 совместно ВИСХОМом и ГСКБ по машинам для овощеводства. Несколько позже в ГДР начата реализация более производительной двухрядной машины Е-825 (рис. 1)⁹.

Приблизительно в это же время выпускаются трехрядный морковуборочный комбайн МУК-1,8 и свеклоуборочные комбайны КСТ-3А, КСТ-2А, КС-6Б¹⁰.

В странах Западной Европы для уборки столовых корнеплодов были широко распространены комбайны фирм «Mather and Platt» (Великобритания), FMC (США) и «Asa Lift» (Дания), принцип действия которых в основных чертах аналогичен рабочим процессам машин ЕМ, ММТ и под.¹¹



Р и с. 1. Схема двухрядной машины Е-825

F i g. 1. The scheme of the two-row machine E-825

⁷ Машины для уборки столовых корнеплодов – Машины теребильного типа (морковуборочные комбайны). URL: http://www.newtechagro.ru/inform2/mashinj_dlya_uborki_stolovjh_korneplodov_mashinj.html

⁸ Там же.

⁹ Там же.

¹⁰ Там же.

¹¹ Там же.

Сейчас как на отечественном, так и на зарубежном рынке широко представлены машины для уборки столовых корнеплодов таких компаний, как «Eugora», «De Wulf», «Asa Lift», «Grimme» и других¹². Большинство корнеплодоуборочных машин этих фирм предназначено для заготовки моркови, столовой свеклы, редьки, цикория и других культур со схожими технологическими свойствами. Исключением является одна из наиболее перспективных овощных культур – редис, который существенно отличается схемой посева, сроками созревания и физико-механическими свойствами корнеплода¹³.

Перспективность возделывания редиса обусловлена тем, что его плоды богаты аскорбиновой кислотой, эфирными маслами, лизоцимом, микроэлементами и другими биологически активными веществами. Его потребление стимулирует работу желудка, оказывает мочегонное действие, способствует подавлению вредной кишечной микрофлоры, благоприятно влияя на пищеварение в целом. К тому же редис – один из первых овощей открытого грунта, попадающий весной на стол¹⁴. Для его уборки приходится разрабатывать и внедрять в производство узкоспециализированные машины. Например, в СССР была спроектирована четырех-

рядная редисоуборочная машина РУ-4¹⁵, производство которой в перестроечные годы было прекращено. В США широко применялись навесные трех- и шестирядные машины фирмы FMC¹⁶. Сегодня европейским и российским сельхозпроизводителям больше известны редисоуборочные комбайны фирм «Grimme», «Koppert Machines» (рис. 2) и «Asa Lift» (рис. 3)¹⁷.

При этом все современные машины для уборки редиса, выпускаемые промышленно, рассчитаны на применение в полевых условиях. Они имеют высокую стоимость, значительную энерго- и материалоемкость и не подходят для использования в личных и подсобных хозяйствах¹⁸, хотя почти три четверти урожая редиса производится именно в них¹⁹. Разработки в области механизации уборки корнеплодов для хозяйств малых форм направлены, как правило, на уборку лука и плодов цилиндрической формы (моркови, пастернака и под.) [см., например, 5–8], и для заготовки редиса не подходят. В связи с этим повышение уровня механизации уборочных процессов при возделывании редиса в хозяйствах малых форм является актуальной и практически не исследованной задачей, решение которой позволит существенным образом повысить обеспеченность населения

¹² Морковоуборочные комбайны. URL: http://www.agro-sistema.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=189:morkovouborochnye-kombainy&catid=22&itemid=45

¹³ Там же; Машины для уборки столовых корнеплодов – Машины теребильного типа (морковоуборочные комбайны). URL: http://www.newtechagro.ru/inform2/mashinj_dlya_uborki_stolovjh_korneplodov_mashinj.html

¹⁴ Radish cultivation. URL: <http://prodachu.com/en/korneplodi/virashivanie-redisa>; Radish. URL: <https://horticulture.oregonstate.edu/oregon-vegetables/radish-0>; Редис, польза и вред для организма человека. URL: <http://yazdorovee.ru/posevnoj-redis-polza-i-vred>

¹⁵ Машины для уборки столовых корнеплодов – Машины теребильного типа (морковоуборочные комбайны). URL: http://www.newtechagro.ru/inform2/mashinj_dlya_uborki_stolovjh_korneplodov_mashinj.html

¹⁶ Там же.

¹⁷ Radish harvester. URL: <http://www.agriexpo.online/agricultural-manufacturer/radish-harvester-1951.html>; Koppert selfdriven комбайн машина для редиса. URL: <https://www.duijndam-machines.com/ru-машини/2253/koppert-selfdriven-комбайн-машина-для-редиса>

¹⁸ Конструктивно-технологическая схема машины для обрезки редиса / Е. А. Гавриш [и др.] // Актуальные проблемы агроинженерии в XXI веке : мат-лы междунар. науч.-практ. конф. Белгород : Белгородский ГАУ, 2018. С. 44–48.

¹⁹ Росстат. URL: <http://cbsd.gks.ru>



Р и с. 2. Самоходный редисоуборочный комбайн «Koppert Selfdriven»
F i g. 2. The self-moving radish harvester Koppert Selfdriven



Р и с. 3. Прицепной редисоуборочный комбайн «Asa Lift»
F i g. 3. The trailed radish harvester Asa Lift

вкусной и полезной продукцией, повысить рентабельность ее заготовки.

Известно, что рациональные параметры и эффективные режимы работы практически всех сельскохозяйственных машин существенным образом зависят от технологических свойств объектов, на которые они воздействуют²⁰ [9–11]. Поэтому в рамках исследования, посвященного разработке средств малой механизации уборки редиса, авторами было проведено определение его основных физико-механических свойств.

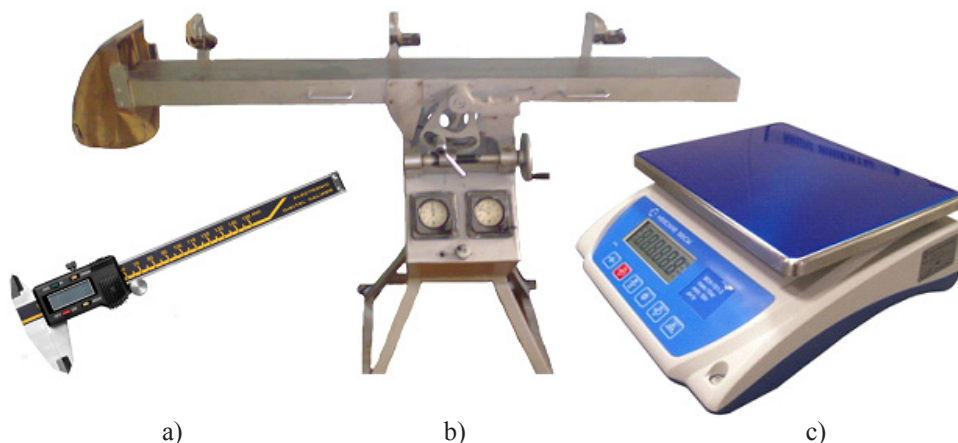
Материалы и методы

Исследование проводилось на растениях двух сортов (Селеста и Белокрайка, урожай 2017 г.), характерных для Южного и Северо-Кавказского федеральных округов.

По известным методикам²¹ [9–12] определялись размерные, массовые и фрикционные свойства редиса.

Измерение размерных характеристик редиса производилось на ста предварительно очищенных растениях каждого сорта электронным штангенциркулем (рис. 4, а). Для каждого размера были выявлены числовые зависимости и их основные статистические характеристики: средняя величина M , среднее квадратическое отклонение σ и коэффициент вариации V (табл. 1)²².

Помимо основных линейных размеров растений, для каждого сорта редиса определялись отношения некоторых наиболее характерных параметров, а также коэффициенты корреляции между



Р и с. 4. Оборудование, применяемое при исследовании физико-механических свойств редиса:
а) электронный штангенциркуль; б) установка ТМ-21 для определения фрикционных свойств;
в) весы лабораторные ВСН-3/0,2-3

Fig. 4. The equipment used for studying the physical and mechanical properties of radish:
a) electronic calipers; b) TM-21 device for determination of frictional properties;
c) laboratory scales BCH-3/0,2-3

²⁰ Теория, конструкция и производство сельскохозяйственных машин. Т. 2. Теория / Под общ. ред. В. П. Горячкина. М. ; Л. : Сельхозгиз, 1936. 536 с.; Технологические свойства семян. URL: <http://mehanik-ua.ru/lektsii-po-mtsskhm/178-tehnologicheskie-svoystva-semyan.html>; **Летошнев М. Н.** Сельскохозяйственные машины. Теория, расчет, проектирование и испытание. М. ; Л. : Сельхозиздат, 1955. 764 с.; Измерение коэффициента статического трения поверхностей различного качества и природы методом наклонной плоскости. URL: <http://helpiks.org/4-4246.html>; **Ашитко С. А.** Технологические свойства семян сои // Совершенствование технических средств в растениеводстве : межвуз. сб. науч. тр. Зерноград : ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2012. С. 81–86.

²¹ Там же.

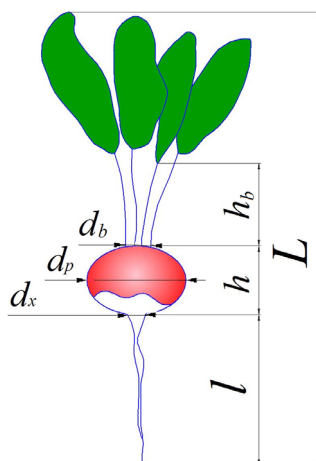
²² **Никитин В. И.** Первичная статистическая обработка экспериментальных данных. Самара : Сам. гос. техн. ун-т, 2017. 80 с.; Основы научных исследований в агрономии / Б. Д. Киришин [и др.]. М. : Колос С, 2009. 398 с.

ними²³. Полученные данные сводились в табл. 2.

В табл. 1; 2 приняты обозначения, указанные на рис. 5.

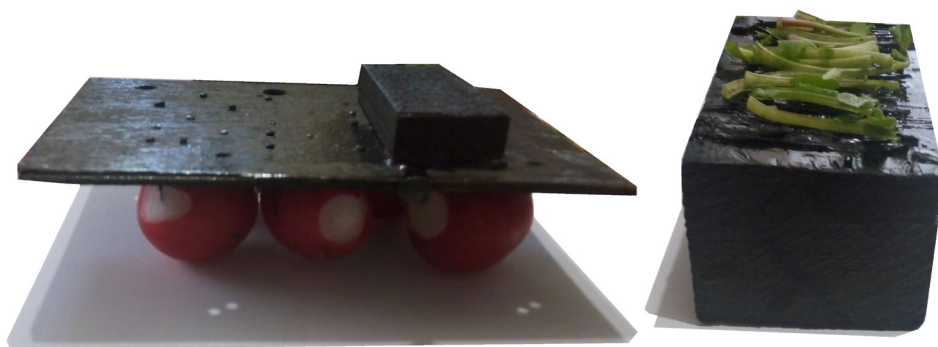
Коэффициенты трения (покоя и движения) редиса о стальную неокрашенную поверхность определялись по из-

вестным методикам с использованием установки ТМ-21²⁴ [9]. Для проведения исследования предварительно были изготовлены образцы – деревянные бруски, на которых закреплялись (накалывались и приклеивались соответственно) корнеплоды редиса и стебли ботвы



Р и с. 5. Схема для определения основных размерных характеристик редиса: L – общая длина растения, мм; l – длина корешка, мм; h_b – длина стеблей от головки корнеплода до листьев ботвы, мм; h – высота головки корнеплода, мм; d_{p1} – диаметр головки корнеплода, мм; d_{p2} – диаметр головки корнеплода (нормально к d_{p1}), мм; d_b – суммарный диаметр стеблей у головки корнеплода, мм; d_x – диаметр корешка у головки корнеплода, мм

F i g. 5. The scheme for determining the basic dimensional characteristics of radish: L – total length of plant, mm; l – length of radicle, mm; h_b – stem length from root to tops leaves, mm; h – height of the root, mm; d_{p1} – diameter of the root, mm; d_{p2} – diameter of the root (perpendicular to the d_{p1}), mm; d_b – total diameter of stems at the the root, mm; d_x – diameter of radicle at the root, mm



Р и с. 6. Бруски с закрепленными на них корнеплодами и стеблями ботвы редиса

F i g. 6. The bars with roots fixed on them and the stems of the radish top

²³ Там же.

²⁴ Измерение коэффициента статического трения поверхностей различного качества и природы методом наклонной плоскости. URL: <http://helpiks.org/4-4246.html>

Таблица 1
Table 1

Основные размерные характеристики растений редиса
The basic dimensional characteristics of radish plants

Сорт редиса / Radish varieties	L		l		h _l		h		d _{p1}		d _{p2}		d _b		d _x								
	M _{L2} / мм / mm	σ _{L2} / мм / mm	V _{L2} / %	M _p / мм / mm	σ _{d_{p1}} / мм / mm	σ _{d_{p1}} / мм / mm	V _{d_{p1}} / %	M _{d_{p1}} / мм / mm	σ _{d_{p1}} / мм / mm	M _{d_{p2}} / мм / mm	σ _{d_{p2}} / мм / mm	V _{d_{p2}} / %	M _{d_b} / мм / mm	σ _{d_b} / мм / mm	V _{d_b} / %	M _{d_x} / мм / mm	σ _{d_x} / мм / mm	V _{d_x} / %					
Селеста / Celeste	318,3	72,5	22,8	61,0	34,0	4,7	13,9	8,8	1,7	19,6	4,4	1,6	36,4	22,9	37,5	78,2	31,3	40,1	45,0	8,3	18,4		
Белокрайка / Belokrayka	239,7	33,1	13,8	31,7	26,7	3,6	13,2	*	*	12,3	3,0	24,1	5,1	1,3	26,0	19,2	60,6	73,8	12,1	16,4	28,8	5,8	20,3

Примечание: * – размер не определялся, поскольку визуально незначительно отличался от d_{p1} / Note: * – the size was not determined, as visually insignificant differed from d_{p1}

Таблица 2
Table 2

Характеристики зависимости между размерами растений редиса
The characteristics of the relationship between the sizes of radish plants

Сорт редиса / Radish varieties	Отношения средних размеров / The medium size relationships					Коэффициенты корреляции / The coefficients of correlation				
	d _{cp} / h	d _x / d _{cp}	d _b / d _{cp}	h / L	d _{cp} / L	R(d _h) R(d _{cp})	R(d _x) R(d _{cp})	R(d _b) R(d _{cp})	R(hL)	R(dL)
Селеста / Celeste	0,73	0,13	0,27	0,14	0,10	0,36	0,04	0,52	0,27	0,37
Белокрайка / Belokrayka	0,93	0,19	0,46	0,12	0,11	0,24	0,19	0,11	0,18	0,19

(рис. 6). Все измерения проводились в трехкратной повторности, полученные значения коэффициентов трения сводились в таблицу.

При определении массовых характеристик редиса сначала взвешивалось целое растение, затем отдельно – корнеплод и отдельно – корешок. Масса 100 штук каждого из элементов определялась трехкратно. Взвешивание проводилось с использованием лабораторных электронных весов ВСН-3/0,2-3 с точностью до 0,1 г.

Результаты исследования

Размерные характеристики растений редиса представлены в табл. 1.

Анализ данных, приведенных в табл. 1, позволяет сделать следующие выводы:

- редис сорта Селеста по линейным размерам в 1,2–2,1 раза крупнее редиса сорта Белокрайка;

- диаметр корнеплодов для обоих сортов является наиболее стабильным размером: коэффициент вариации составляет 13,2–13,9 %;

- высота головок корнеплодов варьируется в диапазоне 18,4–20,3 %, изменяясь при этом по среднему размеру от 29 до 45 мм. В общей длине растений высота головок корнеплодов занимает 12–14 %;

- диаметр пучка стеблей в месте предполагаемого среза составляет в среднем около 9–12 мм, при среднеква-

дратическом отклонении около 2–3 мм. Диаметр корешка у предполагаемого места среза в среднем составляет 4–5 мм.

Характеристики зависимостей между размерами редиса сведены в табл. 2. При этом средний диаметр d_{cp} редиса для сорта Селеста определяется как среднее геометрическое d_{p1} и d_{p2} , для сорта Белокрайка $d_{cp} = d_{p1}$.

Анализ данных, приведенных в табл. 2, позволяет заключить, что:

- корнеплоды редиса сорта Белокрайка по форме приближаются к шару, в то время как у редиса сорта Селеста головки корнеплодов имеют вытянутую форму: их высота примерно в 1,4 раза больше среднего диаметра;

- соотношение диаметра пучка ботвы в предполагаемом месте среза и диаметра головки корнеплода у исследуемых сортов составляет 0,27–0,46, а диаметра корешков к диаметру головок – 0,13–0,19;

- для исследуемых сортов редиса между всеми рассмотренными размерами выявлено наличие прямой корреляции.

Коэффициенты трения отдельных частей растений редиса о неокрашенную сталь представлены в табл. 3.

Данные, приведенные в таблице, показывают, что головки корнеплодов отличаются более низкими (примерно в 1,25 раза) фрикционными показателями.

Таблица 3

Table 3

Некоторые фрикционные характеристики редиса
Some frictional characteristics of radish

Сорт редиса / Radish varieties		Селеста / Celeste	Белокрайка / Belokrayka
Коэффициент трения движения / The coefficient of the friction motion	Корнеплоды / Roots	0,58	0,44
	Стебли / Stems	0,69	0,61
Коэффициент трения покоя / The coefficient of the static friction	Корнеплоды / Roots	0,66	0,63
	Стебли / Stems	0,87	0,71

Массовые характеристики редиса
The mass characteristics of radish

Сорт редиса / Radish varieties	Селеста / Celeste			Белокрайка / Belokrayka		
Показатель / Index	Масса растения / Plant weight	Масса корнеплода / Root weight	Масса корешка / Rootlet weight	Масса растения / Plant weight	Масса корнеплода / Root weight	Масса корешка / Rootlet weight
M_m , г / M_m , g	35,5	28,3	0,2	19,3	10,1	0,1
σ_m , г / σ_m , g	3,3	3,5	—	2,9	1,7	—
V_m , %	9,4	12,4	—	15,0	16,9	—
m_{max} , г / m_{max} , g	43,9	35,3	—	24,2	13,4	—
m_{min} , г / m_{min} , g	31,9	22,0	—	16,8	8,2	—

телями, чем стебли. По исследуемым сортам редиса коэффициенты трения отличались существенно (примерно на 17 %), что может быть связано с разной степенью свежести растений. При этом коэффициенты трения движения в среднем были в 1,24 раза меньше коэффициентов трения покоя.

Статистические характеристики массы растений редиса и их отдельных частей представлены в табл. 4.

Из данных, приведенных в табл. 4 следует, что:

- на долю корешка приходится 0,5–0,6 % от общей массы растения редиса; следовательно, при анализе производственных процессов массой корешка в расчетах можно пренебречь;

- отношение массы головки корнеплода к общей массе растения существенно варьируется в зависимости от сорта редиса и его состояния; в проведенных исследованиях эти соотношения изменялись от 0,52 до 0,9;

- масса всего растения редиса сорта Селеста больше массы растения редиса

сорта Белокрайка примерно в 1,8 раза; для головок корнеплодов аналогичное соотношение – 2,8 раза.

Обсуждение и заключение

Физико-механические свойства растений редиса существенным образом зависят от их сорта, степени созревания, свежести и других факторов, поэтому результаты исследования варьируются в значительных пределах. Например, проведенное исследование позволило установить, что редис сорта Селеста по линейным размерам в 1,2–2,1 раза крупнее редиса сорта Белокрайка и примерно в 1,8–2,8 раза тяжелее.

Масса головок корнеплодов (10–28 г) в общей массе растения составляет 52–90 %, а масса корешков – 0,5–0,6 %. Соответственно, при аналитических расчетах массой корешка можно пренебречь.

Средний диаметр головок корнеплодов исследованных сортов составляет от 26,7 до 34 мм при коэффициенте вариации (V) около 13–14 %; высота головок корнеплодов составляет от 29

до 45 мм (при $V \approx 18\text{--}20\%$). При этом корнеплоды редиса сорта Белокрайка по форме близки к шару, в то время как у редиса сорта Селеста высота головок корнеплодов примерно в 1,4 раза больше среднего диаметра. Для исследуемых сортов редиса выявлено наличие прямой корреляции между всеми рассмотренными размерами. Коэффициент трения покоя корнеплодов о неокрашенную сталь составляет 0,63–0,66, движения – 0,44–0,58.

Диаметр пучка стеблей в месте предполагаемого среза в среднем составляет от 9 до 12 мм, диаметр корешка у предполагаемого места среза – 4–5 мм. Фрикционные показатели стеблей ботвы в среднем в 1,25 раза выше, чем фрикционные свойства головок корнеплодов.

Полученные в исследовании данные, несмотря на их вариативность, могут быть использованы в качестве исходной информации при проекти-

ровании машин для уборки и первичной переработки редиса. Например, их можно применять при нахождении рациональной степени прижатия друг к другу несущих ременных транспортеров в зависимости от массы растений, суммарного диаметра стеблей и их фрикционных свойств; при определении оптимального расположения ножей относительно ремней транспортера в зависимости от линейных размеров растений (при заготовке обрезного редиса); при определении удельных энергозатрат резания с учетом площади стеблей ботвы и корешка в месте среза; при расчете суммарной мощности, потребляемой ботвообрезочной машиной заданной производительности и т. д. Особый интерес полученные данные могут представлять при разработке малогабаритных технических средств, применение которых было бы рентабельно в условиях личных и подсобных хозяйств.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Gibba A. Revealed comparative advantage and trade competitiveness in global vegetable products // International Journal of Scientific & Technology Research. 2017. Vol. 6, issue 5. P. 8–15. URL: <http://www.ijstr.org/final-print/may2017/Revealed-Comparative-Advantage-And-Trade-Competitiveness-In-Global-Vegetable-Products.pdf>
2. Storozhuk I. M., Pankiv V. R. Research results of harvesting haulm remnants of root crops // INMATEH – Agricultural Engineering. 2015. Vol. 46, no. 2. P. 101–108. URL: <http://oaji.net/articles/2016/1672-1453480911.pdf>
3. Барановський В. М., Скальський О. Ю. Аналіз конструктивно-технологічних аспектів функціонування копачів коренеплодів // Innovative Solutions in Modern Science. 2016. Vol. 1, no. 1. P. 147–154. [Электронный ресурс]. URL: <https://naukajournal.org/index.php/ISMSD/article/view/709>
4. Identification development process adapted root crop machines / V. A. Dubrovin [et al.] // Machinery and Energetics. 2013. № 185. P. 12–28. URL: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Tekhnica/article/view/4625/4543>
5. Машина для обрезки концов овощей : пат. 246952 СССР : МПК А 01 F, А 47 J / Кулаков А. Ф.; заявитель и патентообладатель Кулаков А. Ф. № 1153670/13 ; заявл. 06.05.67 ; опубл. 20.06.69, Бюл. № 21.
6. Устройство для обрезки концов моркови : пат. 982643 СССР : МПК А 23 N 15/04 / Штейнберг Р. В., Иларьев С. И., Вавилин В. С. ; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт продуктов детского питания и систем управления агропромышленными комплексами консервной промышленности. № 3301752/13 ; заявл. 11.06.81 ; опубл. 23.12.82, Бюл. № 47.
7. Устройство для обрезки концов корнеплодов : пат. 1284497 СССР : МПК А 23 N 15/04 / Силифанов Ю. А. ; заявитель и патентообладатель Силифанов Ю. А. № 3849315/13 ; заявл. 31.01.85 ; опубл. 23.01.87, Бюл. № 3.

8. Устройство для обрезки листьев лука и корнеплодов : пат. 2240712 Рос. Федерация : МПК А 23 N 15/04 / Ларюшин Н. П., Кшникаткин С. А., Кирюхина Т. А. ; заявитель и патентообладатель Пензенская государственная сельскохозяйственная академия. № 2002132345/12; заявл. 02.12.02 ; опубл. 27.11.04, Бюл. № 33.

9. Влияние физико-механических свойств семян пропашных культур на качество работы пневмовакуумного высевающего аппарата / А. Ю. Несмиян [и др.] // Агро XXI. 2012. № 4-6. С. 44–46.

10. Размерные характеристики семян масличных гибридов подсолнечника / А. Ю. Несмиян [и др.] // Вестник аграрной науки Дона. 2014. № 1 (25). С. 39–46. URL: <http://achraa.pf/wp-content/uploads/2013/01/ref1-25-2014.pdf>

11. **Ahmadi R., Kalbasi-Ashtari A., Gharibzahedi S. M. T.** Physical properties of psyllium seed // International Agrophysics. 2012. № 26. С. 91–93. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10247-012-0013-y>

12. **Aydin C., Ozcan M.** Some physico-mechanic properties of terebinth (*Pistacia terebinthus* L.) fruits // Journal of Food Engineering. 2002. Vol. 53, issue 1. P. 97–101. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00145-5](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00145-5)

Поступила 08.07.2018; принята к публикации 14.09.2018; опубликована онлайн 28.06.2019

Об авторах:

Ашитко Андрей Андреевич, аспирант, Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет» (347740, Россия, г. Зерноград, ул. Ленина, д. 21), ResearcherID: N-6272-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4896-2682>, ashitko2010@yandex.ru

Гавриш Евгений Андреевич, магистрант, Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет» (347740, Россия, г. Зерноград, ул. Ленина, д. 21), ResearcherID: N-6380-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3573-0041>, zhenya.gavrisch@yandex.ru

Несмиян Андрей Юрьевич, профессор, кафедра технологий и средств механизации агропромышленного комплекса, Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет» (347740, Россия, г. Зерноград, ул. Ленина, д. 21), доктор технических наук, доцент, ResearcherID: N-6221-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5556-1767>, nesmiyan.andrei@yandex.ru

Колесник Руслан Юрьевич, аспирант, Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет» (347740, Россия, г. Зерноград, ул. Ленина, д. 21), ResearcherID: N-6372-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5614-2428>, microlis05-05@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. А. Ашитко – исследование размерных и массовых характеристик растений редиса сорта «белокрайка», анализ уровня механизации процессов уборки корнеплодов; Е. А. Гавриш – исследование размерных и массовых характеристик растений редиса сорта «селеста»; А. Ю. Несмиян – формирование первоначального варианта статьи, анализ полученных результатов, вычитка текста статьи; Р. Ю. Колесник – исследование фрикционных свойств растений редиса, оформление списка использованных источников.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

REFERENCES

1. Gibba A. Revealed comparative advantage and trade competitiveness in global vegetable products. *International Journal of Scientific & Technology Research*. 2017; 6(5):8-15. Available at: <http://www.ijstr.org/final-print/may2017/Revealed-Comparative-Advantage-And-Trade-Competitiveness-In-Global-Vegetable-Products.pdf>

2. Storozhuk I.M., Pankiv V.R. Research results of harvesting haulm remnants of root crops. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2015; 46(2):101-108. Available at: <http://oaji.net/articles/2016/1672-1453480911.pdf>

3. Baranovskiy V.M., Skalskiy O.Yu. The analysis of constructive-technological aspects the function of root crops diggers. *Innovative Solutions in Modern Science*. 2016; 1(1):147-154. Available at: <https://naukajournal.org/index.php/ISMSD/article/view/709> (In Russ.)
4. Dubrovin V.A., Golub G.A., Dubchak N.A., Tesliuk V.V. Identification development process adapted root crop machines. *Machinery and Energetics*. 2013; 185:12-28. Available at: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Tekhnika/article/view/4625/4543>
5. Kulakov A.F., inventor and assignee. Cutting machine for vegetable ends. USSR Patent 246952, 1969 June 20. (In Russ.)
6. Steinberg R.V., Ilariev S.I., Vavilin V.S., inventors. All-Union Scientific Research and Design Institute of Baby Food Products and Management Systems for Agro-Industrial Complexes of Canning Industry, assignee. Device for trimming the ends of carrots. USSR Patent 982643 1982 Dec 23. (In Russ.)
7. Silifanov Yu.A., inventor and assignee. Device for trimming root ends. USSR Patent 1284497. 1987 Jan 23. (In Russ.)
8. Laryushin N.P., Kshnikatkin S.A., Kiryukhina T.A., inventors. Penza State Agricultural Academy, assignee. Device for trimming leaves of onions and roots. Ru Patent 2240712. 2004 Nov 27. (In Russ.)
9. Nesmiyan A. Yu., Yakovets A.V., Dolzhikov V.V., Ashitko S.A. Influence of physical and mechanical properties of seeds of cultivated crops on the quality of the pneumatic vacuum seeder. *Agro XXI*. 2012; 4-6:44-46. (In Russ.)
10. Nesmiyan A. Yu., Khronyuk Ye.V., Gaivoronskaya S.P., Pavlenko O.S., Bragin R.N. Dimensional characteristics of oilseeds hybrids of sunflower. *Vestnik agrarnoy nauki Dona = Don Agrarian Science Bulletin*. 2014; 1:39-46. Available at: <http://aagraa.pp/wp-content/uploads/2013/01/ref1-25-2014.pdf> (In Russ.)
11. Ahmadi R., Kalbasi-Ashtari A., Gharibzahedi S.M.T. Physical properties of psyllium seed. *International Agrophysics*. 2012; 26:91-93. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10247-012-0013-y>
12. Aydin C., Ozcan M. Some physico-mechanic properties of terebinth (*Pistacia terebinthus* L.) fruits. *Journal of Food Engineering*. 2002; 53(1):97-101. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00145-5](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00145-5)

Received 08.07.2018; revised 14.09.2018; published online 28.06.2019

About authors:

Andrey A. Ashitko, Post Graduate Student, Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University (21 Lenina St., Zernograd 347740, Russia), ResearcherID: N-6272-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4896-2682>, ashitko2010@yandex.ru

Evgeny A. Gavrish, Graduate Student, Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University (21 Lenina St., Zernograd 347740, Russia), ResearcherID: N-6380-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3573-0041>, zhenya.gavrisch@yandex.ru

Andrey Yu. Nesmiyan, Professor, Chair of Technologies and Mechanization Tools of Agriculture, Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University (21 Lenina St., Zernograd 347740, Russia), D.Sc. (Engineering), Associate Professor, ResearcherID: N-6221-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5556-1767>, nesmiyan.andrei@yandex.ru

Ruslan Yu. Kolesnik, Post Graduate Student, Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University (21 Lenina St., Zernograd 347740, Russia), ResearcherID: N-6372-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5614-2428>, microlis05-05@mail.ru

Contribution of the authors:

A. A. Ashitko – studying the size and mass characteristics of the Belokrayka radish plants, analyzing the level of mechanization of the processes of harvesting of root crops; E. A. Gavrish – studying the size and mass characteristics of the Celeste radish plants; A. Yu. Nesmiyan – writing the draft version of the article, analysing the results, proofreading the text of the article; R. Yu. Kolesnik – studying frictional properties of radish plants, creating a list of references.

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



Методика расчета длины резки растений кормоуборочными комбайнами: роторным и двойного измельчения

М. И. Белов

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

B-Mikhael@yandex.ru

Введение. Результаты многочисленных исследований доказывают, что качество корма из измельченных растений зависит от качества измельчения, которое обеспечивается кормоуборочным комбайном и определяется путем взвешивания фракций частиц разной длины. Представляет интерес теоретическое обоснование режимов измельчения трав на сенаж и другие виды кормов. Целью данной статьи является разработка алгоритма и методики оценки качества измельчения растений на основе математической модели измельчения кормоуборочным комбайном с роторным измельчающе-швыряющим аппаратом и кормоуборочным комбайном двойного измельчения (с двойным измельчающим аппаратом).

Материалы и методы. Изложены необходимые положения теории роторного измельчающего аппарата и двойного измельчающего аппарата кормоуборочного комбайна, на основе которых разработаны алгоритмы, методика расчета массовой доли частиц в заданных диапазонах длины и компьютерная модель измельчения.

Результаты исследования. Представлены алгоритмы и методика расчета массовой доли частиц растений, измельченных роторным аппаратом и двойным измельчающим аппаратом. Установлена связь массовой доли частиц в заданных диапазонах длины с высотой растений, высотой среза, подачей, средней расчетной длиной резки.

Обсуждение и заключение. Кормоуборочные комбайны с роторным измельчающе-швыряющим аппаратом не позволяют обеспечить заготовку трав на сенаж с массовой долей частиц длиной 8–19 мм в пределах от 45 % до 65–75 %, комбайны с двойным измельчающим аппаратом дают такую возможность только при регулировании угловой скорости шнека и/или дискового или цилиндрического барабана. Двойной измельчающий аппарат позволяет выполнить требования к качеству измельчения разных кормов, если предусмотрено регулирование угловой скорости шнека и/или дискового или цилиндрического барабана.

Ключевые слова: кормоуборочный комбайн, измельчающий аппарат, закон распределения частиц по длине, качество измельчения, длина резки, длина частиц, роторный комбайн, комбайн двойного измельчения

Для цитирования: Белов М. И. Методика расчета длины резки растений кормоуборочными комбайнами: роторным и двойного измельчения // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 2. С. 279–294. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.279-294>



The Method of Calculating Cut Length for Flail and Double Chop Forage Harvesters

M. I. Belov

Russian Timiryazev State Agrarian University (Moscow, Russia)

B-Mikhael@yandex.ru

Introduction. Many studies show that the chopped feed quality depends on the plants chopping quality. The quality of plant chopping, provided by a forage harvester, is defined by particle length distribution. It is important to find the theoretical basis of grass chopping regimes for making haylage and other kinds of feeds. The purpose of this study is to develop an algorithm and techniques to assess the quality of plant chopping based on mathematical models of chopping with the flail and double chop forage harvesters.

Materials and Methods. Mathematical models of a flail type unit and double chop unit were presented and used to develop the algorithms and method of calculating the cut length distribution.

Results. The algorithms and computation methods of cut length distribution were presented for a flail type unit and a double chop unit. The effect of the plant height, the height of cut, feed and the average length of cut on the mass fraction of particles within the specified ranges of lengths were investigated.

Discussion and Conclusion. A flail forage harvester is not able to harvest the grass crops for making haylage with 45–75 % forage particles, the length of which is in the range from 8 mm to 19 mm. A double chop forage harvester allows harvesting the grass crops for making haylage only when auger angular velocity and/or flywheel or cylinder drum angular velocity is regulated. A double chop device can be used to chop plants for preparation of various forages if auger angular velocity and/or flywheel or cylinder drum's angular velocity is regulated.

Keywords: forage harvester, chopper unit, particle length distribution, grinding quality, cut length, particle length, flail harvester, double chop harvester

For citation: Belov M.I. The Method of Calculating Cut Length for Flail and Double Chop Forage Harvesters. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(2):279-294. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.279-294>

Введение

Измельчение – главная операция, выполняемая кормоуборочным комбайном, и основной критерий эффективности его работы – выполнение агротехнических требований по качеству измельчения растений. Агротехнические требования по качеству измельчения растений регламентируют массовые доли фракций частиц в заданных диапазонах длины.

Результаты многочисленных исследований доказывают, что качество корма, изготовленного с помощью кормоуборочного комбайна, зависит от

качества измельчения растений [1–4], упрощенная методика оценки которого предполагает использование сепаратора частиц, содержащего три решета. Современные рекомендации к качеству измельчения трав на сенаж состоят в обеспечении следующих показателей массовой доли частиц: на верхнем решете с круглыми отверстиями диаметром 19 мм – 10–20 %, на среднем решете с круглыми отверстиями диаметром 8 мм – 45–75 %, на нижнем решете с квадратными отверстиями размером 1,3 мм – 10–20 %, под нижним решетом на нижней панели сепарато-

ра – менее 5 %¹. Представляет интерес определение режимов, обеспечивающих требуемое качество измельчения трав на сенаж. Задача определения качества измельчения сводится при этом к нахождению функции распределения массовой доли частиц по длине и может быть решена построением компьютерной модели измельчения растений.

Целью данной статьи является разработка алгоритма и методики оценки качества измельчения растений на основе математической модели измельчения роторным кормоуборочным комбайном и кормоуборочным комбайном двойного измельчения.

Обзор литературы

Качество измельчения растений, оцениваемое весовым содержанием фракций частиц в разных диапазонах длины, можно рассчитать посредством нахождения функции распределения массовой доли частиц по длине. Анализом разделения растений на части при их резании и измельчении кормоуборочными комбайнами занимались многие ученые.

Математическое представление функции распределения по длине массовой доли частиц растений, измельченных кормоуборочными комбайнами, с помощью функций нормального и логнормального распределения изучено в ряде исследований [5–7]. Кроме того, отмечалось, что распределение массовой доли частиц по длине не является нормальным; предлагалось представлять плотность распределения в виде суммы функций параболического и экспоненциального типа [8]. Японские ученые предложили математическую модель измельчения растений роторным кормоуборочным комбайном при низком

и высоком стеблестое кукурузы и сорго [9]. Данная модель не учитывает многократное перерезание наклонных стеблей, сдвинутых передним щитком.

Вопрос о функции распределения массовой доли частиц растений, измельченных кормоуборочными комбайнами двойного измельчения, недостаточно изучен.

Измельчающие и измельчающе-швыряющие аппараты современных кормоуборочных комбайнов традиционно разделяются на две категории: аппараты, обеспечивающие точную (расчетную) длину резки, и не обеспечивающие ее². Признаком первой категории является тип подачи растений в камеру измельчающего или измельчающе-швыряющего аппарата, при котором растения сжимаются и подаются сжатым слоем между вальцами питающего аппарата. Признаком второй категории служит подача растений в камеру измельчителя не вальцами питающего аппарата, а другим способом (как правило, шнеком).

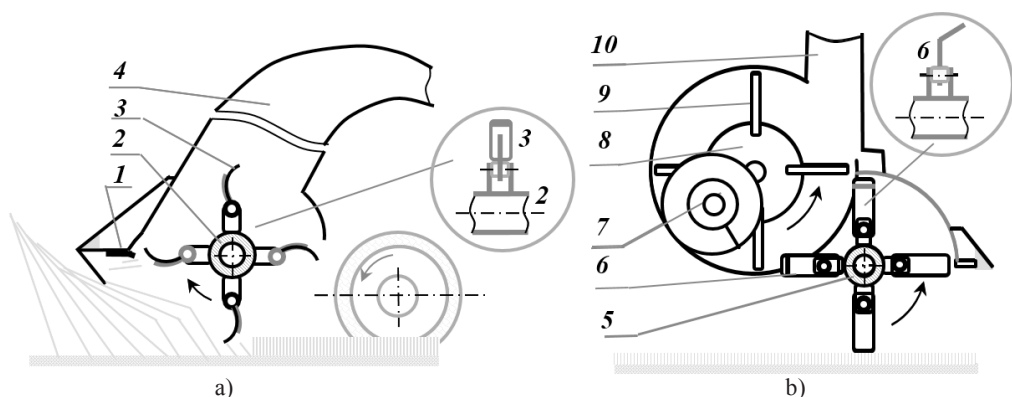
Классифицируя комбайны на рынке в 1980-е гг., С. Хоу и Т. Бишоп отметили семь групп, главным отличием которых друг от друга был тип измельчающего аппарата [10]. Роторные кормоуборочные комбайны и комбайны двойного измельчения занимали и занимают нишу машин, используемых в малых хозяйствах на заготовке зеленых кормов [11; 12].

1. Роторный кормоуборочный комбайн оснащен роторным измельчающе-швыряющим аппаратом со швырковыми ножами (рис. 1, а).

2. Роторный кормоуборочный комбайн со швырлялкой оснащен роторным измельчающим аппаратом с режущими

¹ From harvest to feed: understanding silage management / C. M. Jones [et al.]. Penn State's College of Agricultural Science. 2004. 34 p. URL: http://pss.uvm.edu/pdpforage/Materials/CuttingMgt/From_Harvest_to_Feed_Understanding_Silage_management_PennState.pdf; **Wiersma D.** Theoretical length of cut: Theory and practice // Progressive Dairyman Canada. 2013. URL: <https://www.progressivedairyman.ca/topics/feed-nutrition/theoretical-length-of-cut-theory-and-practice>

² Engineering principles of agricultural machines. – 2nd ed. / A. K. Srivastava [et al.]. ASAE. 2006. 604 p. URL: [https://fcaib.edu.ng/books/Engineering/%5BAjit_K._Srivastava__Carroll_E._Goering%5D_Engineer\(BookFi.org\).pdf](https://fcaib.edu.ng/books/Engineering/%5BAjit_K._Srivastava__Carroll_E._Goering%5D_Engineer(BookFi.org).pdf)



Р и с. 1. Схемы кормоуборочных комбайнов с роторным измельчающе-швыряющим аппаратом (а) и с роторным измельчающим аппаратом в комплекте со швырлякой (б):
1 – противорежущий брус; 2 – ротор; 3 – швыряющий нож; 4 – выгрузный трубопровод; 5 – ротор; 6 – режущий Г-образный нож; 7 – шнек; 8 – швырляка; 9 – лопасть швырлялки; 10 – выгрузной трубопровод

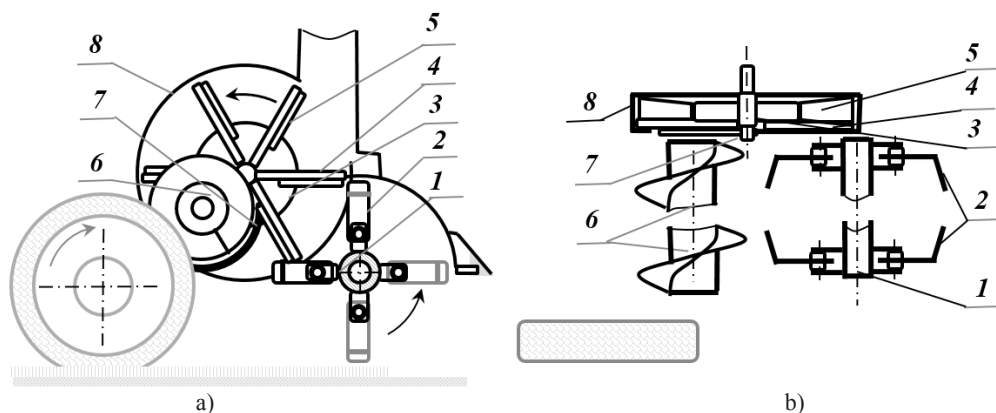
Fig. 1. A traditional flail forage harvester (a) and a flail forage harvester with a blower (b):
1 – shearbar; 2 – rotary cutter; 3 – throwing knife; 4 – discharge pipe; 5 – rotary cutter; 6 – L- shape knife; 7 – auger; 8 – blower; 9 – blower blade; 10 – discharge pipe

ножами (рис. 1, б). Измельченные растения сначала выгружаются в шнек и затем шнеком подаются в швырляку.

3. Кормоуборочный комбайн двойного измельчения оснащен роторным измельчающим аппаратом и дисковым

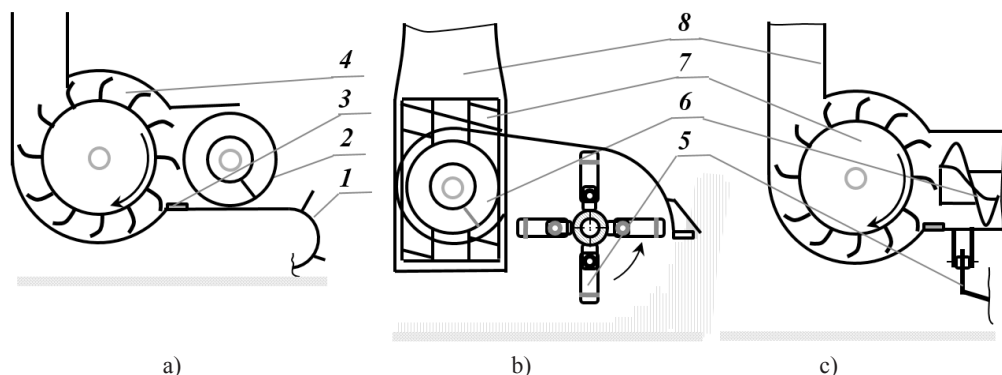
измельчающе-швыряющим аппаратом (рис. 2).

4. К кормоуборочным комбайнам, не обеспечивающим точную длину резки, относятся комбайны с цилиндрическим измельчающе-швыряющим



Р и с. 2. Кормоуборочный комбайн двойного измельчения с роторным измельчающим аппаратом и дисковым измельчающе-швыряющим аппаратом при виде слева (а) и сверху (б):
1 – роторный измельчающий аппарат; 2 – режущие Г-образные ножи; 3 – дисковый измельчающе-швыряющий аппарат; 4 – ножи дискового аппарата; 5 – швырковые лопасти дискового аппарата; 6 – шнек; 7 – противорежущие брусья; 8 – кожух дискового измельчающе-швыряющего аппарата и выгрузной трубопровод

Fig. 2. A double chop forage harvester with a rotary cutter and with a flywheel cutterhead on the left side (a) and on the top (b): 1 – rotary cutter; 2 – L-shape blades; 3 – flywheel cutter-head; 4 – blades of a flywheel cutterhead; 5 – throwing paddles of a flywheel cutterhead; 6 – auger; 7 – a shearbars; 8 – flywheel cutterhead case and discharge pipe



Р и с. 3. Схема кормоуборочного комбайна с цилиндрическим измельчающе-швыряющим аппаратом (а) и комбайна двойного измельчения с роторным аппаратом и цилиндрическим измельчающе-швыряющим аппаратом при виде сбоку (b) и спереди (с):

1 – подборщик; 2 – шнек; 3 – противорежущий брус; 4 – цилиндрический измельчающе-швыряющий аппарат; 5 – нож роторного измельчающего аппарата; 6 – шнек; 7 – цилиндрический измельчающе-швыряющий аппарат; 8 – выгрузный трубопровод

Fig. 3. A forage harvester with a cylinder cutterhead (a) and a double chop forage harvester with a rotary cutter and with a cylinder cutterhead on the left side (a) and from the front (b): 1 – pick up; 2 – auger; 3 – shearbar; 4 – cylinder type cutterhead with throwing blades; 5 – knife of a rotary cutter; 6 – auger; 7 – cylinder type cutterhead with throwing blades; 8 – discharge pipe

аппаратом, в камеру которого растения подаются шнеком (рис. 3, а) [10].

5. Разновидностью комбайнов двойного измельчения является комбайн с роторным измельчающим аппаратом и цилиндрическим измельчающе-швыряющим аппаратом (рис. 3, b–c) [Там же].

Материалы и методы

Методика оценки качества измельчения реализована в виде компьютерной модели измельчения растений роторным кормоуборочным комбайном и кормоуборочным комбайном двойного измельчения, разработанной в среде Lazarus 1.8.4. Математическая модель и алгоритмы расчета фракционного состава частиц измельченных растений изложены далее. В расчетах использованы данные современных комбайнов (табл. 1).

Результаты исследования

Математическая модель резания растений ножами роторного измельчающего аппарата

Рассмотрим роторный измельчающе-швыряющий аппарат. Введем следующие обозначения: s_m – наибольшая длина отрезанных частиц растения,

срезанного на корню и перерезаемого в третий раз и далее, мм; L – заданная длина отрезка, мм; M_L – масса частиц растений заданной совокупности, длина каждой из которых не превышает L , кг; M_T – масса частиц растений заданной совокупности, кг; m_L – массовая доля частиц растений заданной совокупности, длина каждой из которых не превышает L , %; m – массовая доля частиц растений заданной совокупности, длина каждой из которых находится в пределах от 8 до 19 мм, %. Прочие обозначения указаны на рис. 4.

Будем считать, что ножи роторного комбайна измельчают первоначально прямостоящие вертикальные стебли.

Запишем соотношения между параметрами ($H - h$), s , R , k [13]:

$$\lambda s = (2\pi / k) R, \quad (1)$$

$$\lambda \sin \theta = \pi / k + \theta, \quad (2)$$

где θ – параметр, обозначающий угол, показанный на рис. 4, а.

Примем, что начало O неподвижной системы координат расположено на оси

Таблица 1
Table 1

Модели и параметры роторных кормоуборочных комбайнов и комбайнов двойного измельчения Flail forage harvesters and double chop forage harvesters models and parameters

Компания, модель (и) / Company, model (s)	Номер рисун- ка / Figure no.	Радиус ротора, мм / Rotor radius R, mm	Число k ножей на роторе в плоско- сти вращения / Number k of flail knives in rotation plane	Угловая скорость ω ротора, об/мин / Angular velocity ω of a rotor, rpm	Скорость v комбайна, км/час / Speed v of a tractor, km/h	Диаметр D ди- скового измель- чающего аппарата по краям ножей, мм / Diameter D of a flywheel cut- terhead, mm	Угловая ско- рость ω диска, об/мин / Angu- lar velocity ω of a flywheel cutterhead, rpm	Число n ножей дискового аппа- рата / Number n of flywheel cut- terhead knives	Ширина W приемной горловины дискового аппарата, мм / Fly- wheel chopper input throat width W , mm
Staalmeester GH 130 ³	1	н/д / n.a.	1	н/д / n.a.	8–10	–	–	–	–
Hiniker 5710 ⁴	1	307*	1	1 503*	н/д / n.a.	–	–	–	–
Celikel Tarim 1300; 1500 ⁵	1	н/д / n.a.	1	1 350	н/д / n.a.	–	–	–	–
Кормамаш КИР-1.5М / Kormmash KIR-1.5M ⁶	1	286	1	1 500	≤8	–	–	–	–
FIMAX RF 132; RF 152 ⁷	1	н/д / n.a.	н/д / n.a.	н/д / n.a.	н/д / n.a.	–	–	–	–
John Deere 72 ⁸	2	н/д / n.a.	2	1 366	н/д / n.a.	н/д / n.a.	800	3(6)	246
New Holland 38 ⁹	2	н/д / n.a.	н/д / n.a.	1 373	н/д / n.a.	н/д / n.a.	966	3(6)	н/д / n.a.
Staalmeester DS 540 ¹⁰	2	н/д / n.a.	2	1 655	н/д / n.a.	810	1 258	6	н/д / n.a.
Elho DC2100 S ¹¹	2	н/д / n.a.	2	2 000	н/д / n.a.	н/д / n.a.	1 080	8	н/д / n.a.
Fimax 1500; 2100 ¹²	2	н/д / n.a.	2	н/д / n.a.	н/д / n.a.	н/д / n.a.	н/д / n.a.	6	н/д / n.a.
Ростсельмаш Стерх 2000 / Rostselmash Sterh 2000 ¹³	2	н/д / n.a.	1	1 500	н/д / n.a.	н/д / n.a.	1 000	6	н/д / n.a.

Примечание: * – расчетное значение; н/д – нет данных / Note: * – calculated data; n.a. – not available

³ Celmak Forage Harvesters. URL: http://www.staalmeester.co.za/Celmak_forage_harvesters.html

⁴ 5710 Flail Mower/Shredder. URL: https://www.hiniker.com/ag_products%20new/5710flailmower.html; Flail chopper shredder Model 5710 (with identification no.'s ending 100 and higher) : Operator's manual. URL: https://www.hiniker.com/ag_products%20new/manuals/Operator's%20Manuals/79202099.pdf

⁵ Forage harvester. URL: <http://www.celikeltarim.com/en/forage-harvester.html>

⁶ Косилка-измельчитель поторная КИР-1,5М. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. URL: http://agtz.ru/upload/iblock/420/Rukovodstvo-po-ekspluatatsii-KIR-1_5.pdf

⁷ Fimaks silaj makineleri. URL: <http://fimaks.com/wp-content/uploads/2018/03/Silaj-Makineleri-K.pdf>

⁸ Hay and Forage Harvesting Equipment. URL: <https://www.deere.com/en/hay-forage/harvesting>

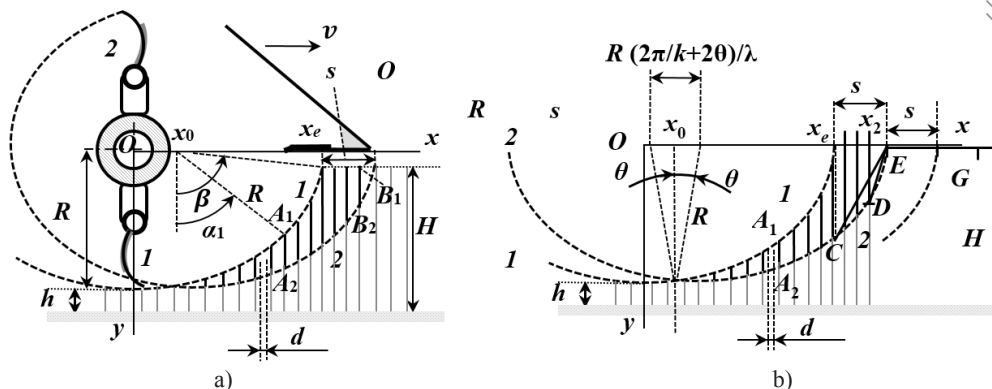
⁹ Pull-type forage harvesters and flail harvester. URL: <http://d3u1quraki94yp.cloudfront.net/nhag/nar/en-us/assets/pdf/hay-tools/pull-type-forage-harvester-brochure-us-en.pdf>

¹⁰ Celmak Forage Harvesters. URL: http://www.staalmeester.co.za/Celmak_forage_harvesters.html

¹¹ Forage Harvesters. URL: <https://www.elho.fi/products/forage-harvesters>

¹² Fimaks silaj makineleri. URL: <http://fimaks.com/wp-content/uploads/2018/03/Silaj-Makineleri-K.pdf>

¹³ Кормоуборочные комбайны. URL: https://rostselmash.com/products/forage_harvesters



Р и с. 4. Резание невысоких (а) и высоких растений, высота которых превышает расстояние от оси ротора до их основания (б): 1, 2 – траектории точек лезвий соседних ножей 1 и 2 на одной окружности; $A_1A_2, B_1B_2, CE, DE, EG$ – отрезки растений после срезания ножом; Oxy – неподвижная ортогональная система декартовых координат с горизонтальной осью Ox и вертикальной осью Oy , направленной вверх; k – число ножей в плоскости вращения; h – минимальная высота стеблей после срезания, мм; H – высота стеблей до срезания, мм; R – радиус ротора (расстояние от оси ротора до лезвия ножа), мм; d – шаг по оси Ox , мм; s – подача или перемещение ротора вдоль оси Ox за время поворота на угол, равный радиальному углу, образуемому соседними ножами в плоскости вращения, мм; θ – угол (параметр), рад; ω – угловая скорость ротора, рад/с; v – скорость точки оси ротора вдоль оси Ox , мм/с; λ – кинематический параметр ($\lambda = R\omega/v$); x_1, y_1 – координаты x, y точки лезвия ножа 1; x_2, y_2 – координаты x, y точки лезвия ножа 2; β – угол (параметр); α_1 – угол (параметр); x_0, x_e – дополнительные значения

F i g. 4. Low plants cutting (a) and cutting of high plants, whose height is greater than the distance from the axis of the rotor to the base of the plants (b): 1, 2 – trajectories of knife tips 1 and 2; $A_1A_2, B_1B_2, CE, DE, EG$ – plant cuts after cutting by knife; Oxy – fixed orthogonal Cartesian coordinates with horizontal axis Ox and vertical upward axis Oy ; k – number of knives in the plane of rotation; h – minimal height of the stems after cutting; H – height of the stems before cutting; R – radius of a rotor; d – step in the Ox direction; s – distance between neighboring trajectories of knives along an axis Ox ; θ – angle (parameter); ω – angular velocity of the rotor; v – speed of the rotor axis point along an axis Ox ; λ – kinematic parameter ($\lambda = R\omega/v$); x_1, y_1 – x, y coordinates of the point of the blade 1; x_2, y_2 – x, y coordinates of the point of the blade 2; β – angle (parameter); α_1 – angle (parameter); x_0, x_e – additional values

ротора в тот момент, когда нож 1 находится в нижнем положении (рис. 4, а). Уравнения траектории 1 точки лезвия ножа 1 в параметрическом виде запишем следующим образом [Там же]:

$$\begin{cases} x_1 = R(\alpha_1 / \lambda + \sin \alpha_1) \\ y_1 = R \cos \alpha_1, \end{cases} \quad (3)$$

где α_1 – параметр, обозначающий угол, показанный на рисунке 4, а ($\alpha_1 \geq 0$).

Уравнение траектории 2 точки лезвия ножа 2 записываются аналогичным образом:

$$\begin{cases} x_2 = R[(\alpha_2 + 2\pi/k)/\lambda + \sin \alpha_2] \\ y_2 = R \cos \alpha_2, \end{cases} \quad (4)$$

где α_2 – параметр, обозначающий угол, показанный на рисунке 4, а ($\alpha_2 \geq -2\pi/k$).

Резание рассматривалось как множество циклов; за цикл принималось резание лезвием ножа 2 растений между траекториями 1 и 2.

Разделим фигуру между траекториями 1 и 2 на две части в пределах двух интервалов по оси Ox :

$$x_0 \leq x_1 \leq x_e, \quad (5)$$

$$x_e \leq x_2 \leq x_e + s, \quad (6)$$

где x_0 – координата нижней точки пересечения траекторий 1 и 2 по оси Ox ; x_e – координата верхней точки пересечения траектории 1 со стеблем по оси Ox .

Следующее равенство можно использовать для определения x_0 (рис. 4, b):

$$x_0 = R(\theta / \lambda + \sin \theta). \quad (7)$$

Величина x_e может быть найдена с помощью следующих формул (рис. 4, b):

$$x_e = \begin{cases} R(\beta / \lambda + \sin \beta), & 0 < H - h < R \\ R(0,5\pi / \lambda + 1), & H - h \geq R, \end{cases} \quad (8)$$

где $\cos \beta = (R + h - H) / R$.

В пределах первого интервала ($x_0 \leq x_1$, $x_2 \leq x_e$) длина u частицы равна длине отрезка A_1A_2 (рис. 4):

$$u = y_2 - y_1, \quad (9)$$

где x_1 , y_1 , x_2 , y_2 можно определить из уравнений (3–4) и принять $x_1 = x_2$.

В пределах второго интервала $x_e \leq x_2 \leq x_e + s$ длина u частицы зависит от высоты растений. Короткие растения ($H - h \leq R$) не упираются в передний щиток и не сгибаются им перед срезанием. Длина u частиц коротких растений равна длине отрезка B_1B_2 (рис. 4, a):

$$u = y_2 + H - h - R, \quad (10)$$

где y_2 определяется из уравнений (4).

Примем, что:

1) высокие растения ($H > R + h$) упираются в передний щиток и изгибаются перед щитком;

2) срезанное в нижней точке C высокое растение перерезается тем же ножом в режущей паре «нож – противорежущий брус» в точке E , если длина верхней части растения превышает длину отрезка CE (рис. 4, b);

3) оставшаяся после резания в точке E часть высокого растения в виде

отрезка EG перерезается следующими ножами в режущей паре «нож – противорежущий брус» на отрезки длиной s и последний отрезок, длина которого не превышает s .

Пусть N – число частей, равное числу резаний высокого растения от нижней точки C с координатами x_2 , y_2 ($x_e \leq x_2 \leq x_e + s$); u_i – длина i -й части ($1 \leq i \leq N$); L_{CE} – длина отрезка CE , где $L_{CE} = [y_2^2 + (x_e + s - x_2)^2]^{1/2}$.

Найдем число N и длины всех частей высокого растения после резания его ножами с учетом принятых допущений.

Если $H - (R + h) < L_{CE}$, то $N = 1$ и $u_1 = H - (R + h) + y_2$; иначе:

1) $u_1 = L_{CE}$; $k = 2$;

2) $u_k = s$;

3) если $\sum_{i=1}^k u_i + R + h - y_2 \geq H$, то $N = k$ и $u_N = H - (R + h) + y_2 - \sum_{i=1}^{N-1} u_i$; иначе $k = k + 1$. Далее следует переход к пункту 2.

Пусть l – длина верхней части прямого растения; $M(l)$ – масса верхней части растения длиной l . Примем, что плотность ρ растения на единицу длины в данной точке (сечении) увеличивается прямо пропорционально расстоянию y от вершины растения до точки:

$$\rho = a y, \\ M(l) = a l^2 / 2,$$

где a – коэффициент пропорциональности.

Тогда массу части растения длиной Δ , расположенной на расстоянии l от вершины растения, можно рассчитать по формуле:

$$m(l, \Delta) = M(l + \Delta) - M(l)$$

или

$$m(l, \Delta) = a[(l + \Delta)^2 - l^2] / 2. \quad (11)$$

Согласно определению,

$$m_L = 100 M_L / M_T, \quad (12)$$

где M_T – сумма вычисляемых по формуле (11) без коэффициента a и при заданных параметрах l, Δ масс всех частиц; M_L – сумма вычисляемых по формуле (11) без коэффициента a масс тех частиц, длина Δ которых не превышает заданной величины L .

Согласно определению,

$$m = m_L|_{L=19\text{mm}} - m_L|_{L=8\text{mm}}. \quad (13)$$

Алгоритм расчета массовой доли частиц в заданных диапазонах длины

Пусть $SubA(l, \Delta, L, M_L, M_T)$ – подпрограмма с входными переменными l, Δ, L и выходными переменными M_L, M_T , выполняющая три шага.

1. Расчет $m(l, \Delta)$ по формуле (11) без коэффициента a .

2. Увеличение параметра M_T на $m(l, \Delta)$.

3. Увеличение параметра M_L на $m(l, \Delta)$, если $l \leq L$.

Следующий алгоритм был реализован для вычисления величины m_L .

1. Назначение входных переменных $R, (H-h), s, d, L, k$.

2. Расчет величины λ из уравнения (1).

3. Расчет величины θ из уравнения (2).

4. Расчет величин x_0, x_e по формулам (7–8).

5. Назначение переменных I, M_L, M_T : $I = 1$; $M_L = 0$; $M_T = 0$.

6. Назначение величины x_1 : $x_1 = x_0 + Id$.

7. Вычисление величин α_1 и y_1 из уравнений (3).

8. Назначение величины x_2 : $x_2 = x_1$.

9. Вычисление величин α_2 и y_2 из уравнений (4).

10. Вычисление длины u частицы из равенства (9) и выполнение подпрограммы $SubA(l, \Delta, L, M_L, M_T)$ при $l = H - R - h + y_1, \Delta = u$.

11. Увеличение переменной I на 1.

12. Выполнение пунктов 6–11, если $x_1 \leq x_e$.

13. Назначение величины x_2 : $x_2 = x_0 + Id$.

14. Если $H - h \leq R$, то:

1) вычисление длины u частицы из равенства (10);

2) выполнение подпрограммы $SubA(l, \Delta, L, M_L, M_T)$ при $l = 0, \Delta = u$.

15. Если $H - h > R$, то:

1) вычисление длины отрезка CE : $L_{CE} = [y_2^2 + (x_e + s - x_2)^2]^{1/2}$;

2) если $H - R - h + y_2 < L_{CE}$, то:

а) $u_1 = H - (R + h) + y_2$;

б) выполнение подпрограммы $SubA(l, \Delta, L, M_L, M_T)$ при $l = 0, \Delta = u_1$;

3) если $H - R - h + y_2 \geq L_{CE}$, то:

а) $u_1 = L_{CE}$; $u_{sum} = u_1$; выполнение подпрограммы $SubA(l, \Delta, L, M_L, M_T)$ при $l = H - R - h + y_2 - u_1, \Delta = u_1$;

б) если $u_{sum} + s + R + h - y_2 \geq H$, то $u_1 = H - (R + h) + y_2 - u_{sum}$; выполнение подпрограммы $SubA(l, \Delta, L, M_L, M_T)$ при $l = 0, \Delta = u_1$;

в) если $u_{sum} + s + R + h - y_2 < H$, то $u_1 = s$; $u_{sum} = u_{sum} + s$; выполнение подпрограммы $SubA(l, \Delta, L, M_L, M_T)$ при $l = H - R - h + y_2 - u_{sum}, \Delta = u_1$ и возвращение к предыдущему шагу 2.

16. Увеличение переменной I на 1.

17. Выполнение пунктов 13–16, если $x_2 \leq x_e + s$.

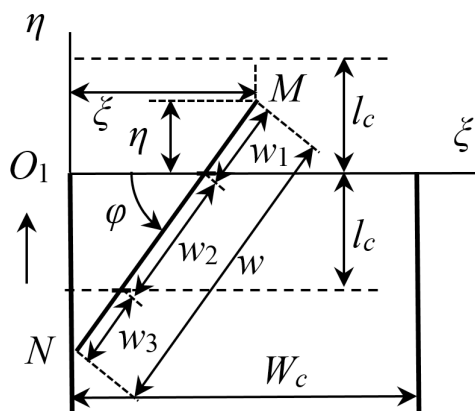
18. Вычисление величины m_L по формуле (12).

Математическая модель резания частиц растений в измельчающем аппарате двойного измельчения

Измельчение растений кормоуборочным комбайном двойного измельчения (с двойным измельчающим аппаратом) включает две стадии: измельчение роторным аппаратом на первой стадии и измельчение с выгрузкой растений дисковым измельчающе-швыряющим аппаратом на второй стадии. На выходе из роторного аппарата частицы захватываются шнеком и подаются в приемное окно дискового аппарата. Будем считать, что в шнеке частицы растений представляют собой прямые отрезки, движущиеся вдоль оси шнека с некоторой известной средней скоростью, позволяющей рассчитать среднюю расчетную длину резки.

Введем неподвижную систему декартовых координат с осью $O_1\xi$ вдоль прямого лезвия противорезающего бруса и осью $O_1\eta$ вдоль оси шнека, а также дополнительные переменные: w – длина частицы в виде отрезка MN в момент резания ее ножом дискового аппарата, мм; m_w – масса частицы в виде отрезка MN в момент резания ее ножом дискового аппарата, кг; W_c – ширина приемной горловины дискового измельчающе-швыряющего аппарата, мм; l_c – средняя расчетная длина резки, обеспечиваемая дисковым измельчающе-швыряющим аппаратом, мм.

Пусть в момент перерезания частица MN располагается в плоскости $O_1\xi\eta$, передняя точка M имеет координаты ξ , η , отрезок MN образует с осью $O_1\xi$ угол φ (рис. 5).



Р и с. 5. Частица MN в приемном окне дискового аппарата в момент резания ножом
Fig. 5. A particle MN at the cutting by a blade of a flywheel cutterhead

Примем, что переменные ξ , η , φ – случайные величины с равномерным законом распределения на отрезках $[0, W_c/2]$, $[0, l_c]$ и $[\varphi_1, \varphi_2]$ соответственно:

$$\begin{aligned} 0 < \xi &\leq W_c / 2, \\ 0 < \eta &\leq l_c, \\ \varphi_1 &\leq \varphi \leq \varphi_2, \end{aligned} \quad (14)$$

где величины φ_1 , φ_2 зависят от ξ :

$$\varphi_1 = \begin{cases} 0, & \text{если } w \leq \xi, \\ \arccos(\xi / w), & \text{если } w > \xi, \end{cases} \quad (15)$$

$$\varphi_2 = \begin{cases} \pi, & \text{если } w \leq W_c - \xi, \\ \pi - \arccos[(W_c - \xi) / w], & \text{если } w > W_c - \xi. \end{cases} \quad (16)$$

Число n частей, сформированных из частицы MN после всех перерезаний ее ножами дискового аппарата, может быть рассчитано по следующим формулам:

$$n = \begin{cases} 1, & \text{если } w \sin \varphi \leq \eta, \\ \left[(w \sin \varphi - \eta) / l_c \right] + 2, & \text{если } w \sin \varphi > \eta. \end{cases} \quad (17)$$

Пусть w_i и m_i – длина и масса части частицы MN с номером i ($i = 1, 2, \dots, n$). Найдем выражения для длины и массы всех частей частицы, если величины w , m_w , φ , η , l_c известны, а массы частей прямо пропорциональны их длинам.

Если $n = 1$, частица MN не перерезается, и ее длина и масса не изменяются:

$$\begin{aligned} w_1 &= w, \\ m_1 &= m_w. \end{aligned} \quad (18)$$

Если $n = 2$, частица MN перерезается один раз, образуя две части. Длины w_1 , w_2 и массы m_1 , m_2 этих частей можно рассчитать по формулам:

$$\begin{aligned} w_1 &= \eta / \sin \varphi, \\ w_2 &= w - w_1, \\ m_1 &= w_1 m_w / w, \\ m_2 &= w_2 m_w / w. \end{aligned} \quad (19)$$

Если $n > 2$, частица MN перерезается с образованием n частей. Длины w_1 , w_2, \dots, w_n и массы этих частей можно рассчитать по формулам:

$$\begin{aligned} w_1 &= \eta / \sin \varphi, \\ w_2 &= w_3 = \dots = w_{n-1} = l_c / \sin \varphi, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w_n &= w - w_1 \dots - w_{n-1}, \\ m_i &= w_i m_w / w, \\ i &= 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (20)$$

Случайные величины ξ , η , φ можно задавать с любой точностью следующими формулами:

$$\xi = iW_c / (2n_\xi), \quad (21.1)$$

$$\eta = jl_c / n_\eta, \quad (21.2)$$

$$\varphi = \varphi_1 + q(\varphi_2 - \varphi_1) / n_\varphi, \quad (21.3)$$

где n_ξ , n_η , n_φ – заданные натуральные числа; i, j, q – целые числа: $i = 1, 2, \dots, n_\xi$; $j = 1, 2, \dots, n_\eta$; $q = 1, 2, \dots, n_\varphi$.

Так как ξ , η , φ – случайные величины с равномерным законом распределения, то целые числа i, j, q в равенствах (21) можно также рассматривать как случайные величины в пределах от 1 до n_ξ от 1 до n_η от 1 до n_φ соответственно с вероятностью $1/n_\xi$, $1/n_\eta$, $1/n_\varphi$ соответственно¹⁴. Величины φ_1 , φ_2 в формулах (15–16) зависят от i . Число комбинаций, в которых целые числа i, j, q примут все возможные значения, равно произведению $(n_\xi \cdot n_\eta \cdot n_\varphi)$.

Алгоритм вычисления массовой доли частиц в заданных диапазонах длины

Пусть w , m_w – входные переменные, обозначающие длину и массу частицы до перерезания ножами дискового аппарата. Представим алгоритм подпрограммы $SubB(w, m_w, L, M_L, M_T)$, предназначенной для изменения величин переменных M_L, M_T .

1. Назначение переменных W_c , w , m_w , l_c , L , M_L , M_T .

2. Назначение констант n_ξ , n_η , n_φ и переменной i : $i = 1$.

3. Вычисление величины ξ по формуле (21.1).

4. Вычисление величин φ_1 , φ_2 по формулам (15–16).

5. Назначение переменной j : $j = 1$.

6. Вычисление величины η по формуле (21.2).

7. Назначение переменной q : $q = 1$.

8. Вычисление величины φ по формуле (21.3).

9. Вычисление величины n по формуле (17).

10. Вычисление величин w_1 и m_1 по формулам (18), если $n = 1$, или величин w_1 , w_2 и m_1 , m_2 по формулам (19), если $n = 2$, или величин w_1 , w_2 , ... w_n и m_1 , m_2 , ... m_n по формулам (20), если $n > 2$.

11. Увеличение параметра M_T на m_1 , если $n = 1$, или на m_1 и m_2 , если $n = 2$, или на m_1 , m_2 , ... m_n , если $n > 2$.

12. Увеличение параметра M_L на m_1 , если $w_1 \leq L$; увеличение параметра M_L на m_2 , если $w_2 \leq L$; увеличение параметра M_L на m_n , если $w_n \leq L$.

13. Увеличение переменной q на 1.

14. Выполнение шагов 8–13, если $\varphi < \varphi_2$.

15. Увеличение переменной j на 1.

16. Выполнение шагов 6–15, если $\eta < l_c$.

17. Увеличение переменной i на 1.

18. Выполнение шагов 3–17, если $\xi \leq W_c / 2$.

Алгоритм расчета величины m_L для двойного измельчающего аппарата совпадает с алгоритмом расчета m_L для роторного измельчающе-швыряющего аппарата, где в пунктах 10, 14 и 15 внесены следующие изменения.

10. Вычисление длины u частицы из равенства (9); вычисление массы m_w частицы по формуле (11) при $a = 1$, $l = H - R - h + y_1$, $\Delta = u$, выполнение подпрограммы $SubB(w, m_w, L, M_L, M_T)$ при $w = u$.

В пункте 14:

2) Вычисление массы m_w частицы по формуле (11) при $a = 1$, $l = 0$, $\Delta = u$, выполнение подпрограммы $SubB(w, m_w, L, M_L, M_T)$ при $w = u$.

В пункте 15:

2) б) Вычисление массы m_w частицы по формуле (11) при $a = 1$, $l = 0$, $\Delta = u_1$, выполнение подпрограммы $SubB(w, m_w, L, M_L, M_T)$ при $w = u_1$.

¹⁴ Polyanin A. D., Manzhirov A. V. Handbook of mathematics for engineers and scientists. Taylor & Francis Group, LLC, 2007. 1509 p. URL: <https://isidore.co/calibre/get/pdf/6338>

3) Если $H - R - h + y_2 \geq L_{CE}$, то:

а) $u_1 = L_{CE}$; $u_{sum} = u_1$; вычисление массы m_w частицы по формуле (11) при $a = 1$, $l = H - R - h + y_2 - u_1$, $\Delta = u_1$, выполнение подпрограммы $SubB(w, m_w, L, M_L, M_T)$ при $w = u_1$;

б) если $u_{sum} + s + R + h - y_2 \geq H$, то $u_1 = H - (R + h) + y_2 - u_{sum}$, вычисление массы m_w частицы по формуле (11) при $a = 1$, $l = 0$, $\Delta = u_1$, выполнение подпрограммы $SubB(w, m_w, L, M_L, M_T)$ при $w = u_1$;

в) если $u_{sum} + s + R + h - y_2 < H$, то $u_1 = s$; $u_{sum} = u_{sum} + s$; вычисление массы m_w частицы по формуле (11) при $a = 1$, $l = H - R - h + y_2 - u_{sum}$, $\Delta = u_1$, выполнение подпрограммы $SubB(w, m_w, L, M_L, M_T)$ при $w = u_1$ и возвращение к предыдущему шагу 2.

Расчет массовой доли частиц в заданных диапазонах длины

Алгоритм расчета массовой доли частиц растений в заданных диапазонах длины был реализован в среде программирования Lazarus. Исходные данные назначаемых переменных и констант приведены в табл. 2.

Расчеты показали, что распределение по длине массовой доли m_L частиц растений, измельченных роторным аппаратом, имеет три участка, на которых функция распределения может быть аппроксимирована линейными зависимостями от аргумента L (рис. 6, а). На первом участке аргумент изменяется в диапазоне от нуля до величины, не превышающей подачи s на нож, на втором – равен подаче s с незначительным варьированием нижней и верхней границы диапазона, на третьем – в диапазоне от величины подачи до максимальной длины частиц. Испытания

роторного кормоуборочного комбайна типа КИР-1,5 на кошени с измельчением люцерны высотой 440 мм¹⁵ показали, что, несмотря на значительный диапазон, экспериментальные значения массовой доли частиц длиной до 50 мм и свыше 100 мм практически точно соответствуют теоретически найденным значениям, показанным на графике 1 функции распределения (рис. 6, а). Максимальное согласование между экспериментальными и расчетными данными массовой доли частиц длиной свыше 100 мм наблюдается при кошении с измельчением вики с овсом¹⁶ высотой 780 мм (график 3) и эспарцета¹⁷ высотой 1 200 мм (график 4).

Двойной измельчающий аппарат повышает качество измельчения в том случае, если частота вращения шнека и/или дискового или цилиндрического аппарата обеспечивают среднюю расчетную длину резки, не превышающую величины подачи роторного аппарата (рис. 6, б). При этом массовая доля частиц, длина которых превышает 100 мм, снижается практически до нуля, а наибольшая доля частиц находится в диапазоне увеличенной и уменьшенной на 5 мм расчетной длины резки, изменяясь от 45 % при расчетной длине резки 25 мм до 75 % при расчетной длине резки 5 мм. Таким образом, невозможность регулирования угловой скорости шнека и/или дискового барабана не позволяет использовать двойной измельчающий аппарат на заготовке кормов с различными требованиями к качеству измельчения.

Расчеты показали, что роторные кормоуборочные комбайны не позволяют обеспечить качество измельчения

¹⁵ Косилка-измельчитель роторная КИР-1,5М. Протокол испытаний № 11-11-13 (2130042). ФГБУ «Северо-Кавказская МИС». Зерноград. 2013. 6 с.; Косилка-измельчитель роторная КИР-1,85 «Корммаш». Отчет № 11-25-14 (1130122) базовых испытаний. ФГБУ «Северо-Кавказская МИС». Зерноград. 2014. 12 с.

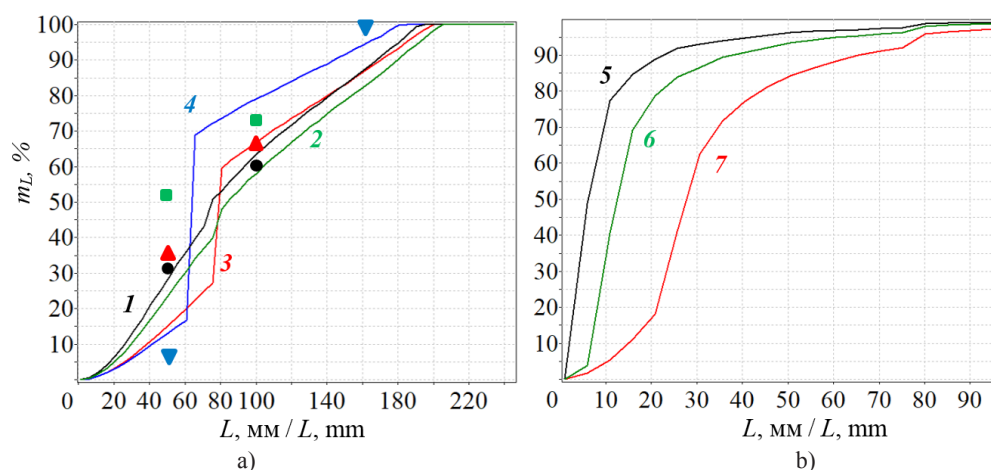
¹⁶ Косилка-измельчитель роторная КИР-1,5М. Протокол испытаний. ФГБУ «Подольская государственная зональная МИС». 2015. URL: <http://www.podolskmmis.ru/2013-12-20-07-09-44/2013-12-27-06-33-09/53-kratkie-protokoly-ispytaniy-za-2015-god/250-09-13-15-5130062>

¹⁷ Косилка-измельчитель роторная КИР-1,5Е. Протокол испытаний № 14-42-2001 (4130232). ГУ «Центрально-Черноземная МИС». 2001. 4 с.

Исходные данные

Initial data

Параметр / Parameter	Значение / Value
R , мм / R , mm	285
$R \omega 10^{-3}$, м/с / $R \omega 10^{-3}$, m/s	40
d , мм / d , mm	0,5
k	1
W_c , мм / W_c , mm	246
n_ζ , n_η , n_φ	30



Р и с. 6. Графики зависимости от L массовой доли m_L частиц растений, длина которых не превышает L , после измельчения роторным кормоуборочным комбайном (а) и комбайном двойного измельчения (б): 1 – $H-h=367$ мм, $s=71$ мм; ● – экспериментальные данные измельчения люцерны; 2 – $H-h=377$ мм, $s=80$ мм; ■ – экспериментальные данные измельчения люцерны; 3 – $H-h=660$ мм, $s=76$ мм; ▲ – экспериментальные данные измельчения вики с овсом; 4 – $H-h=1001$ мм, $s=63$ мм; ▼ – экспериментальные данные измельчения эспарцета; 5 – $H-h=660$ мм, $s=76$ мм, $l_c=5$ мм; 6 – $H-h=660$ мм, $s=76$ мм, $l_c=10$ мм; 7 – $H-h=660$ мм, $s=76$ мм, $l_c=25$ мм

Fig. 6. The effect of L on mass fraction m_L of plant particles, the length of which does not exceed L , after chopping by a rotary forage harvester (a) and a double chop forage harvester (b): 1 – $(H-h)=367$ mm, $s=71$ mm; ● – experimental data for alfalfa; 2 – $(H-h)=377$ mm, $s=80$ mm; ■ – experimental data for alfalfa; 3 – $(H-h)=660$ mm, $s=76$ mm; ▲ – experimental data for alfalfa with oats; 4 – $(H-h)=1001$ mm, $s=63$ mm; ▼ – experimental data for sainfoin; 5 – $(H-h)=660$ mm, $s=76$ mm, $l_c=5$ mm; 6 – $(H-h)=660$ mm, $s=76$ mm, $l_c=10$ mm; 7 – $(H-h)=660$ mm, $s=76$ mm, $l_c=25$ mm

трав на сенаж, при котором массовая доля частиц длиной 8–18 мм находится в диапазоне 45–75 % (рис. 7, а). При подаче более 20 мм или при скорости комбайна более 1,6 м/с роторные комбайны обеспечивают массовую долю

таких частиц не более 35 %. Кормоуборочные комбайны с двойным измельчающим аппаратом позволяют обеспечить заготовку трав на сенаж только при заданной и регулируемой частоте вращения барабана (дисково-

го или цилиндрического) либо шнека, подающего растения в камеру дискового или цилиндрического аппарата.

Обсуждение и заключение

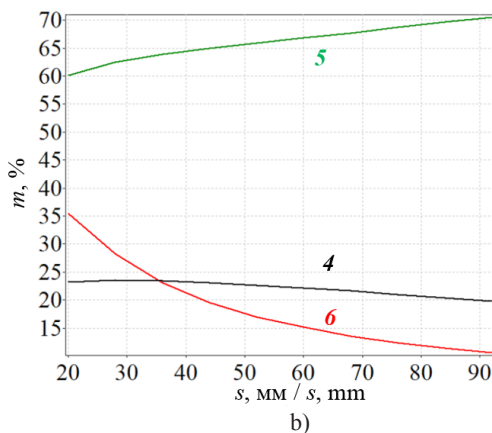
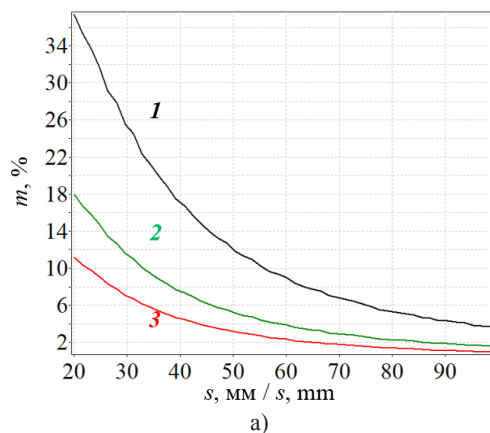
1. Кормоуборочные комбайны с роторным измельчающе-швыряющим аппаратом, осуществляющим одновременно три операции (кошение растений на корню, измельчение растений, выгрузку их в транспортное средство), отличаются простотой конструкции и не позволяют обеспечить заготовку трав на сенаж с массовой долей частиц длиной 8–19 мм в пределах 45–75 %.

2. Разработанная математическая модель измельчения растений роторным измельчающе-швыряющим аппаратом позволяет оценить массовую долю частиц измельченных растений в любом диапазоне их длины в зависимости от высоты растений, высоты среза, подачи. В рамках данной модели в пределах высоты растений 400–1 200 мм и подачи 20–100 мм функция распределения массовой доли частиц по длине представляет собой три участка, на которых линии графика функции близки к прямым. С увеличением высоты растений

возрастает массовая доля частиц, длина которых примерно равна подаче.

3. Кормоуборочные комбайны с двойным измельчающим аппаратом позволяют обеспечить заготовку трав на сенаж с массовой долей частиц длиной 8–19 мм в пределах 45–75 % только при регулировании и соответствующей настройке угловой скорости шнека и/или дискового или цилиндрического барабана.

4. Разработанная математическая модель измельчения растений двойным измельчающим аппаратом позволяет оценить массовую долю частиц измельченных растений в любом диапазоне их длины в зависимости от высоты растений, высоты среза, подачи на нож, средней расчетной длины резки. Закон распределения массовой доли частиц измельченных растений зависит от средней расчетной длины резки. В пределах диапазона длины частиц, границы которого отличаются от расчетной длины резки на 5 мм, содержится 45–75 % частиц. Массовая доля частиц длиной 8–19 мм практически не зависит от подачи и высоты растений при расчетной длине резки менее 10 мм.



Р и с. 7. Влияние подачи s на массовую долю частиц m длиной 8–19 мм при измельчении растений роторным кормоуборочным комбайном (а) и кормоуборочным комбайном двойного измельчения (б): 1 – $(H-h) = 250$ мм; 2 – $(H-h) = 600$ мм; 3 – $(H-h) = 1\,000$ мм; 4 – $(H-h) = 660$ мм, $l_c = 5$ мм; 5 – $(H-h) = 660$ мм, $l_c = 10$ мм; 6 – $(H-h) = 660$ мм, $l_c = 25$ мм

Fig. 7. The effect of s on mass fraction of plant particles m with lengths from 8 mm to 19 mm for a rotary forage harvester (a) and a double chop forage harvester (b): 1 – $(H-h) = 250$ mm; 2 – $(H-h) = 600$ mm; 3 – $(H-h) = 1\,000$ mm; 4 – $(H-h) = 660$ mm, $l_c = 5$ mm; 5 – $(H-h) = 660$ mm, $l_c = 10$ mm; 6 – $(H-h) = 660$ mm, $l_c = 25$ mm

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Crop processing and chop length of corn silage: effects on intake, digestion, and milk production by dairy cows / M. A. Bal [et al.] // Journal of Dairy Science. 2000. Vol. 83, issue 6. P. 1264–1273. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)74993-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)74993-9)
2. Effects of the chop lengths of alfalfa silage and oat silage on feed intake, milk production, feeding behavior, and rumen fermentation of dairy cows / S. K. Bhandary [et al.] // Journal of Dairy Science. 2008. Vol. 91, issue 5. P. 1942–1958. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0358>
3. Effect of grass silage chop length when fed alone, or with corn silage, on digestion and metabolism in dairy cows / U. Tayyab [et al.] // Journal of Animal Science. 2018. Vol. 96, issue 3. P. 394. DOI: <https://doi.org/10.1093/jas/sky404.864>
4. Addah W., Baah J., McAllister T. A. Effect of silage chop length on feed intake and feeding behaviour of finishing feedlot steers // Acta Agriculturae Scandinavica, Section A – Animal Science. 2016. Vol. 66, no. 2. P. 106–114. DOI: <https://doi.org/10.1080/09064702.2016.1267789>
5. Saqib G. S., Finner M. F. Simulated ideal length of cut for forage harvesters // Transactions of the ASAE. 1982. Vol. 25, issue 5. P. 1237–1238. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.33704>
6. Morgan D. D. V., Osman M. M. A mathematical model of an apparatus for the assessment of the length distribution of chopped forage // Journal of Agricultural Engineering Research. 1984. Vol. 30. P. 157–164. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-8634\(84\)80017-7](https://doi.org/10.1016/S0021-8634(84)80017-7)
7. O'Dogherty M. J. Chop length distributions from forage harvesters and a simulation model of chopping // Journal of Agricultural Engineering Research. 1984. Vol. 30. P. 165–173. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-8634\(84\)80018-9](https://doi.org/10.1016/S0021-8634(84)80018-9)
8. Szendro P. Examination of chopping process in self-propelled forage harvesters // Acta Agromica Hungarica. 1979. Vol. 28, issues 1-2. P. 106–119.
9. Yukueda M., Kawamura N. Studies of a direct-throw flail-type forage harvester (I). Journal of the Japanese society of agricultural machinery. 1976. Vol. 37, issue 4. P. 600–605. DOI: <https://doi.org/10.11377/jsam1937.37.600>
10. Howe S. D., Bishop T. Forage harvesters: designs for the 80s // Power Farming. 1982. Vol. 64, issue 4. P. 36–45.
11. Белов М. И., Чепурной А. И. Перспективные измельчающие аппараты кормоуборочных комбайнов // Тракторы и сельхозмашины. 1985. № 5. С. 39–41.
12. Белов М. И., Чепурной А. И. Анализ схем кормоуборочных машин // Тракторы и сельхозмашины. 1986. № 6. С. 26–28.
13. Ерохин М. Н., Белов М. И., Судник Ю. А. Модель и экспериментальное исследование ротационного режущего аппарата // Тракторы и сельхозмашины. 2003. № 12. С. 21–24.

Поступила 08.12.2018; принята к публикации 11.02.2019; опубликована онлайн 28.06.2019

Об авторе:

Белов Михаил Иванович, профессор, кафедра сопротивления материалов и деталей машин, Институт механики и энергетики, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49), доктор технических наук, профессор, ResearchID: T-5622-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9907-8825>, B-Mikhael@yandex.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Bal M.A., Shaver R.D., Jirovec A.G., Shinnors K.J., Coors J.G. Crop processing and chop length of corn silage: Effects on intake, digestion, and milk production by dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2000; 83(6):1264-1273. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)74993-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)74993-9)
2. Bhandary S.K., Ominsky K.M., Wittenberg K.M., Plaizier J.C. Effects of the chop lengths of alfalfa silage and oat silage on feed intake, milk production, feeding behavior, and rumen fermentation of dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2008; 91(5):1942-1958. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0358>
3. Tayyab U., Wilkinson R., Reynolds C., Sinclair L. Effect of grass silage chop length when fed alone, or with corn silage, on digestion and metabolism in dairy cows. *Journal of Animal Science*. 2018; 96(3):394. DOI: <https://doi.org/10.1093/jas/sky404.864>
4. Addah W., Baah J., McAllister T.A. Effect of silage chop length on feed intake and feeding behaviour of finishing feedlot steers. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A – Animal Science*. 2016; 66(2):106-114. DOI: <https://doi.org/10.1080/09064702.2016.1267789>
5. Saqib G.S., Finner M.F. Simulated ideal length of cut for forage harvesters. *Transactions of the ASAE*. 1982; 25(5):1237-1238. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.33704>
6. Morgan D.D.V., Osman M.M. A mathematical model of an apparatus for the assessment of the length distribution of chopped forage. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1984; 30:157-164. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-8634\(84\)80017-7](https://doi.org/10.1016/S0021-8634(84)80017-7)
7. O'Dogherty M.J. Chop length distributions from forage harvesters and a simulation model of chopping. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1984; 30:165-173. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-8634\(84\)80018-9](https://doi.org/10.1016/S0021-8634(84)80018-9)
8. Szendro P. Examination of chopping process in selfpropelled forage harvesters. *Acta Agronomy Academy Scientific Hungaria*. 1979; 28(1-2):106-119.
9. Yukueda M., Kawamura N. Studies of a direct-throw flail-type forage harvester (I). *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*. 1976; 37(4):600-605. DOI: <https://doi.org/10.11357/jsam1937.37.600>
10. Howe S.D., Bishop T. Forage harvesters: Designs for the '80s. *Power Farming*. 1982; 64(4):36-45.
11. Belov M.I., Chepurnoy A.I. [Perspective chopper units of forage harvesters]. *Traktory i selkhoz-mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 1985; 5:39-41. (In Russ.)
12. Belov M. I., Chepurnoy A. I. [Analysis of forage harvester schemes]. *Traktory i selkhoz-mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 1986; 6:26-28. (In Russ.)
13. Yerokhin M. N., Belov M. I., Sudnik Yu. A. [Model and experimental study of rotary mower]. *Traktory i selkhoz-mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2003; 12:21-24. (In Russ.)

Received 08.12.2018; revised 11.02.2019; published online 28.06.2019

About author:

Mikhail I. Belov, Professor, Chair of Strength of Materials and Machine Parts, Institute of Mechanics and Energetics, Russian Timiryazev State Agrarian University (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: T-5622-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9907-8825>, B-Mikhael@yandex.ru

The author has read and approved the final version of the paper.

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

УДК 532.64.08:54-11

DOI: 10.15507/2658-4123.029.201902.295-305



Изменение контактных углов смачивания при добавлении в моющие растворы поверхностно-активных веществ

**Н. В. Бышов¹, И. А. Успенский¹, В. В. Алексеев²,
И. В. Фадеев^{3*}**

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

²Чебоксарский кооперативный институт (филиал)
АНОО ВО «Российский университет кооперации»
(г. Чебоксары, Россия)

³ФГБОУ ВО «Чувашский государственный педагогический
университет имени И. Я. Яковлева» (г. Чебоксары, Россия)
*ivan-fadeev-2012@mail.ru

Введение. Протекание технологических процессов отмыывания загрязнений во многом определяется природой очищаемой поверхности, загрязнения и среды, в которой проводится очистка. Эффективность процесса зависит от контакта моющего средства с обмываемой поверхностью. Характеристикой смачивания служит контактный угол, являющийся мерой относительного притяжения жидкости к твердому телу и к самой себе. Физико-химическая активность моющей среды определяет затраты, а следовательно, и оптимальные параметры моечного процесса. Кроме того, она влияет на повышение коррозионной стойкости обмываемых деталей. Поэтому актуальным является определение функциональной зависимости контактного угла смачивания от концентраций различных комбинаций поверхностно-активных веществ.

Материалы и методы. Определение контактного угла смачивания основывается на статистической обработке фотографии капли раствора моющего средства на горизонтальной поверхности специально созданной программой, позволяющей получить массив данных для описания формы капли, по которой рассчитывается контактный угол смачивания. Проведены измерения значений контактного угла смачивания при изменении концентраций таких синтетических моющих средств, как Лабомид-203, МС-8, МЛ-51. Получены мультипликативные степенные функции, связывающие величину угла смачивания с концентрациями поверхностно-активных веществ.

© Бышов Н. В., Успенский И. А., Алексеев В. В., Фадеев И. В., 2019



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

Результаты исследования. Исследования показали, что увеличение средних значений концентраций монобората калия и Лабомид-203 в растворе на 1 % приводит к уменьшению среднего значения угла смачивания на 0,54 %; монобората калия и МС-8 – на 0,78 %; а монобората калия и МЛ-51 – на 0,48 %, т. е. функция показывает убывающую отдачу от увеличения средних значений концентраций монобората калия и синтетических моющих средств.

Обсуждение и заключение. Во всех рассмотренных случаях установлена убывающая отдача величины контактного угла смачивания от увеличения концентрации поверхностно-активных веществ независимо от комбинации компонентов моющего раствора, т. е. исследуемые концентрации поверхностно-активных веществ превысили то граничное значение, когда они давали возрастающую отдачу от увеличения их содержания в моющем растворе. Таким образом, можно сделать вывод, что для рассмотренных комбинаций процентное содержание поверхностно-активных веществ избыточно.

Ключевые слова: контактный угол смачивания, поверхностно-активное вещество, математическая модель, мультипликативная степенная функция

Для цитирования: Изменение контактных углов смачивания при добавлении в моющие растворы поверхностно-активных веществ / Н. В. Бышов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 2. С. 295–305. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.295-305>

Changing the Contact Wetting Angles when Adding Surface-Active Substances to Washing Solutions

N. V. Byshov¹, I. A. Uspensky¹, V. V. Alekseev², I. V. Fadeev³

¹Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev (Ryazan, Russia)

²Cheboksary Cooperative Institute (branch) of Russian University of Cooperation (Cheboksary, Russia)

³Chuvash I. Yakovlev State Pedagogical University (Cheboksary, Russia)

*ivan-fadeev-2012@mail.ru

Introduction. The technological processes of the washing contaminations are largely determined by the nature of the surface being cleaned, the contamination type and the environment, in which the cleaning is carried out. The efficiency of the process depends on the contact of the detergent with the surface being washed. The wetting characteristic is a contact angle, which is a measure of the relative attraction of a liquid to a solid and to liquid itself. The physico-chemical activity of the washing medium determines the costs and, consequently, the optimal parameters of the washing process. In addition, it affects the increase in corrosion resistance. Therefore, it is relevant to determine the functional dependence of the contact wetting angle on the concentration of various combinations of surfactants.

Materials and Methods. The determination of the contact wetting angle is based on the statistical processing of a photograph of a detergent drop on a horizontal surface by a specially created program that allows obtaining an array of data to describe the shape of a drop from which the contact wetting angle is calculated. The values of the contact wetting angle were measured when varying concentrations of such synthetic detergents as Labomid-203, MS-8, ML-51, etc. Multiplicative power functions connecting the magnitude of the contact wetting angle with surfactant concentrations were obtained.

Results. The studies has shown that an increase in the concentration of potassium monoborate with Labomid-203 by 1 % leads to a decrease in the contact wetting angle by 0.54 %; potassium monoborate with MS-8 by 0.78 %; and potassium monoborate with ML-51 by 0.48 %, the function shows a decreasing return to an increase in concentration.

Discussion and Conclusion. In all the considered cases, a decreasing return of the magnitude of the contact wetting angle to an increase in the concentration of surfactants was established, regardless of which combination of substances was used. That is, the investigated concentrations of surfactants exceeded the limit value when they gave an increasing return to the increase in their content in the washing solution. Thus, it can be concluded that for the considered combinations the percentage of surfactant is redundant.

Keywords: contact wetting angle, surface-active substance, mathematical model, multiplicative power function

For citation: Byshov N.V., Uspensky I.A., Alekseev V.V., Fadeev I.V. Changing the Contact Wetting Angles when Adding Surface-Active Substances to Washing Solutions. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(2):295-305. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.295-305>

Введение

В основе комплекса параллельно-последовательных физико-химических и физико-механических процессов, объединенных в многоэтапном технологическом процессе отмыывания загрязнений, лежат явления смачивания, адсорбции, диспергирования-эмульгирования, стабилизации и гетерокоагуляции дисперсий, пептизации, адгезии, набухания, растворения, соллобилизации и пенообразования. Наиболее важная роль в протекании процессов отводится природе очищаемой поверхности; загрязнению; среде, в которой проводится очистка; моющим средствам; способам и интенсивности механического воздействия. Начальная фаза процесса отмыывания загрязнений заключается в смачивании или вытеснении жидкой фазой другой фазы (твердого или жидкого тела). Эффективность процесса напрямую зависит от контакта моющего средства с обмываемой поверхностью. В начале смачивания частицы гидрофильных загрязнений намокают, увеличиваются в объеме и начинают разрушаться. При полном смачивании они растекаются равномерным слоем по поверхности и удаляются струей воды или механическим способом. Для смачивания и удаления гидрофобных частиц (частиц нагара, масел, смол, песка и т. п.) моющая жидкость должна содержать поверхностно-активные вещества (ПАВ). Общеизвестно, что мерой смачивания обычно служит контактный угол θ , поскольку он является мерой относи-

тельного притяжения жидкости к твердому телу и к самой себе [1]. Чем активнее моющая среда в физико-химическом плане, тем меньше затрат механической энергии требуется для удаления загрязнения, а чем среда пассивнее, тем больше нужно затрат [2]. Поэтому оптимальные параметры моечного процесса выбирают на основе технологических и экономических соображений. Одновременно необходимо отметить еще один немаловажный показатель моющего раствора: способность формировать на очищаемой поверхности защитную пленку, и как следствие, повышать коррозионную стойкость обмываемой поверхности без дополнительной консервационной обработки. Итак, поскольку смачиваемость является одним из показателей физико-химических свойств моющих растворов, важно иметь сведения о влиянии ПАВ на величину контактного угла.

Целью исследования является определение функциональной зависимости контактного угла смачивания от концентраций различных комбинаций ПАВ. Для реализации цели исследования авторами разработана методика экспрессного определения контактного угла смачивания и программное обеспечение, автоматизирующее процесс и ускоряющее обработку информации.

Обзор литературы

Процедура определения контактного угла смачивания имеет ряд особенностей [3], без учета которых точность его определения довольно низка (ошибки от 1 до 5 градусов), а учет влияния ПАВ

оказывается затрудненным из-за того, что отклонения в величине контактного угла имеют тот же порядок, что и ошибки измерения. Более того, существенный разброс значений появляется из-за явления гистерезиса контактного угла, связанного с разными значениями угла при натекании (росте капли) и оттекании (уменьшении капли) [4–8]. Размер капли также может оказать влияние на результаты измерений, поэтому необходимо использовать рекомендации по выбору их размера из определенного диапазона.

А. Мармуром [9] разработана обобщенная методика определения контактных углов смачивания: даны рекомендации по кратности проведения экспериментов, объему капли, скорости увеличения и уменьшения объема капли. Для определения угла смачивания применяется микроскоп, который использует каплю жидкости в качестве чувствительного элемента.

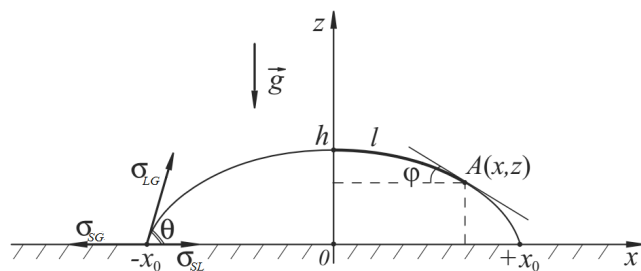
Учет возникающих сложностей при измерениях приводит к тому, что процедура измерения контактного угла может потребовать нескольких часов [Там же], однако в связи с непрекращающимися физико-химическими процессами в моющей жидкости ее свойства за это время могут изменяться, что способно повлиять на точность измерений.

Поскольку при простом измерении контактного угла возникает множе-

ство нюансов, мешающих быстрому и точному его определению, были рассмотрены методы установления геометрической формы капель и их аналитического описания [10–16]. Основой данных методов является минимизация поверхностной энергии поверхностей раздела фаз. В работе С. И. Матюхина и К. Ю. Фроленкова [17] приведен обзор основных методов расчета равновесной формы капель, расположенных на твердой горизонтальной поверхности в гравитационном поле: приближенные методы описания формы капель, вариационные методы и т. д. Численное решение уравнения Лапласа позволяет получить выражения для формы капли, которые содержат только геометрические параметры (геометрия капли определяется силами поверхностного натяжения и силой тяжести). Классический вид формы капли на горизонтальной поверхности показан на рис. 1 [Там же].

Еще Юнгом была показана связь краевого угла с соотношением между удельными поверхностными энергиями раздела разных фаз. Согласно вышеназванной работе [Там же], равновесная форма осесимметричных капель может описываться дифференциальным уравнением следующего вида:

$$\frac{z''}{(1+z'^2)^{3/2}} + \frac{z'}{x(1+z'^2)^{1/2}} = 2b + cz, \quad (1)$$



Р и с. 1. Классический вид формы капли на горизонтальной поверхности: σ_{LG} – коэффициент поверхностного натяжения жидкости; σ_{SG} – удельная поверхностная энергия раздела твердой и газообразной фазы; σ_{SL} – удельная поверхностная энергия раздела твердой и жидкой фазы

F i g. 1. The classic type of a drop shape on a horizontal surface: σ_{LG} is the coefficient of liquid surface tension; σ_{SG} is the specific surface energy of the solid and gaseous phase; σ_{SL} is the specific surface energy of the solid and liquid phase

где x и z – координаты, b и c – коэффициенты.

В качестве граничных условий уравнения (1) выступают краевой угол и объем капли. Производная $z'(x_0)$ есть тангенс угла наклона, а следовательно, и искомый контактный угол. Таким образом, появляется возможность достаточно быстро определять форму огибающей для поверхности капли $z(x)$, и уравнение (1) можно использовать в экспрессном методе определения контактного угла смачивания.

Итак, анализ литературных источников показал, что для повышения точности измерений и скорости вычислений контактного угла смачивания необходимо объединить достоинства чисто экспериментальных методов с теоретическим описанием кривой поверхности капли и использовать вычислительные мощности современных устройств и программных средств.

Материалы и методы

Определение контактного угла смачивания в данной статье основывается на статистической обработке фотографии капли моющего раствора на горизонтальной поверхности специально созданной программой. Программа позволяет получить достаточно большой массив данных для описания $z(x)$. Данные поступают от попиксельно обрабатываемой фотографии путем сравнения цветов фона, капли и поверхности. Такой подход дает возможность получать достаточно высокую точность определения граничных координат поверхностей раздела фаз, поскольку ошибка колеблется в пределах 2–3 пикселей с промежуточными переходными цветами. Далее массив данных передается системе компьютерной алгебры wxMaxima, в которой, согласно дифференциальному уравнению, подбираются числовые параметры формы капли $z(x)$ и затем вычисляется производная $z'(x_0)$. Поскольку процесс фотографирования и обработки данных не требует больших затрат времени, в целях повы-

шения статистической надежности для каждого варианта комбинаций ПАВ и их концентраций были вычислены контактные углы в двадцатикратной повторности, средние значения которых приведены в таблице.

В настоящее время для повышения моечного эффекта используются такие синтетические моющие средства (СМС), как Лабомид-203, МС-8, МЛ-51 и др. Они представляют собой смесь ПАВ с электролитами – натриевыми солями угольной, фосфорной и кремовой кислот. Моющее действие (процесс удаления загрязнения с поверхности твердых тел с переводом его в состояние раствора или устойчивой дисперсии) растворов СМС, применяемых для очистки поверхностей, определяется комплексом их свойств.

Для изучения связи между углом смачивания Y и концентрациями X_1 (МБК), X_2 (Лабомид-203), X_3 (МС-8) и X_4 (МЛ-51) воспользуемся нелинейным множественно-регрессионным анализом, который позволяет:

- построить нелинейную модель с большим числом факторов;
- определить и сравнить степени влияния различных факторов в отдельности на моделируемый показатель;
- выделить непосредственное влияние факторов на результативный признак и косвенное влияние фактора (через другие факторы) на результат;
- выявить существенность влияния отдельного фактора (или группы факторов) на результативный признак на фоне других факторов и т. д.

Наиболее подходящей в данном случае является мультипликативная степенная функция, впервые примененная в 1929 году Ч. Коббом и П. Дугласом:

$$Y = AX_1^{\alpha} X_2^{\beta} X_3^{\gamma} X_4^{\delta}, \quad (2)$$

где Y – угол смачивания, град.; X_i – концентрации ПАВ, %; $A, \alpha, \beta, \gamma, \delta$ – неизвестные параметры.

Функция (2) однородна со степенью однородности $p = \alpha + \beta + \gamma + \delta$:

Таблица
Table

Зависимость угла смачивания от концентраций СМС и МБК в моющем растворе
при температуре 85–90 °С
The dependence of the wetting angle from concentrations of SD and MBP in the washing
solution at a temperature of 85–90 °C

Концентрация МБК, % / Concentration MBP, %	Концентрация СМС, % / Concentration of SD, %											
	Лабомид-203 / Labomid-203				МС-8 / MS-8				МЛ-51 / ML-51			
	1,0		2,0		3,0		1,0		2,0		3,0	
	Смачиваемость, с / Wettability, c	Угол смачивания, град. / Wetting angle, degrees	Смачиваемость, с / Wettability, c	Угол смачивания, град. / Wetting angle, degrees	Смачиваемость, с / Wettability, c	Угол смачивания, град. / Wetting angle, degrees	Смачиваемость, с / Wettability, c	Угол смачивания, град. / Wetting angle, degrees	Смачиваемость, с / Wettability, c	Угол смачивания, град. / Wetting angle, degrees	Смачиваемость, с / Wettability, c	Угол смачивания, град. / Wetting angle, degrees
0,1	14	64 ± 2,5	17	55 ± 2,2	28	46 ± 1,8	17	55 ± 2,2	23	46 ± 1,8	30	37 ± 1,5
0,2	15	60 ± 2,4	19	52 ± 2,1	29	44 ± 1,6	18	52 ± 2,1	25	42 ± 1,6	32	33 ± 1,4
0,3	15	59 ± 2,3	21	49 ± 1,9	30	38 ± 1,6	19	50 ± 2,0	26	39 ± 1,5	34	27 ± 1,1
0,4	16	55 ± 2,2	22	47 ± 1,8	31	34 ± 1,4	21	44 ± 1,7	28	34 ± 1,4	36	24 ± 1,0
0,5	16	54 ± 2,1	24	44 ± 1,7	32	33 ± 1,4	21	40 ± 1,6	30	30 ± 1,3	38	21 ± 0,8
0,6	17	51 ± 2,0	25	42 ± 1,6	32	31 ± 1,3	22	38 ± 1,5	31	28 ± 1,1	38	20 ± 0,8

– при $p = 1$ имеется линейная однородность, т. е. постоянная эффективность при увеличении средних значений концентраций;

– при $p > 1$ имеется рост эффективности, т. е. с увеличением средних значений факторов в t раз угол смачивания меняется в $t \cdot p$ раз;

– при $p < 1$ наблюдается падение эффективности.

Параметры α , β , γ , δ показывают процентное изменение угла смачивания, вызванное изменением концентрации соответствующего ПАВ на 1 % при неизменных значениях концентраций других ПАВ. Если в общем случае они зависят от X_p , то для рассматриваемой функции (2) они постоянны.

Функция (2) может быть оценена с помощью нелинейной регрессии, реализующейся в большинстве офисных пакетов прикладных программ (MS Excel, LibreOffice Calc и др.).

Результаты исследования

Исследования влияния концентраций МБК и СМС на изменение контактного угла смачивания проводились в следующих комбинациях: МБК и Лабомид-203, МБК и МС-8, МБК и МЛ-51. Статистическая обработка дает следующие результаты.

С коэффициентом детерминации $R^2 = 0,91$ определена зависимость

$$Y = 70,23428 X_1^{-0,1681} X_2^{-0,372253}. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что увеличение среднего значения X_1 на 1 % приведет к уменьшению среднего значения угла смачивания на 0,1681 %, а увеличение среднего значения X_2 на 1 % – к уменьшению среднего значения угла смачивания на 0,37225 %, т. е. увеличение концентрации Лабомид-203 оказывается более выгодным. Однако, так как $|-0,372253 - 0,1681| = 0,54035 < 1$, получаем убывающую отдачу от увеличения концентрации ПАВ.

Аналогично с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,92$ определена зависимость

$$Y = 64,8027 X_1^{-0,28602} X_3^{-0,49342}. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что увеличение среднего значения X_1 на 1 % приведет к уменьшению среднего значения угла смачивания на 0,28602 %, а увеличение среднего значения X_3 на 1 % – к уменьшению среднего значения угла смачивания на 0,4934 %, т. е. увеличение концентрации МС-8 оказывается более выгодным. В данном случае $|-0,49342 - 0,28602| = 0,77944 < 1$, т. е. функция также показывает убывающую отдачу от увеличения концентрации ПАВ.

С коэффициентом детерминации $R^2 = 0,92$ определена зависимость

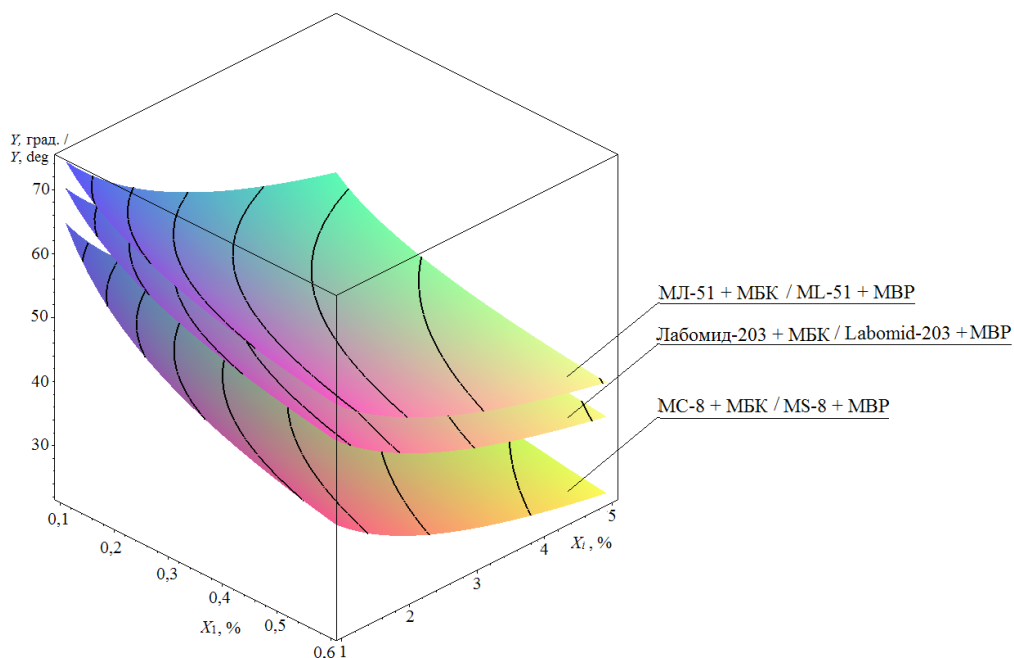
$$Y = 74,4352 X_1^{-0,14296} X_4^{-0,33504}. \quad (5)$$

Получается, что увеличение среднего значения X_1 на 1 % приведет к уменьшению среднего значения угла смачивания на 0,14296 %, а увеличение среднего значения X_4 на 1 % – к уменьшению среднего значения угла смачивания на 0,33504 %, т. е. увеличение концентрации МЛ-51 оказывается более выгодным. Поскольку $|-0,33504 - 0,14296| = 0,478 < 1$, то функция показывает убывающую отдачу от увеличения концентрации ПАВ.

На рис. 2 показаны функции изменения контактного угла смачивания для перечисленных трех случаев.

Обсуждение и заключение

Во всех рассмотренных случаях получаем убывающую отдачу величины контактного угла смачивания от увеличения концентрации ПАВ независимо от того, какую комбинацию компонентов использовали. Данный факт говорит о том, что концентрации ПАВ превысили то граничное значение, когда они давали возрастающую



Р и с. 2. Изменение контактного угла смачивания
Fig. 2. The change of contact wetting angle

отдачу от увеличения их содержания в моющем растворе. Таким образом, можно сделать вывод, что для рассмотренных комбинаций процентное содержание ПАВ избыточно. Кроме того, стало ясно, что влияние МБК наиболее эффективно в паре с МС-8, поскольку в результате дает наибольшее из всех случаев уменьшение угла смачивания (0,28602 %) и, как следствие, наибольшее

совместное влияние из всех рассмотренных комбинаций ПАВ.

Полученные результаты позволяют на стадии проектирования технологического процесса мойки для различных вариантов комбинированного использования ПАВ рассчитать и оптимизировать их процентное содержание, определяющее качество процесса мойки и его производительность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Beatty S. M., Smith J. E. Fractional wettability and contact angle dynamics in burned water repellent soils // Journal of Hydrology. 2010. Vol. 391, issues 1-2. P. 97–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.007>
2. Goebel M.-O., Woche S. K., Bachmann J. Quantitative analysis of liquid penetration kinetics and slaking of aggregates as related to solid–liquid interfacial properties // Journal of Hydrology. 2012. Vol. 442–443. P. 63–74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.03.039>
3. Comparison of different methods to measure contact angles of soil colloids / J. Shang [et al.] // Journal of Colloid and Interface Science. 2008. Vol. 328, issue 2. P. 299–307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.09.039>

4. **Marmur A.** A guide to the equilibrium contact angles maze // Contact Angle, Wettability and Adhesion. 2009. Vol. 6. P. 3–18.
5. **Drelich J.** Guidelines to measurements of reproducible contact angles using a sessile-drop technique // Surface Innovations. 2013. Vol. 1, issue 4. P. 248–254. DOI: <https://doi.org/10.1680/si.13.00010>
6. **Volpe C. D., Siboni S.** The Wilhelmy method: a critical and practical review // Surface Innovations. 2018. Vol. 6, issue 3. P. 120–132. DOI: <https://doi.org/10.1680/jsuin.17.00059>
7. Reliable measurement of the receding contact angle / J. T. Korhonen [et al.] // Langmuir. 2013. Vol. 29, issue 12. P. 3858–3863. DOI: <https://doi.org/10.1021/la400009m>
8. Experimental studies of contact angle hysteresis phenomena on polymer surfaces – Toward the understanding and control of wettability for different applications / K. Grundke [et al.] // Advances in Colloid and Interface Science. 2015. Vol. 222. P. 350–376. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.10.012>
9. Surface-wetting characterization using contact-angle measurements / T. Huhtamäki [et al.] // Nature Protocols. 2018. Vol. 13, issue 7. P. 1521–1538. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41596-018-0003-z>
10. Low-bond axisymmetric drop shape analysis for surface tension and contact angle measurements of sessile drops / A. F. Stalder [et al.] // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2010. Vol. 364, issues 1-3. P. 72–81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.04.040>
11. **Sumesh P. T., Govindarajan R.** The possible equilibrium shapes of static pendant drops // The Journal of Chemical Physics. 2010. Vol. 133, issue 14. P. 144707. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3494041>
12. Measurement of lateral adhesion forces at the interface between a liquid drop and a substrate / R. Tadmor [et al.] // Physical Review Letters. 2009. Vol. 103, issue 26. P. 266101. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.266101>
13. **Srinivasan S., McKinley G. H., Cohen R. E.** Assessing the accuracy of contact angle measurements for sessile drops on liquid-repellent surfaces // Langmuir. 2011. Vol. 27, issue 22. P. 13582–13589. DOI: <https://doi.org/10.1021/la2031208>
14. **Whyman G., Bormashenko E.** Oblate spheroid model for calculation of the shape and contact angles of heavy droplets // Journal of Colloid and Interface Science. 2009. Vol. 331, issue 1. P. 174–177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.11.040>
15. **Lubarda V. A., Talke K. A.** Analysis of the equilibrium droplet shape based on an ellipsoidal drop-let model // Langmuir. 2011. Vol. 27, issue 17. P. 10705–10713. DOI: <https://doi.org/10.1021/la202077w>
16. Drop retention force as a function of drop size / P. S. Yadav [et al.] // Langmuir. 2012. Vol. 24, issue 7. P. 3181–3184. DOI: <https://doi.org/10.1021/la702473y>
17. **Матюхин С. И., Фроленков К. Ю.** Форма капель жидкости, помещенных на твердую горизонтальную поверхность // Конденсированные среды и межфазные границы. 2013. Т. 15, № 3. С. 292–304. URL: http://www.kcmf.vsu.ru/resources/t_15_3_2013_012.pdf

Поступила 24.01.2019; принята к публикации 18.03.2019; опубликована онлайн 28.06.2019

Об авторах:

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

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

Алексеев Виктор Васильевич, профессор, кафедра информационных технологий и математики, Чебоксарский кооперативный институт (филиал) АНОО ВО «Российский университет кооперации» (428025, Россия, г. Чебоксары, пр. М. Горького, д. 24), доктор технических наук, ResearcherID: F-7784-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2780-1727>, av77@list.ru

Фадеев Иван Васильевич, заведующий, кафедра машиноведения, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный педагогический университет имени И. Я. Яковлева» (428000, Россия, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, д. 38), кандидат технических наук, доцент, ResearcherID: B-8856-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5863-1812>, ivan-fadeev-2012@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Н. В. Бышов – научное руководство, постановка задачи исследования; И. А. Успенский – коррекция математической модели и проведение вычислений; В. В. Алексеев – разработка математической модели и редактирование; И. В. Фадеев – анализ литературных данных, разработка методик и проведение экспериментальных исследований.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Beatty S.M., Smith J.E. Fractional wettability and contact angle dynamics in burned water repellent soils. *Journal of Hydrology*. 2010; 391(1-2):97-108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.007>
2. Goebel M.O., Woche S.K., Bachmann J. Quantitative analysis of liquid penetration kinetics and slaking of aggregates as related to solid-liquid interfacial properties. *Journal of Hydrology*. 2012; 442-443:63-74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.03.039>
3. Shang J., Flury M., Harsh J.B., Zollars R.L. Comparison of different methods to measure contact angles of soil colloids. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2008; 328(2):299-307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.09.039>
4. Marmur A. A guide to the equilibrium contact angles maze in contact angle. *Wettability and Adhesion*. 2009; 6:3-18.
5. Drelich J. Guidelines to Measurements of Reproducible Contact Angles Using a Sessile-Drop Technique. *Surface Innovations*. 2013; 1(4):248-254. DOI: <https://doi.org/10.1680/si.13.00010>
6. Volpe C.D., Siboni S. The Wilhelmy method: A critical and practical review. *Surface Innovations*. 2018; 6(3):120-132. DOI: <https://doi.org/10.1680/jsuin.17.00059>
7. Korhonen J.T., Huhtamäki T., Ikkala O., Ras R.H.A. Reliable measurement of the receding contact angle. *Langmuir*. 2013; 29(12):3858-3863. DOI: <https://doi.org/10.1021/la400009m>
8. Grundke K., Pöschel K., Synytska A., Frenzel R., Drechsler A., Nitschke M., et al. Experimental studies of contact angle hysteresis phenomena on polymer surfaces – Toward the understanding and control of wettability for different applications. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2015; 222:350-376. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.10.012>
9. Huhtamäki T., Tian X., Korhonen J. T., Ras R. H. A. Surface-wetting characterization using contact-angle measurements. *Nature Protocols*. 2018; 13(7):1521-1538. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41596-018-0003-z>
10. Stalder A.F., Melchior T., Müller M., Sage D., Bluc T., Unserd M. Low-bond axisymmetric drop shape analysis for surface tension and contact angle measurements of sessile drops. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2010; 364(1-3):72-81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.04.040>
11. Sumesh P. T., Govindarajan R. The possible equilibrium shapes of static pendant drops. *The Journal of Chemical Physics*. 2010; 133(14):144707. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3494041>
12. Tadmor R., Bahadur P., Leh A., N'guessan H.E., Jaini R., Dang L. Measurement of lateral adhesion forces at the interface between a liquid drop and a substrate. *Physical Review Letters*. 2009; 103(26):266101. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.266101>
13. Srinivasan S., McKinley G.H., Cohen R.E. Assessing the accuracy of contact angle measurements for sessile drops on liquid-repellent surfaces. *Langmuir*. 2011; 27(22):13582-13589. DOI: <https://doi.org/10.1021/la2031208>

14. Whyman G., Bormashenko E. Oblate spheroid model for calculation of the shape and contact angles of heavy droplets. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2009; 331(1):174-177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.11.040>
15. Lubarda V.A., Talke K.A. Analysis of the equilibrium droplet shape based on an ellipsoidal droplet model. *Langmuir*. 2011; 27(17):10705-10713. DOI: <https://doi.org/10.1021/la202077w>
16. Yadav P.S., Bahadur P., Tadmor R., Chaurasia K., Leh A. Drop retention force as a function of drop size. *Langmuir*. 2012; 24(7):3181-3184. DOI: <https://doi.org/10.1021/la702473y>
17. Matyukhin S.I., Frolenkov K.Yu. Shape of liquid drops on solid horizontal surface. *Condensed Matter and Interphases*. 2013; 15(3):292-304. DOI: http://www.kcmf.vsu.ru/resources/t_15_3_2013_012.pdf (In Russ.)

Received 24.01.2019; revised 18.03.2019; published online 28.06.2019

About authors:

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

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

Victor V. Alekseev, Professor, Chair of Information Technologies and Mathematics, Cheboksary Co-operative Institute (branch) of Russian University of Cooperation (24 Prospekt Gorkogo, Cheboksary 428025, Russia), D.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2780-1727>, ResearcherID: F-7784-2019, av77@list.ru

Ivan V. Fadeev, Head, Chair of Mechanical Engineering, Chuvash I. Yakovlev State Pedagogical University (38 K. Marksa St., Cheboksary 428000, Russia), Ph. D (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5863-1812>, ResearcherID: B-8856-2019, ivan-fadeev-2012@mail.ru

Contribution of the authors:

N. V. Byshov – scientific supervision, the formulation of the research problem; I. A. Uspensky – the correction of a mathematical model and computation; V. V. Alekseev – the development of a mathematical model and edition; I. V. Fadeev – reviewing and analyzing the literature, developing the methods and conducting experimental studies.

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



Фотолюминесцентный контроль спелости семян зерновых в процессе созревания

М. В. Беляков

Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”» в г. Смоленске (Смоленск, Россия)
bmw20100@mail.ru

Введение. Объективное определение спелости семян растений является одним из направлений развития сельскохозяйственных электротехнологий. Оптические методы и средства диагностики, исследованные в статье, являются высокоточными, селективными и экспрессными, а также могут легко интегрироваться в действующие современные сельскохозяйственные машины и аппараты.

Материалы и методы. Проведены поисковые исследования оптических спектральных люминесцентных свойств семян зерновых растений различной степени спелости. Отобраны партии семян овса и пшеницы в фазах молочной, молочно-восковой и восковой спелости, а также спелые семена. Исследование проведено на спектрофлуориметре «Флюорат-02-Панорама». Измерены спектры возбуждения при синхронном сканировании, и на их основе – спектры люминесценции. Вычислены интегральные параметры спектров.

Результаты исследования. Семена молочной спелости имеют наибольший пик возбуждения на длине волны около 362 нм и существенно меньший – на 424 нм. У спелых семян коротковолновый пик ($\lambda_{max} = 362$ нм) отсутствует; остаются пики 424 нм и 485 нм, причем длинноволновый пик повышается с увеличением срока спелости. Кроме того, с увеличением спелости семян возрастает отношение длинноволнового потока к коротковолновому. Зависимости могут быть статистически достоверно линейно аппроксимированы. Полученные зависимости можно использовать для определения степени физиологической зрелости семян. Предложена методика определения спелости семян зерновых растений при созревании, включающая пробоподготовку, возбуждение люминесценции в коротковолновом и длинноволновом диапазонах, ее регистрацию, усиление и обработку полученного фотоэлектрического сигнала. Для реализации методики разработана конструкция прибора объективного экспресс-анализа степени физиологической зрелости семян.

Обсуждение и заключение. В ходе созревания семян зерновых растений меняется соотношение их уровней возбуждения и потоков люминесценции: для незрелых семян характерна коротковолновая люминесценция, а в спелых семенах преобладает длинноволновая. Зависимости соотношения потоков фотолюминесценции от времени созревания являются возрастающими. Разработан прибор для определения уровня спелости семян, позволяющий определить, на какой стадии созревания находится семя.

Ключевые слова: семя, созревание, контроль спелости, спектр возбуждения, спектр люминесценции

Для цитирования: Беляков М. В. Фотолюминесцентный контроль спелости семян зерновых в процессе созревания // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 2. С. 306–319. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.306-319>

© Беляков М. В., 2019



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

Photoluminescence Monitoring the Ripeness of Cereal Seeds during Ripening

M. V. Belyakov

Branch of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute" in Smolensk (Smolensk, Russia)

bmw20100@mail.ru

Introduction. To assess objectively the ripeness plant seeds is one of the areas of developing agricultural electrotechnical technologies. Optical methods and diagnostic tools are highly accurate, selective, and express, and can be easily integrated into existing modern agricultural machines and devices.

Materials and Methods. The exploratory research of optical spectral luminescent properties of cereal seeds of different ripeness levels was carried out. The lots of oat and wheat seeds of the milky, milky-wax, and waxy ripeness, as well as ripe seeds were selected. The study was conducted on the spectrofluorometer "Fluorat-02-Panorama". The spectra of synchronous scan excitation were measured based on the seed luminescence spectra. The integral parameters of the spectra were calculated.

Results. The seeds of milky ripeness have the highest peak of excitation at a wavelength of about 362 nm and significantly less values at 424 nm. In ripe seeds there is no short-wave peak ($\lambda_{max} = 362$ nm). There are remain peaks of 424 nm and 485 nm, and the long-wave peak increases with increasing ripeness. With increasing seed ripeness, the ratio of longwave to the shortwave flux increases. The dependences can be statistically reliably approximated linearly. The obtained dependences can be used to determine the seed physiological ripeness degree. There have been proposed a technique for determining the ripeness of cereal seeds during their ripening, including sample preparation, excitation of luminescence in the short-wave and long-wave ranges, its registration, amplification and processing the resulting photoelectric signal. To implement the method, the design of the device for objective rapid analysis of the stage of seed physiological ripeness was developed.

Discussion and Conclusion. During the ripening of cereal seeds, the ratio of their excitation levels and luminescence fluxes changes: for immature seeds, short-wave luminescence is characteristic, while in mature seeds, long-wave luminescence prevails. The dependence of the ratio of photoluminescence fluxes on the ripeness time is an increasing one. A device for determining the seed ripeness stage is developed.

Keywords: seed, ripening, ripeness control, excitation spectrum, luminescence spectrum

For citation: Belyakov M.V. Photoluminescence Monitoring the Ripeness of Cereal Seeds during Ripening. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(2):306-319. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.306-319>

Введение

В современных условиях развитие сельского хозяйства во многом зависит от результатов научно-технического прогресса, интенсивного внедрения достижений науки и техники, постоянного совершенствования методов и технологий производства продукции. Объективное определение спелости семян растений является одним из направлений развития сельскохозяйственных электротехнологий с целью внедрения современных

методов контроля в растениеводстве. Оптические методы и средства диагностики и контроля являются высокоточными, селективными, экспрессными, а также дистанционными и неразрушающими. Другими достоинствами оптических и оптико-электронных приборов являются простота и безопасность эксплуатации, минимум субъективных факторов и возможность интеграции в действующие современные сельскохозяйственные машины и аппараты.

Оптические спектральные и цветовые характеристики используют для сортировки семян, плодов, корнеплодов и другой продукции¹ [1]. Также оптическое излучение применяют в сельскохозяйственном производстве для уничтожения вредителей и обеззараживания зерна. Излучение в ближней инфракрасной области используют для контроля влажности, оценки содержания белков, жира, крахмала, клетчатки, сахаров в размолах, жидкостях или пастах².

Совокупность методов анализа, основанных на явлении люминесценции, называется люминесцентным анализом. Наибольшее распространение получил вид анализа, основанный на фотолюминесценции исследуемого вещества, возбуждаемой ультрафиолетовым излучением. Подобный анализ может быть как качественным, так и количественным. Первый проводится по спектрам люминесценции и используется для обнаружения следов люминесцирующих органических и неорганических веществ в различных объектах; второй основан на зависимости интенсивности люминесценции от количества люминесцирующего вещества. Исследование фотолюминесценции может дать информацию о состоянии живых и неживых систем без их повреждения и отбора большого объема пробы.

Обзор литературы

Оптические характеристики биотканей несут информацию о количественном содержании и пространственном распределении различных биологических компонентов в ней, что дает потенциальные возможности диагностики [2–6]. К настоящему времени созданы методики и установки оптической диагностики биологических объектов медицинского назначения [7–12].

Флуоресцентные спектрометры для диагностики *in vivo* [13] обычно используют волоконно-оптические системы [14–17].

Микроскопические наблюдения, произведенные над созревающими семенами, показали, что по мере их созревания происходит постепенное превращение крахмала в жир («ожирение» крахмальных зерен). Вопрос о накоплении веществ в созревающем зерне имеет важное практическое значение в связи с необходимостью определения оптимальных сроков уборки урожая и снижения потерь зерна при уборке³.

К данному времени известно несколько методов определения спелости семян.

1. Определение спелости семян по внешним признакам и консистенции. Метод является субъективным и наименее точным, хотя и широко распространен в сельскохозяйственной практике. Чаще всего применяется при плохой погоде в период созревания, но при его использовании требуются серьезный опыт и навык.

2. Определение спелости семян по массе сырых зерен. Метод предполагает мониторинг массы 1 000 сырых семян.

3. Определение спелости зерна по удельной массе. Метод предполагает расчет процентного содержания зерен молочной и восковой спелости при погружении средней пробы в солевой раствор⁴.

Также существуют методы с использованием различных технических устройств, например, инфракрасного термометра [18]. Недостатком данного метода является невозможность получить информацию о температуре с определенной поверхности, т. к. инфракрас-

¹ Башилов А. М. Электронно-оптическое зрение в аграрном производстве (системотехника построения и применения информационных оптических технологий). М. : Изд-во ГНУ ВИАЭСХ, 2005. 312 с.

² Лакович Дж. Основы флуоресцентной спектроскопии / Пер. с англ. М. : Мир, 1986. 496 с.

³ Казаков Е. Д., Кретович В. Л. Биохимия зерна и продуктов его переработки. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Агропромиздат, 1989. 368 с.

⁴ Уборка урожая. URL: <http://racechro.ru/biologizaciya-zemledeliya/4770-uborka-urozhaya.html>

ный термометр предназначен для измерения температуры в конкретной точке; кроме того, существенным оказывается влияние посторонних помех.

Предложен прибор тепловизионного контроля семян до и после обработки электромагнитным полем высокой частоты; вслед за обработкой проводят сравнение температуры каждого семени до и после воздействия [19]. Недостатками данного способа являются трудоемкость и продолжительность воздействия электромагнитного поля.

Таким образом, используемые в данное время методы определения спелости семян имеют недостатки, связанные с их субъективностью или длительностью, либо являющиеся разрушающими. Альтернатива имеющимся методам – оптический люминесцентный метод, широко применяемый в настоящий момент в биомедицинских технологиях.

В сельскохозяйственных электро-технологиях созданы фотолюминесцентные методы и приборы контроля влажности [20; 21] и всхожести [22; 23].

Материалы и методы

Разработка методики предусматривает поисковые исследования оптических спектральных люминесцентных свойств семян зерновых растений различной степени спелости. Ранее автором было установлено сходство оптических люминесцентных свойств спелых семян большинства зерновых (пшеница, рожь, тритикале, гречиха, овес), зернобобовых (горох, фасоль) и овощных (перец, томат) растений [24]. Данные свойства можно считать типовыми и использовать при проектировании методики и приборов контроля спелости.

Для получения опытных образцов были посеяны и выращены семена овса «скаун» и пшеницы МИС. По мере их созревания отбирались партии семян различной степени спелости: для овса – молочной, молочно-восковой и восковой степени, а также спелые семена (4 срок); для пшеницы – мо-

лочной, молочно-восковой и восковой степени, а также 4-го и 5-го сроков спелости. Пробы отбиралась в следующие сроки: молочная (1-й срок) – 95 суток с момента посева, молочно-восковая (2-й срок) – 103 суток, восковая (3-й срок) – 109 суток, 4-й срок – 120 суток, 5-й срок – 126 суток.

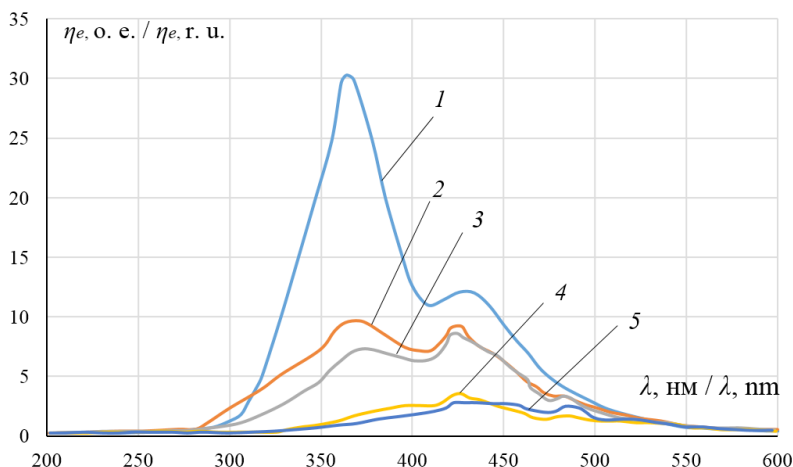
Исследование люминесценции проводилось на основе аппаратно-программного комплекса, состоящего из многофункционального спектрофлуориметра «Флюорат-02-Панорама», компьютера с установленным программным обеспечением «Panorama Pro» и внешней камеры для исследуемых образцов. Измерение спектров возбуждения и фотолюминесценции выполнялось аналогично ранее проведенным измерениям [25; 26].

Были измерены спектры возбуждения $\eta_e(\lambda)$ при синхронном сканировании, и на их основе – спектры люминесценции $\phi_l(\lambda)$. По результатам измерений осуществлялась статистическая обработка, где проводилось усреднение по 30 спектрам. В программе «Panorama Pro» были вычислены интегральные параметры спектров H и Φ . Последний является потоком фотолюминесценции, выраженным в относительных единицах.

Результаты исследования

Результаты измерения спектров возбуждения семян пшеницы различной спелости при синхронном сканировании представлены на рис. 1.

Видно, что семена молочной спелости имеют наибольший пик возбуждения на длине волны около 362 нм и существенно меньший – на 424 нм. Семена молочно-восковой спелости имеют пики на тех же длинах волн, но уже приблизительно равные по энергетической эффективности возбуждения. У семян восковой спелости наиболее выражен пик возбуждения на длине волны 424 нм, пик на 362 нм заметно ниже; кроме того, появляется небольшой пик на длине волны 485 нм. У спелых семян (4-й и 5-й срок) коротковол-



Р и с. 1. Спектральные характеристики возбуждения семян пшеницы при синхронном сканировании: 1 – молочная спелость, 2 – молочно-восковая спелость, 3 – восковая спелость, 4 – 4-й срок спелости, 5 – 5-й срок спелости

Fig. 1. The spectral characteristics of wheat seeds during excitations a synchronous scan: 1 – milk ripeness, 2 – milky-wax ripeness, 3 – waxy ripeness, 4 – 4 period of ripeness, 5 – 5 period of ripeness

новый пик ($\lambda_{max} = 362$ нм) отсутствует; остаются пики 424 нм и 485 нм, причем длинноволновый пик увеличивается с возрастанием срока спелости⁵ [27].

Для коротковолнового ($\lambda_{max} = 362$ нм), средневолнового ($\lambda_{max} = 424$ нм) и длинноволнового ($\lambda_{max} = 485$ нм) пиков рассчитаны интегральные значения H в рабочих диапазонах возбуждения: 250–410 нм, 410–470 нм и 470–550 нм соответственно. Результаты представлены в табл. 1, причем интегральные значения средневолнового возбуждения приняты за единицу, и относительно них пересчитаны значения параметров для коротковолновых и длинноволновых диапазонов (в знаменателе).

Из данных табл. 1 следует, что возможно определение физиологической зрелости по соотношению фотолуминесценции, возбуждаемой длинноволновым и коротковолновым излучением.

Далее были измерены спектры фотолуминесценции семян различной спелости при возбуждении на длинах волн $\lambda_s = 362$ нм и $\lambda_l = 485$ нм. Усредненные

по 30 измерениям результаты для семян молочной спелости и полностью спелых семян представлены на рис. 2; 3.

В программе «Panorama Pro» были рассчитаны потоки фотолуминесценции Φ_l и Φ_s . Результаты представлены в табл. 2; 3 и на рис. 4; 5.

Как следует из таблиц и графиков, с увеличением спелости семян отношение длинноволнового потока к коротковолновому увеличивается. Зависимости могут быть статистически достоверно линейно аппроксимированы при коэффициенте детерминации R^2 , равном 0,90 для пшеницы и 0,93 – для овса. Данные зависимости можно использовать для определения степени физиологической зрелости семян. Так, семена пшеницы можно считать спелыми при соотношении Φ_l / Φ_s , превышающем 1,0, а семена овса – 1,3.

На основе полученных результатов предложена методика определения спелости семян зерновых растений при созревании, структурная схема которой представлена на рис. 6.

⁵ Изменения спектральных свойств фотолуминесценции семян пшеницы в процессе созревания / М. В. Беляков [и др.] // Энергетика, информатика, инновации-2016 : сб. тр. VI Междунар. науч.-техн. конф. : в 3 т. Т. 2. Смоленск : Универсум, 2016. С. 23–26.

Таблица 1

Table 1

Интегральные параметры спектров семян пшеницы для различных диапазонов**The integral parameters of the wheat seeds spectra for different ranges**

Срок / Duration	H , о. е. / H , г. у.		
	250–410	410–470	470–550
1	2 054,00	600	198,00
	3,49	1	0,34
2	896,00	413	165,00
	1,79	1	0,33
3	628,00	398	140,00
	1,57	1	0,35
4	135,00	151	83,65
	0,91	1	0,56
5	83,00	144	114,00
	0,57	1	0,79

Таблица 2

Table 2

Результаты расчета потоков фотолюминесценции семян пшеницы**The results of the fluxes calculation photoluminescence of wheat seeds**

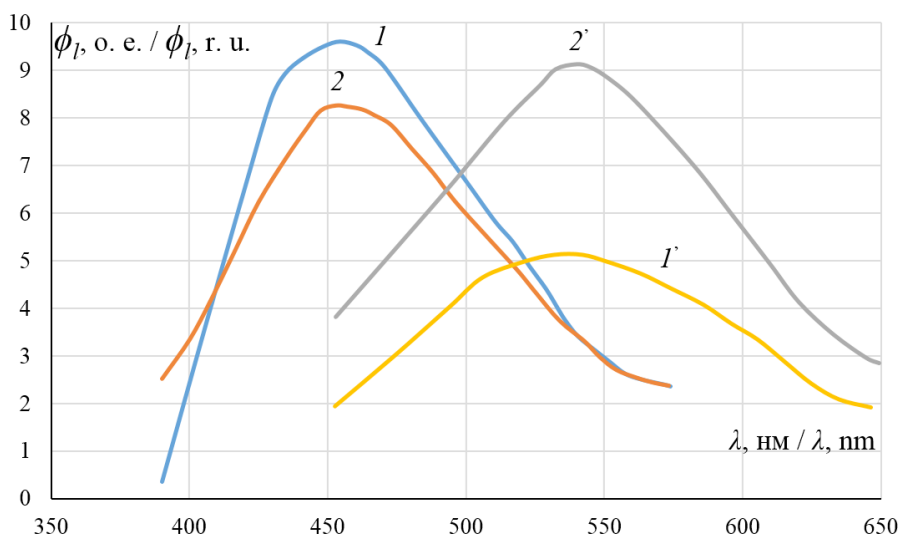
Срок / Duration	t , сут / t , day	Φ_s , о. е. / Φ_s , г. у.	Φ_p , о. е. / Φ_p , г. у.	Φ_s/Φ_p , о. е. / Φ_s/Φ_p , г. у.
1	95	1 116	658	0,59
2	103	1 278	921	0,72
3	109	1 491	1 297	0,87
4	120	1 125	996	0,89
5	126	1 023	1 114	1,09

Таблица 3

Table 3

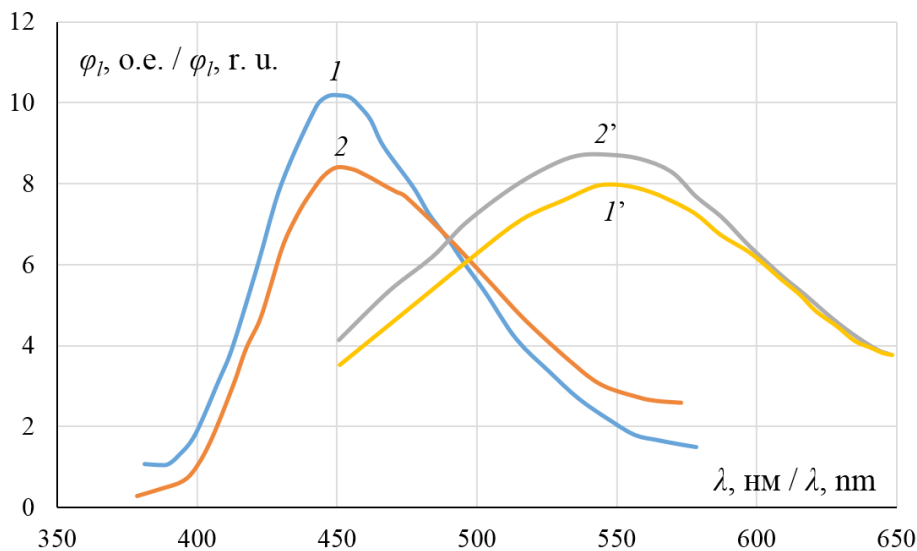
Результаты расчета потоков фотолюминесценции семян овса**The results of the fluxes photoluminescence seed oats calculation**

Срок / Duration	t , сут / t , day	Φ_s , о. е. / Φ_s , г. у.	Φ_p , о. е. / Φ_p , г. у.	Φ_s/Φ_p , о. е. / Φ_s/Φ_p , г. у.
1	95	993	991	1,00
2	103	983	1 101	1,12
3	109	913	1 132	1,24
4	120	913	1 184	1,30



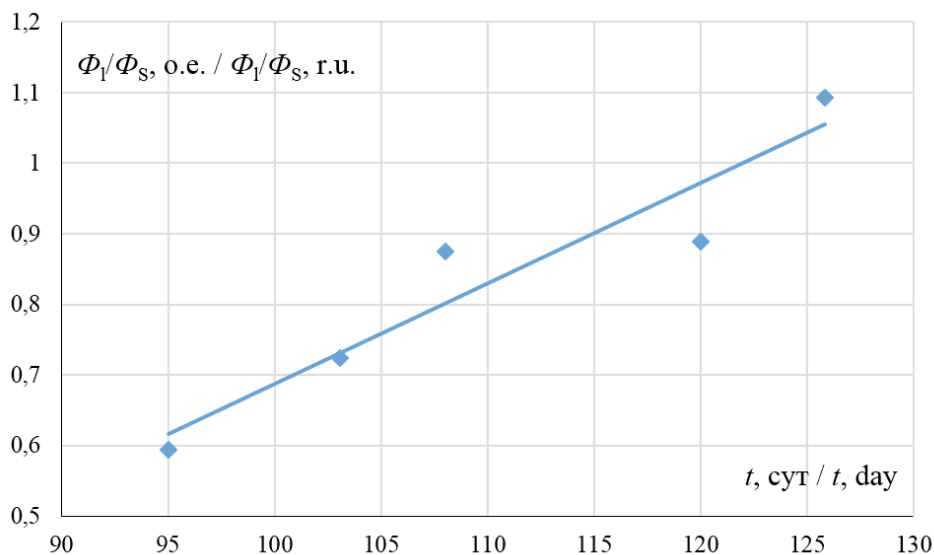
Р и с. 2. Спектры люминесценции семян пшеницы молочной спелости (I ; I') и полностью спелых (2 ; $2'$) коротковолнового и длинноволнового диапазонов

F i g. 2. The luminescence spectra of milky ripeness (I and I') and fully ripe (2 and $2'$) wheat seeds short-wave and long-wave ranges



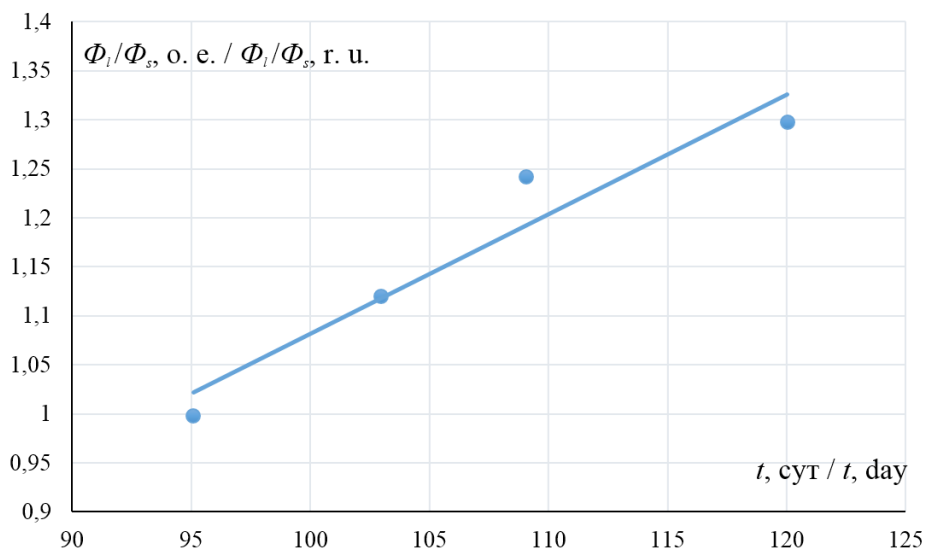
Р и с. 3. Спектры люминесценции семян овса молочной спелости (I ; I') и полностью спелых (2 ; $2'$) коротковолнового и длинноволнового диапазонов

F i g. 3. The luminescence spectra of milky ripeness (I and I') and fully mature (2 and $2'$) oat seeds short-wave and long-wave ranges



Р и с. 4. График зависимости отношения длинноволнового потока фотолюминесценции семян пшеницы к коротковолновому от времени созревания

F i g. 4. The graph of ratio the long-wave flux wheat seeds photoluminescence to the short-wave ratio dependence of the ripening time



Р и с. 5. График зависимости отношения длинноволнового потока фотолюминесценции семян овса к коротковолновому от времени созревания

F i g. 5. The graph of ratio of the long-wave flux oat seeds photoluminescence to the short-wave dependence one on the ripening time

Предлагаемая методика включает в себя следующие этапы:

1. Для исследования с нескольких растений отбираются несколько семян. Возможен неразрушающий контроль семян полного колоса, в том числе без участия человека, с применением беспилотных летательных аппаратов. Исследуемая проба помещается в темную светонепроницаемую камеру.

2. Семена облучаются двумя источниками излучения (например, светодиодами), спектры излучения которых имеют максимумы на длинах волн $\lambda_s = 362$ нм и $\lambda_l = 485$ нм (или максимально близкие к ним) для возбуждения фотoluminesценции.

3. Люминесценция регистрируется двумя фотоприемниками (например, фотодиодами) с диапазонами чувствительности 380–580 и 450–650 нм.

4. Электрический фотосигнал с фотоприемников усиливается усилителем и поступает на микроконтроллер.

5. В микроконтроллере сигнал преобразуется в цифровую форму, после чего происходит расчет отношения потока длинноволновой фотoluminesценции Φ_l к потоку коротковолновой фотoluminesценции Φ_s .

6. Полученный результат поступает на выходное индикаторное устройство.

С учетом полученных данных определяется, на какой стадии созревания находятся семена, и принимается решение о возможных дальнейших действиях.

На рис. 7 представлена функциональная схема методики определения спелости семян.

Для реализации методики разработана конструкция и выбраны основные узлы прибора объективного экспресс-анализа степени физиологической зрелости семян (рис. 8).

В качестве источников излучения выбраны два светодиода: для коротковолнового излучения – VLMU3510⁶, для длинноволнового – XPEBBL-L1-R250-00 Z01⁷. В качестве приемников излучения наиболее подходящими по активности являются фотодиоды S9219-01⁸ и BPW21R⁹.

Произведен выбор компонентов электронного блока: операционный усилитель марки K140УД17, микросхема делителя напряжения K525ПС3, микроконтроллер ATMEGA8 на ЖКИ WH1602A [28]. Для разделения приема коротковолнового и длинноволнового фотосигналов используется временная задержка включения источников и приемников, осуществляемая через микроконтроллер.



Р и с. 6. Структурная схема методики определения спелости семян зерновых растений

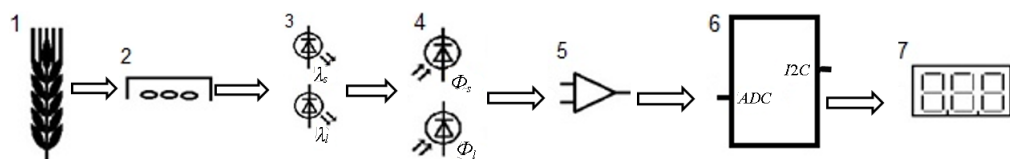
F i g. 6. The block diagram of the method for determining the ripeness grain plants seeds

⁶ Vishay – manufacturer of discrete semiconductors and passive components. URL: <https://www.vishay.com/docs/84363/vlm3510-365-130.pdf>

⁷ Farnell Россия. Электронные компоненты, электронные детали. URL: <http://ru.farnell.com/cree/x-pebbl-l1-r250-00z01/led-smd-xlamp-xpe-e-blue-485nm/dp/2335110>

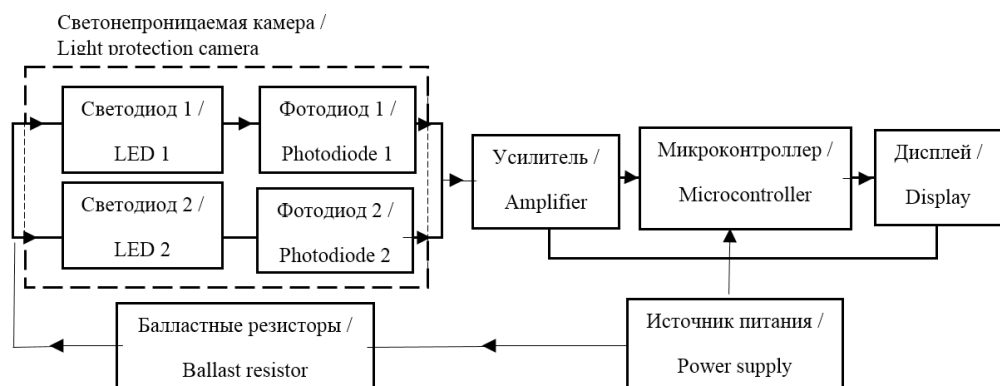
⁸ Home. Hamamatsu Photonics. URL: <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/alpha/S/4103/S9219-01/index.html>

⁹ Vishay – manufacturer of discrete semiconductors and passive components. URL: <https://www.vishay.com/docs/81519/bpw21r.pdf>



Р и с. 7. Функциональная схема методики определения спелости семян: 1 – исследуемый материал (семена или колосья); 2 – светонепроницаемая камера с исследуемыми образцами; 3 – источники возбуждающего излучения; 4 – приемники фотолюминесцентного излучения; 5 – усилитель сигнала; 6 – микроконтроллер; 7 – выходной индикатор

F i g. 7. The functional diagram of the method for determining the seed ripeness: 1 – the test material (seeds or ears); 2 – opaque chamber with the samples; 3 – exciting radiation sources; 4 – photoluminescent radiation receivers; 5 – amplifier; 6 – microcontroller; 7 – output indicator



Р и с. 8. Структурная схема прибора для определения спелости семян

F i g. 8. The block diagram of the device for determining the seed ripeness

Обсуждение и заключение

Оптические фотолюминесцентные методы оценки качества семян растений являются бесконтактными, быстродействующими, селективными и зачастую неразрушающими. Для семян исследованных зерновых растений характерно возбуждение фотолюминесценции в диапазонах с максимумами на длинах волн 362 нм, 424 нм и 485 нм. В ходе созревания семян зерновых растений (на примере пшеницы и овса) меняется соотношение их уровней возбуждения и потоков люминесценции: для незрелых семян характерна коротковолновая люминесценция, а в спелых семенах преобладает

длинноволновая. Зависимости соотношения потоков фотолюминесценции длинноволнового и коротковолнового диапазонов от времени созревания являются возрастающими и могут быть статистически достоверно аппроксимированы линейными функциями. На основе полученных результатов разработан прибор для определения уровня физиологической зрелости семян, позволяющий за счет облучения семян двумя источниками с определенными длинами волн и регистрации потока фотолюминесценции соответствующими приемниками определить, на какой стадии созревания находится семя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Методы измерений спектральных характеристик и распознавания элементов зерновых смесей в системах сепарации реального времени / Э. К. Алгазинов [и др.] // Измерительная техника. 2014. № 1. С. 36–41.
2. **Jacques S. L.** The role of skin optics in diagnostic and therapeutic uses of lasers // Lasers in Dermatology / Eds. R. Steiner [et al.]. Berlin : Springer–Verlag, 1991. P. 1–21. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-75201-8_1
3. Review of optical breast imaging and spectroscopy / D. Grosenick [et al.] // Journal of Biomedical Optics. 2016. Vol. 21, no 9. P. 091311. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JBO.21.9.091311>
4. Colorectal tumors and hepatic metastases differ in their optical properties–relevance for dosimetry in laser-induced interstitial thermotherapy / C. Holmer [et al.] // Lasers in Surgery and Medicine. 2006. Vol. 38, issue 4. P. 296–304. DOI: <https://doi.org/10.1002/lsm.20300>
5. Brown adipose tissue density measured by near-infrared time-resolved spectroscopy in Japanese, across a wide age range / S. Fuse [et al.] // Journal of Biomedical Optics. 2018. Vol. 23, no. 6. P. 065002. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JBO.23.6.065002>
6. Spatially resolved, diffuse reflectance imaging for subsurface pattern visualization toward development of a lensless imaging platform: phantom experiments / I. Schelkanova [et al.] // Journal of Biomedical Optics. 2016. Vol. 21, no 1. P. 015004. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JBO.21.1.015004>
7. Method and apparatus for measuring non-nutritive suck pattern stability : pat. 2009/0222214 A1 US : G 06 F 19/00, G 01 N 33/00 / Barlow S., Wang J., inventors ; University of Kansas, assignee. № 12/390,142 ; filed 21.02.09 ; publ. 03.09.09. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/ed/bc/1a/6fe5d2f6335935/US20090222214A1.pdf>
8. Diagnostic method for disorders using copeptin : pat. 2009/0221009 A1 US : G 01 N 33/53, G 01 N 33/00 / Bergmann M., Struck J., inventors ; Brahms AG, assignee. № 11/573,595 ; filed 19.08.05 ; publ. 03.09.09. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/af/10/2a/9b8322c927b4ec/US20090221009A1.pdf>
9. Identification of cancer biomarkers and phosphorylated proteins : pat. 2009/0226913 A1 US : C 12 Q 1/68, C 12 Q 1/00, G 01 N 33/574, G 01 N 33/00 / Pope R. M. [et al.], inventors ; Life Technologies Corporation, assignee. № 12/340,341 ; filed 19.12.08 ; publ. 10.09.09. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/c0/c9/ba/2a844549c238c8/US20090226913A1.pdf>
10. Method for improving optical response marking of analytical chemistry sensor arrangement : pat. 2009-180735 AJP : G 01 N 21/64, G 01 N 21/78, G 01 N 33/58, G 01 N 33/50. № 2009-62380 ; filed 16.03.2009 ; publ. 13.08.09. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/68/92/91/887124384d618a/JP2009180735A.pdf>
11. Nanowire-based system for analysis of nucleic acids : pat. 2009/226927 A1 US : C 12 Q 1/68, G 01 N 33/00, C 40 B 30/10, C 12 M 1/00 / Sun H., Fung S., Woo S. L., inventors. № 12/468,831 ; filed 19.05.09 ; publ. 10.09.09. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/cb/11/22/d9ed4b34c0d1d1/US20090226927A1.pdf>
12. Universal sample preparation system and use in an integrated analysis system : pat. 2009/108260 A2 WO : C 12 P 19/34, B 01 D 17/06, B 01 D 57/02, B 01 L 3/00, G 01 N 33/00, C 12 M 1/00, G 01 N 1/18 / Vangbo M. [et al.], inventors ; Microchip Technologies, Inc., applicant. № PCT/US2009/000419 ; filed 21.01.09 ; publ. 03.09.09. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/9b/67/df/51cbcd000addf3/WO2009108260A2.pdf>
13. **Mouroulis P., Green R. O.** Review of high fidelity imaging spectrometer design for remote sensing // Optical Engineering. 2018. Vol. 57, no. 4. P. 040901. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.4.040901>
14. Development and in vivo test of a miniature Raman probe for early cancer detection in the peripheral lung / H. C. McGregor [et al.] // Journal of Biophotonics. 2018. Vol. 11, issue 11. P. 201800055. DOI: <https://doi.org/10.1002/jbio.201800055>
15. **Liu Q., Vo-Dinh T.** Spectral filtering modulation method for estimation of hemoglobin concentration and oxygenation based on a single fluorescence emission spectrum in tissue phantoms // Medical Physics. 2009. Vol. 36, issue 10. P. 4819–4829. DOI: <https://doi.org/10.1118/1.3218763>

16. Decomposition of complex fluorescence spectra containing components with close emission maxima positions and similar quantum yields. Application to fluorescence spectra of proteins / A. Savić [et al.] // *Journal of Fluorescence*. 2013. Vol. 23, issue 3. P. 605–610. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10895-013-1183-0>
17. Early detection and differentiation of venous and arterial occlusion in skin flaps using visible diffuse reflectance spectroscopy and autofluorescence spectroscopy / C. Zhu [et al.] // *Biomedical Optics Express*. 2016. Vol. 7, issue 2. P. 570–580. URL: <https://doi.org/10.1364/BOE.7.000570>
18. Инфракрасный термометр : пат. 74282 Рос. Федерация : МПК А 61 В 5/00 (2006.01) / Ткаченко Ю. А. ; патентообладатель Закрытое акционерное общество «СЕМ Технолоджи». № 2008104491/22 ; заявл. 05.02.2008 ; опубл. 27.06.2008, Бюл. № 18. URL: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=74282&TypeFile=html
19. Способ определения биологически ценных семян кукурузы : пат. 2506734 Рос. Федерация : МПК А01 С 1/00 (2006.01) / Кузьминов В. И., Гребенник В. И. ; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ставропольский государственный аграрный университет». № 2012141184/13 ; заявл. 26.09.2012 ; опубл. 20.02.2014, Бюл. № 5. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/250/2506734.html>
20. **Беляков М. В.** Оптические спектральные свойства семян растений различной влажности // *Вестник НГИЭИ*. 2016. № 4 (59). С. 38–50. URL: http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1397
21. **Беляков М. В., Куликова М. Г.** Зависимости влажности семян растений от потока люминесценции // *Естественные и технические науки*. 2016. № 11. С. 162–163.
22. **Беляков М. В., Выборнова Е. И.** Разработка люминесцентного анализатора всхожести семян агрокультур // *Вестник НГИЭИ*. 2017. № 1 (68). С. 39–52. URL: http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1468
23. **Беляков М. В., Булатикова В. О., Тарасенков К. А.** Методика объективного контроля спелости семян растений при созревании // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2018. № 3 (28). С. 14–19. URL: <http://journal.viesh.ru/wp-content/uploads/2019/02/%D0%98%D0%9D%D0%9D%D0%9E%D0%92%D0%A1%D0%A5-28.pdf>
24. **Беляков М. В.** Типовые спектральные характеристики люминесценции семян растений // *Естественные и технические науки*. 2015. № 11 (89). С. 521–525.
25. **Беляков М. В.** Исследование люминесцентных свойств семян пшеницы и овса различной всхожести // *Вестник ВИЭСХ*. 2016. № 1 (22). С. 30–33. URL: <http://vestnik.viesh.ru/wp-content/uploads/2016/08/2016-01-22.pdf>
26. **Беляков М. В.** Определение всхожести семян растений люминесцентным методом // *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. 2017. № 3 (52). С. 35–40. URL: https://izhgsha.ru/images/rio/Raznoe/Vestniki/2017_3.pdf
27. **Беляков М. В.** Изменение люминесцентных характеристик семян пшеницы в процессе созревания // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2017. № 6. С. 38–41. URL: <http://www.journal-kgsha.ru/data/documents/2017-06.pdf>
28. **Беляков М. В.** Оптический люминесцентный анализатор всхожести семян растений // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2017. № 2 (23). С. 73–82. URL: <http://journal.viesh.ru/wp-content/uploads/2018/04/Insel23.pdf>

Поступила 29.11.2018; принята к публикации 13.02.2019; опубликована онлайн 28.06.2019

Об авторе:

Беляков Михаил Владимирович, заведующий, кафедра оптико-электронных систем, филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”» в г. Смоленске (214013, Россия, г. Смоленск, Энергетический пр., д. 1), кандидат технических наук, доцент, ResearcherID: W-2746-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>, bmw20100@mail.ru

Благодарности: автор выражает признательность рецензентам за внимательное прочтение рукописи.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Technologies and means of maintenance in agriculture

REFERENCES

1. Algazinov E.K., Dryuchenko M.A., Minakov D.A., Sirota A.A., Shul'gin V.A. Methods of measuring the spectral characteristics and identifying the components of grain mixtures in real-time separation systems. *Izmeritel'naya tekhnika* = Measurement Techniques. 2014; 1:36-41. (In Russ.)
2. Jacques S.L. The role of skin optics in diagnostic and therapeutic uses of lasers. In: Steiner R., Kaufmann R., Landthaler M., Braun-Falco O. (eds) *Lasers in Dermatology*. Berlin: Springer-Verlag; 1991. p. 1-21. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-75201-8_1
3. Grosenick D., Rinneberg H., Cubeddu R., Taroni P. Review of optical breast imaging and spectroscopy. *Journal of Biomedical Optics*. 2016; 21(9): 091311. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JBO.21.9.091311>
4. Holmer C., Lehmann K.S., Risk J., Roggan A., Germer C.-T., Reissfelder C., et al. Colorectal tumors and hepatic metastases differ in their optical properties – relevance for dosimetry in laser-induced interstitial thermotherapy. *Lasers in Surgery and Medicine*. 2006; 38(4):296-304. DOI: <https://doi.org/10.1002/lsm.20300>
5. Fuse S., Nirengi S., Amagasa S., Homma T., Kime R., Endo T., et al. Brown adipose tissue density measured by near-infrared time-resolved spectroscopy in Japanese, across a wide age range. *Journal of Biomedical Optics*. 2018; 23(6):065002. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JBO.23.6.065002>
6. Schelkanova I., Pandya A., Saiko G., Nacy L., Babar H., Shah D.F., et al. Spatially resolved, diffuse reflectance imaging for subsurface pattern visualization toward development of a lensless imaging platform: Phantom experiments. *Journal of Biomedical Optics*. 2016; 21(1):015004. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JBO.21.1.015004>
7. Barlow S., Wang J., inventors. University of Kansas, assignee. Method and apparatus for measuring non-nutritive suck pattern stability. US Patent 2009/022214 A1. 2009 Sep 03. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/ed/bc/1a/6fe5d2f6335935/US2009022214A1.pdf>
8. Bergmann A., Struck J., inventors. Brahms AG, assignee. Diagnostic method for disorders using copeptin. US Patent 2009/0221009 A1. 2009 Sep 03. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/af/10/2a/9b8322c927b4ec/US20090221009A1.pdf>
9. Pope R., Liang X., inventors. Life Technologies Corporation, assignee. Identification of cancer biomarkers and phosphorylated proteins. US Patent 2009/0226913 A1. 2009 Sep 10. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/c0/c9/ba/2a844549c238c8/US20090226913A1.pdf>
10. Method for improving optical response marking of analytical chemistry sensor arrangement. JP Patent 2009-180735 A. 2009 Aug 13. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/68/92/91/887124384d618a/JP2009180735A.pdf>
11. Sun H., Fung S., Woo S.L., inventors. Nanowire-based system for analysis of nucleic acids. US Patent 2009/0226927 A1. 2009 Sep 10. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/cb/11/22/d9ed4b34c0d1d1/US20090226927A1.pdf>
12. Vangbo M., Nielsen W.D., Blaga L.I., Stern S., Horn J., Van Nguyen M., et al., inventors. Microchip Technologies, Inc., applicant. Universal sample preparation system and use in an integrated analysis system. WO Patent 2009/108260 A2. 2009 Sep 3. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/9b/67/df/51cbcd000addf3/WO2009108260A2.pdf>
13. Mouroulis P., Green R.O. Review of high fidelity imaging spectrometer design for remote sensing. *Optical Engineering*. 2018; 57(4):040901. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.4.040901>
14. McGregor H.C., Short M.A., Lam S., Shaipanich T., Beaudoin E.-L., Zeng H. Development and in vivo test of a miniature Raman probe for early cancer detection in the peripheral lung. *Journal of Biophotonics*. 2018; 11(11):201800055. DOI: <https://doi.org/10.1002/jbio.201800055>
15. Liu Q., Vo-Dinh T. Spectral filtering modulation method for estimation of hemoglobin concentration and oxygenation based on a single fluorescence emission spectrum in tissue phantoms. *Medical Physics*. 2009; 36(10):4819-4829. DOI: <https://doi.org/10.1118/1.3218763>
16. Savić A., Kardos R., Nyitrai M., Radotić K. Decomposition of complex fluorescence spectra containing components with close emission maxima positions and similar quantum yields. Application to fluo-

rescence spectra of proteins. *Journal of Fluorescence*. 2013; 23(3):605-610. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10895-013-1183-0>

17. Zhu C., Chen S., Hoe-Kong Chui C., Tan B.-K., Liu Early Q. Early detection and differentiation of venous and arterial occlusion in skin flaps using visible diffuse reflectance spectroscopy and autofluorescence spectroscopy. *Biomedical Optics Express*. 2016; 7(2):570-580. DOI: <https://doi.org/10.1364/BOE.7.000570>

18. Tkachenko Yu.A., inventor. Closed Joint Stock Company CEM Technology, assignee. Infrared Thermometer. RU Patent 74282. 2008 Feb 05. Available at: http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=74282&TypeFile=html (In Russ.)

19. Kuzminov V.I., Grebennik V.I., inventors. FSBEI HPE Stavropol State Agrarian University, assignee. Method for determination of biologically valuable corn seeds. RU Patent 2506734. 2012 Sep 26. Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/250/2506734.html> (In Russ.)

20. Belyakov M.V. Optical spectral qualities of plant seeds with different moisture. *Vestnik NGIEI = Bulletin NGII*. 2016; 4:38-50. Available at: http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1397 (In Russ.)

21. Belyakov M.V., Kulikova M.G. Dependence of humidity of seeds of plants on a stream of luminescence. *Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki = Natural and Technical Sciences*. 2016; 11:162-163 (In Russ.)

22. Belyakov M.V., Vybornova E.I. Fluorescent analyser development of crop species seed germination. *Vestnik NGIEI = Bulletin NGII*. 2017; 1:39-52. Available at: http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1468 (In Russ.)

23. Belyakov M.V., Bulatikova O.V., Tarasenkova K.A. Methodology of objective control of membership of seasons of ras-changes at ripe. *Innovatsii v selskom khozyaystve = Innovations in Agriculture*. 2018; 3:14-19. Available at: <http://journal.viesh.ru/wp-content/uploads/2019/02/%D0%98%D0%9D%D0%9D%D0%9E%D0%92%D0%A1%D0%A5-28.pdf> (In Russ.)

24. Belyakov M.V. Typical plant seeds spectral characteristics. *Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki = Natural and Technical Sciences*. 2015; 11:521-525 (In Russ.)

25. Belyakov M.V. The study of fluorescent properties of seeds of wheat and oat of different germination. *Vestnik VIESKH = VIESH Institute' Herald*. 2016; 1:30-33. Available at: <http://vestnik.viesh.ru/wp-content/uploads/2016/08/2016-01-22.pdf> (In Russ.)

26. Belyakov M.V. Determination of germination of plant seeds by luminescent method. *Vestnik Izhevskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii = The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2017; 3:35-40. Available at: https://izhgsha.ru/images/rio/Raznoe/Vestniki/2017_3.pdf (In Russ.)

27. Belyakov M.V. Change in luminescent characteristics of wheat seeds during maturation. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii = Vestnik of Kursk State Agricultural Academy*. 2017; 6:38-41. Available at: <http://www.journal-kgsha.ru/data/documents/2017-06.pdf> (In Russ.)

28. Belyakov M.V. Optical luminescent analyzer of germination of plant seeds. *Innovatsii v selskom khozyaystve = Innovations in Agriculture*. 2017; 2:73-82. Available at: <http://journal.viesh.ru/wp-content/uploads/2018/04/Insel23.pdf> (In Russ.)

Received 29.11.2018; revised 13.02.2019; published online 28.06.2019

About author:

Mikhail V. Belyakov, Head, Chair of Optoelectronic Systems, Branch of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute" in Smolensk (1 Energeticheskiy Proyezd, Smolensk 214013, Russia), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, ResearcherID: W-2746-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>, bmw20100@mail.ru

Acknowledgements: The author expresses gratitude to the reviewers for the careful reading of the manuscript.

The author has read and approved the final version of the paper.

Информация для авторов и читателей

Научный журнал «Инженерные технологии и системы» публикует оригинальные научные исследования, способствующие развитию науки в области инженерных систем и технологий.

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

- 01.04.01 Приборы и методы экспериментальной физики
- 01.04.05 Оптика
- 01.04.13 Электрофизика, электрофизические установки
- 05.20.01 Технологии и средства механизации сельского хозяйства
- 05.20.02 Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве
- 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве

Не допускается направление в редакцию уже опубликованных статей или статей, отправленных на публикацию в другие журналы. **В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий опубликованная статья будет ретрагирована (отозвана из печати).** Мониторинг несанкционированного цитирования осуществляется с помощью систем «Антиплагиат» и CrossCheck.

Журнал приветствует статьи, имеющие потенциально высокий импакт-фактор и/или содержащие материал о значительных достижениях в указанных направлениях. Особое внимание следует уделить качеству перевода. Желательно, чтобы он был выполнен носителем английского языка.

При подготовке статьи к публикации в журнале «Инженерные технологии и системы» необходимо учесть следующие пункты.

1. Указать **УДК**.

2. **Заголовок статьи** должен кратко и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного исследования. *Приводится на русском и английском языках.*

3. **Аннотация** (200–250 слов) выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В ней должны быть четко обозначены следующие составные части:

- 1) Введение (Introduction);
- 2) Материалы и методы (Materials and Methods);
- 3) Результаты исследования (Results);
- 4) Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion).

Приводится на русском и английском языках.

4. **Ключевые слова** (5–10) являются поисковым образом научной статьи. В связи с этим они должны отражать основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования. *Приводятся на русском и английском языках.*

5. **Благодарности.** В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам. *Приводятся на русском и английском языках.*

6. **Основной текст** статьи излагается на русском или английском языках.

1) Введение – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

2) Обзор литературы. Необходимо описать основные (последние по времени) исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы; выделить нерешенные вопросы в пределах общей проблемы, которым посвящена статья.

3) Материалы и методы. В данном разделе описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, использованная аппаратура; даются подробные сведения об объекте исследования; указывается последовательность выполнения исследования и обосновывается выбор используемых методов (наблюдение, опрос, тестирование, эксперимент, лабораторный опыт и т. д.).

4) Результаты исследования. Это основной раздел, цель которого – при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно эти данные.

5) Обсуждение и заключение. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области.

7. **Список использованных источников** (оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008). Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 30–40 источников. Из них за последние 3 года – не менее 20, иностранных – не менее 15. Следует указать DOI или адрес доступа в сети Интернет. *Оформляется на русском и английском языках.*

8. **Об авторах.** Ф.И.О., организация(и), адрес организации(й) (требуется указать все места работы автора, в которых выполнялись исследования (постоянное место, место выполнения проекта и др.)), должность и ученое звание, ORCID, ResearcherID, 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 system and technologies.

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Technologies and Means of Agricultural Mechanization

Electrotechnologies and Electrical Equipment in Agriculture

Technologies and Means of Maintenance in Agriculture

It is not allowed to submit papers that have already been published or sent for publication to other journals. **In case of multiple submission of a manuscript, the published article will be retracted.** Monitoring of unauthorized citation is implemented by means of AntiPlagiat and CrossCheck systems.

The Journal gives preference to the articles with potentially high impact factor and/or containing materials about significant achievements in the specified areas of science. Special attention should be paid to the quality of the translation. Preferably it should be made by a native English speaker.

To submit an article in the journal Engineering Technologies and Systems you should know:

1. It is necessary to indicate the **Universal Decimal Classification (UDC)** code.

2. **The title of the article** should accurately reflect the content of the article, the subject matter and the results of the research conducted.

The title should be written in Russian and English.

3. **The abstract** (200–250 words) serves as an enhanced title of the article and briefly presents its content. The abstract consists of the following components:

1) Introduction;

2) Materials and Methods;

3) Results;

4) Discussion and Conclusion.

The abstract should be written in Russian and English.

4. Keywords (5–10) make the search profile of the scientific article. In this regard, they should reflect the main provisions, achievements, results and terminology of the scientific research.

Keywords should be written in Russian and English.

5. **Acknowledgements.** In this section the author may mention the people who helped them to prepare the article or the organizations that provided financial support. It is considered good style to express gratitude to anonymous reviewers.

Acknowledgements should be written in Russian and English.

6. **The main body** of the article should be written in Russian or in English.

1) Introduction. It contains formulation of the scientific problem, its relevance, connection with the most important tasks to be solved, the importance for the development of a particular area of science or practical activities.

2) Literature Review. It is necessary to describe the main (recent) pieces of research and publications relied upon by the author, modern views on the problem, difficulties in solving the problem as well as to highlight the unresolved issues within the general problem of the article.

3) Materials and Methods. This section describes the process of designing the experiment, the methods and equipment used; it gives detailed information about the subject and sequence of the research, justifies the choice of the methods used (observation, survey, testing, experiment, etc.).

4) Results. This is the main section, the purpose of which is to prove the working hypothesis (hypotheses) by analyzing, generalizing and explaining the data. The results should be brief, but they should provide sufficient information to evaluate the conclusions drawn. It should also be justified why the particular data were chosen for the analysis.

5) Discussion and Conclusion. In conclusion, the results of understanding the topic should be summarized; conclusions, generalizations and recommendations arising from the work should be made, their practical significance should be emphasized and the main directions for further research in the studied area should be determined.

7. **References** should be given in accordance with the requirements of the *GOST R 7.0.5–2008* standard. The original sources from scientific journals included in the global citation indices should be cited first of all. It is desirable to refer to 30–40 sources. Of these, at least 20 sources should be those published over the past 3 years and at least 15 foreign ones. DOI or the URL of the source should be indicated.

References should be written in Russian and English.

8. Information **about author(s)** includes: the author's first name and last name, the name of the institution and its address (it is required to specify all the institutions where the author works and where the research was conducted (permanent place of work, the place where the project was done, etc.). The author's position and academic title, ORCID, ResearcherID, 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 – *С. А. Сечнев*
Перевод *С. В. Голованова, Н. Н. Плеханковой*
Компьютерная верстка *Е. П. Гординой*
Информационная поддержка *Р. В. Карасева*

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Подписано в печать 03.06.2019 г. Дата выхода в свет 28.06.2019 г.

Формат $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 14,63.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 250 экз. Заказ № 1165. Свободная цена.

Адрес типографии: 430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Советская, д. 24
(Издательство федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва»)



Editor *S. A. Sechnev*
Translation *S. V. Golovanov, N. N. Plekhankova*
Desktop publishing *E. P. Gordina*
Informational support *R. V. Karasev*

Distributed in Russian Federation and foreign countries.

Signed to print 03.06.2019. Date of publishing 28.06.2019.

Sheet size $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Conventional printed sheets 14,63.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 250 copies. Order no. 1165. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia
(Publishing House of National Research Mordovia State University)

