

DOI: 10.15507/0236-2910.028.201804 ISSN 0236-2910 (Print), 2313-0636 (Online)

Том 28, № 4. 2018

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



Vol. 28, no. 4. 2018

SCIENTIFIC JOURNAL
Founded in January 1990
Issued quarterly

16+

**ВЕСТНИК
МОРДОВСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

MORDOVIA UNIVERSITY BULLETIN

DOI: 10.15507/0236-2910

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

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

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

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

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

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

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и CrossRef

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

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

Адрес учредителя, издателя и редакции:
430005, Россия, Республика Мордовия,
г. Саранск, ул. Большевистская, 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», 2018

Научный журнал «Вестник Мордовского университета»

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

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

01.04.00 Физика

05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление

05.20.00 Процессы и машины агроинженерных систем

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

Журнал индексируется и архивируется в базах данных:

Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

EBSCO

ResearchBib

SHERPA/RoMEO

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

Комитета по этике научных публикаций,

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и Cross Ref

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





“Mordovia University Bulletin” journal

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

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

01.04.00 Physics

05.13.00 Computer Science, Computer Engineering and Management

05.20.00 Processes and Machines of Agricultural Engineering Systems

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 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” (list of VAK).

The journal is indexed and archived by databases:

Russian Index of Scientific Citations

EBSCO

ResearchBib

SHERPA/RoMEO

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

Cross Ref and ASEP

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





РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- Вдовин Сергей Михайлович** – *главный редактор*, ректор, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат экономических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-7363-1389, rector@mrsu.ru (Саранск, Россия)
- Сенин Петр Васильевич** – *заместитель главного редактора*, проректор по научной работе ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-3400-7780, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru (Саранск, Россия)
- Маргулис Виктор Александрович** – *главный научный редактор*, заведующий кафедрой теоретической физики, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор физико-математических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-6281-9714, margulisva@mrsu.ru (Саранск, Россия)
- Гордина Светлана Викторовна** – *ответственный секретарь*, кандидат педагогических наук, ORCID: 0000-0003-2265-418X, vestnik_mrsu@mail.ru (Саранск, Россия)
- Аллахвердиев Сурхай Рагим оглы** – академик Российской Академии Естествознания, профессор кафедры лесной индустрии, Баргынский государственный университет, профессор кафедры экологии и природопользования, ФГБОУ ВО «Московский педагогический государственный университет», доктор биологических наук, профессор (Баргын, Турция)
- Булгаков Алексей Григорьевич** – профессор Института строительного дела, Дрезденский технический университет, доктор технических наук, профессор (Дрезден, Германия)
- Дианов Евгений Михайлович** – академик Российской академии наук, директор ФГБУН «Научный центр волоконной оптики Российской академии наук», доктор физико-математических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-5017-2287 (Москва, Россия)
- Димитров Валерий Петрович** – декан факультета приборостроения и технического регулирования, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-1439-1674 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Ерофеев Владимир Трофимович** – академик Российской академии архитектуры и строительных наук, декан архитектурно-строительного факультета, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор технических наук, профессор (Саранск, Россия)
- Железникова Ольга Евгеньевна** – директор Института электроники и светотехники, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат технических наук, доцент (Саранск, Россия)
- Игумнов Леонид Александрович** – директор Научно-исследовательского института механики, заведующий кафедрой теоретической, компьютерной и экспериментальной механики, ФГАОУ ВО «Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского», доктор физико-математических наук, профессор (Нижний Новгород, Россия)
- Кечемайкин Владимир Николаевич** – директор Рузаевского института машиностроения, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат экономических наук (Саранск, Россия)
- Котин Александр Владимирович** – заведующий кафедрой механики переработки сельскохозяйственной продукции, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-0078-1866 (Саранск, Россия)
- Кусмарцев Федор Васильевич** – декан физического факультета, Университет Лафборо, кандидат физико-математических наук (Лафборо, Великобритания)
- Микаева Светлана Анатольевна** – профессор кафедры ПР-4 «Электротехника и электроника», ФГБОУ ВО «Московский технологический университет», доктор технических наук, профессор (Москва, Россия)
- Нишев Константин Николаевич** – директор Института физики и химии, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-7905-3700 (Саранск, Россия)
- Прытков Юрий Николаевич** – директор Аграрного института, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Саранск, Россия)
- Рябочкина Полина Анатольевна** – главный научный сотрудник лаборатории оптической спектроскопии лазерных материалов, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор физико-математических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-8503-8486 (Саранск, Россия)
- Салем Абдель-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 of National Research Mordovia State University, Ph.D. (Economics), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-7363-1389, rector@mrsu.ru (Saransk, Russia)
- Petr V. Senin** – *Deputy Editor in Chief*, Vice Rector for Science and Research, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-3400-7780, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru (Saransk, Russia)
- Viktor A. Margulis** – *Science Editor in Chief*, Head of Theoretical Physics Chair, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, ORCID: 0000-0001-6281-9714, margulisva@mrsu.ru (Saransk, Russia)
- Svetlana V. Gordina** – *Executive Editor*, Ph.D. (Pedagogy), ORCID: 0000-0003-2265-418X, vestnik_mrsu@mail.ru (Saransk, Russia)
- Surhay Allahverdi** – Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Head of Forest Industry Chair, Bartın University, Professor of Ecology and Nature Management Chair, Moscow Pedagogical State University, D.Sc. (Biology), Professor (Bartın, Turkey)
- Aleksey G. Bulgakov** – Professor of Faculty of Architecture, Dresden University of Technology, D.Sc. (Engineering), Professor (Dresden, Germany)
- Ivan I. Chuchayev** – Dean of Mathematics and Information Technology Faculty, National Research Mordovia State University, Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor (Saransk, Russia)
- Yevgeniy M. Dianov** – Academician of the Russian Academy of Sciences, Director of Fiber Optics Research Center, Russian Academy of Sciences, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, ORCID: 0000-0002-5017-2287 (Moscow, Russia)
- Valeriy V. Dimitrov** – Dean of Device Manufacturing and Technical Regulation Faculty, Don State Technical University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-1439-1674 (Russia, Rostov-on-Don)
- Leonid A. Igumnov** – Director of Research Institute of Mechanics, Head of Numerical Simulation of Theoretical, Computer and Experimental Mechanics Chair, Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor (Nizhniy Novgorod, Russia)
- Vladimir N. Kechemaykin** – Director of Ruzayevka Campus, National Research Mordovia State University, Ph.D. (Economy) (Saransk, Russia)
- Aleksandr V. Kotin** – Director of Institute of Mechanics and Energy, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-0078-1866 (Saransk, Russia)
- Fedor V. Kusmartsev** – Dean of Institute of Physics, Loughborough University, Ph.D. (Phys.-Math.) (Loughborough, Great Britain)
- Svetlana A. Mikayeva** – Professor of Electrotechnics and Electronics Chair, Moscow Engineering University, D.Sc. (Engineering), Professor (Moscow, Russia)
- Konstantin N. Nishchev** – Director of Institute of Physics and Chemistry, National Research Mordovia State University, Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-7905-3700 (Saransk, Russia)
- Yuriy N. Prytkov** – Director of Institute of Agriculture, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Agriculture), Professor (Saransk, Russia)
- Polina A. Ryabochkina** – Professor of Chair of General Physics, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Phys.-Math.), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-8503-8486 (Saransk, Russia)
- Abdel-Badeeh M. Salem** – Head of Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Research Labs, Professor of Faculty of Computer and Information Sciences, Ain Shams University, D.Sc. (Computer Science), Emeritus Professor (Cairo, Egypt)
- Tamara I. Shishelova** – Professor of Physics Chair, Irkutsk National Research Technical University, D.Sc. (Engineering), Scopus ID: 6507978465 (Irkutsk, Russia)
- Vladimir A. Skryabin** – Professor of Machine Engineering Technology Chair, Penza State University, D.Sc. (Engineering), ORCID: 0000-0001-7156-9198 (Penza, Russia)
- Anatoliy A. Yamashkin** – Head of Land Utilization and Landscape Design Chair, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Geography), Professor (Saransk, Russia)
- Vladimir T. Yerofeyev** – Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Dean of Architectural And Civil Engineering Faculty, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Engineering), Professor (Saransk, Russia)
- Olga Ye. Zheleznikova** – Director of Institute of Electronics and Light Engineering, National Research Mordovia State University, Ph.D. (Engineering), Associate Professor (Saransk, Russia)



СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Муравей Л. А., Петров В. М., Романенков А. М.** О задаче гашения поперечных колебаний продольно движущейся струны.....472
- Кузнецов Е. Б., Леонов С. С., Цапко Е. Д.** Параметризация задачи Коши для нелинейных дифференциальных уравнений с контрастными структурами.....486

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

- Цырков А. В., Кузнецов П. М., Цырков Г. А., Ермохин Е. А., Москвин В. К.** Проектно-операционное управление в машиностроительном производстве.....511
- Рыблов М. В., Уханов Д. А., Уханов А. П.** Разработка автоматической системы распределенного обогащения воздушного заряда тракторного дизеля.....523

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

- Ионов П. А., Сенин П. В., Столяров А. В.** Моделирование напряженно-деформированного состояния в ресурсолимитирующем соединении объемного гидропривода.....537
- Скрябин В. А.** Установка для обработки деталей со сложным профилем рабочей поверхности.....552
- Кузнецов В. В.** Ресурс подвижных уплотнительных соединений с кольцами круглого сечения.....562

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

- Симдянкин А. А., Давыдкин А. М., Слюсарев М. Н., Земсков А. М.** Оценка влияния ультразвуковой обработки моторного масла на износ пар трения при длительных износных испытаниях.....583
- Анисимов А. В., Рудик Ф. Я., Загородских Б. П.** Совершенствование технологии подготовки зерна к помолу на малых предприятиях.....603
- Смирнов И. Г., Хорт Д. О., Филиппов Р. А., Кутырёв А. И., Аргюшин А. А.** Автоматизированный агрегат для магнитно-импульсной обработки растений в садоводстве.....624
- Информация для авторов и читателей (на рус. яз.)*.....643
- Информация для авторов и читателей (на англ. яз.)*.....645



CONTENTS

PHYSICS AND MATHEMATICS

- Muravey L. A., Petrov V. M., Romanenkov A. M.** The Problem of Damping the Transverse Oscillations on a Longitudinally Moving String.....472
- Kuznetsov E. B., Leonov S. S., Tsapko E. D.** The Parametrization of the Cauchy Problem for Nonlinear Differential Equations with Contrast Structures.....486

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

- Tsyrvkov A. V., Kuznetsov P. M., Tsyrvkov G. A., Yermokhin Ye. A., Moskvina V. K.** Project and Operations Management of Machine-Building Production.....511
- Ryblov M. V., Ukhanov D. A., Ukhanov A. P.** Developing the Automatic System for the Multi-Point Fumigation of Air Charge in the Diesel Engine.....523

TECHNOLOGIES AND MEANS OF AGRICULTURAL MECHANIZATION

- Ionov P. A., Senin P. V., Stolyarov A. V.** Modeling of Stress-Strain State in Connection Resource Defines of Volumetric Hydraulic Drive.....537
- Skryabin V. A.** The Installation for Processing of Parts with a Complex Profile of Working Surface.....552
- Kuznetsov V. V.** The Resource of Movable Sealing Joints with the O-Ring Seal.....562

TECHNOLOGIES AND MEANS OF MAINTENANCE IN AGRICULTURE

- Simdiankin A. A., Davydkin A. M., Slyusarev M. N., Zemskov A. M.** Evaluation of the Influence of Motor Oil Ultrasonic Processing on the Wear of Friction Pairs during Long-Term Wearing Tests.....583
- Anisimov A. V., Rudik F. Ya., Zagorodskih B. P.** Technological Improvements of Grain Preparation for Milling in Small Enterprises.....603
- Smirnov I. G., Khort D. O., Filippov R. A., Kutyrev A. I., Artiushin A. A.** Automated Unit for Magnetic-Pulse Processing of Plants in Horticulture.....624
- Information for Authors and Readers of the Journal (in Russian)*.....643
- Information for Authors and Readers of the Journal (in English)*.....645

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ / PHYSICS AND MATHEMATICS

УДК 534.112

DOI: 10.15507/0236-2910.028.201804.472-485



О задаче гашения поперечных колебаний продольно движущейся струны

Л. А. Муравей*, В. М. Петров, А. М. Романенков
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»
(г. Москва, Россия)

*muravey@mail.ru

Введение. Рассматриваемая задача гашения поперечных колебаний продольно движущейся струны актуальна для производственных процессов, связанных с продольным движением материалов (например, бумажного полотна). Для данных процессов крайне нежелательными являются поперечные возмущения, которые в вертикальном сечении описываются гиперболическим уравнением продольно движущейся струны. Вследствие этого возникает задача гашения колебаний за конечное время.

Материалы и методы. Для решения задачи гашения колебаний в статье производится ее сведение к тригонометрической проблеме моментов на произвольном временном отрезке. При рассмотрении движущихся материалов построение базисных систем, образующих проблему моментов, является отдельной задачей, поскольку гиперболическое уравнение содержит смешанную производную (кориолисово ускорение). По этой причине в данном случае неприменим классический метод разделения переменных. Вместо него был использован новый метод нахождения автомодельных решений нестационарных уравнений, что позволяет найти базисные системы в явном виде.

Результаты исследования. В случае с бумажным полотном находится минимальный во всем классе допустимых возмущений временной отрезок, на котором образующая проблему моментов тригонометрическая система является базисом Рисса. Это позволяет с использованием сопряженной ей системы найти соответствующее минимальному времени гашения колебаний оптимальное управление (в виде ряда) и построить так называемый оптимальный демпфер.

Обсуждение и заключение. В результате исследования было построено обобщенное решение задачи гашения поперечных колебаний. Получено точное время гашения, а именно такое время T_0 , при котором полная энергия системы равна нулю. Найдено оптимальное управление в виде ряда Фурье.

Ключевые слова: гашение колебаний, гиперболическое уравнение, кориолисово ускорение, тригонометрическая проблема моментов, базис Рисса

Для цитирования: Муравей Л. А., Петров В. М., Романенков А. М. О задаче гашения поперечных колебаний продольно движущейся струны // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 4. С. 472–485. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.472-485>

Благодарности: Исследование проведено в рамках гранта РФФИ № 16-01-00425 А.

© Муравей Л. А., Петров В. М., Романенков А. М., 2018



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



The Problem of Damping the Transverse Oscillations on a Longitudinally Moving String

L. A. Muravey*, V. M. Petrov, A. M. Romanenkov

Moscow Aviation Institute (National Research University)
(Moscow, Russia)

*muravey@mail.ru

Introduction. The problem under consideration is relevant to production processes associated with the longitudinal movement of materials, for example, for producing paper webs. For these processes transverse disturbances, which in the vertical section are described by the hyperbolic equation of a longitudinally moving string, are extremely undesirable. That gives the problem of damping these oscillations within a finite time.

Materials and Methods. To solve the problem of damping the oscillations, the authors suggest reducing it to the trigonometric problem of the moments at an arbitrary time interval. When considering moving materials, the construction of the basis systems forming the moment problem is a special challenge, since the hyperbolic equation contains a mixed derivative (Coriolis acceleration). Therefore, the classical method of separating variables is not applicable in this case. Instead, a new method is used to find self-similar solutions of non-stationary equations, which makes it possible to find the basis systems explicitly.

Results. In the case of paper web, it is necessary to find a minimal in the whole class of admissible perturbations time interval, within which the trigonometric system forming the problem of moments is the Riesz basis, that make it possible through using the system conjugate with it to find the optimal control way in the form of a series and, therefore, to build a so-called optimal damper.

Conclusions. As a result of the study, a generalized solution of the problem of transverse oscillations is constructed. For the problem of damping oscillations, the exact damping time is obtained, namely, a time T_0 at which the total energy of the system is zero. Optimum control is found in the form of a Fourier series.

Keywords: damping oscillations, hyperbolic equation, Coriolis acceleration, trigonometric moment problem, Riesz base

For citation: Muravey L. A., Petrov V. M., Romanenkov A. M. The Problem of Damping the Transverse Oscillations on a Longitudinally Moving String. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(4):472–485. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.472-485>

Acknowledgements: The work was supported by grant no. 16-01-00425 A from the Russian Foundation for Basic Research.

Введение

Особенностью задач гашения колебаний гиперболических систем является то, что в них оптимальный режим зависит не только от времени, но и от пространственных переменных. Поэтому для нахождения минимального времени гашения колебаний и соответствующего ему оптимального уравнения используется метод сведения этой задачи к т. н. тригонометрической проблеме моментов. Наиболее значимой работой в этом направлении является статья Дж. Лагнаса [1], где,

в частности, исследована возможность гашения колебаний закрепленной струны:

$$\frac{1}{a^2} w_{tt} - w_{xx} + q(x)w = g(x, t),$$

$$v \leq x \leq l, t > 0, \quad (1)$$

$$w|_{t=0} = h_0(x), w_t|_{t=0} = h_1(x),$$

$$0 \leq x \leq l, \quad (2)$$

$$w|_{x=0} = w|_{x=l} = 0, t > 0, \quad (3)$$

где начальные данные $h_0(x)$ и $h_1(x)$ – начальные возмущения, $g(x, t)$ – функция управления; при этом предполагается, что потенциал $q(x)$ – непрерывная неотрицательная функция на отрезке $[0, l]$. Решение смешанной задачи рассмотрено как обобщенное [2], для которого определен интеграл энергии:

$$E(t) = \int_0^l [w_t^2(x, t) + a^2(w_x^2(x, t) + q(x)w^2(x, t))] dx, \quad (4)$$

который при $g(x, t) \equiv 0$ не зависит от t и равен значению $E(0)$. Задача управления системой (1)–(3) заключается в возможности ее перевода из начального состояния (2) в произвольное:

$$w|_{t=T} = \tilde{h}_0(x), \quad w_t|_{t=T} = \tilde{h}_1(x), \quad x \in [0, l], \quad (5)$$

где $h_0, \tilde{h}_0 \in \dot{W}_2^1(0, l)$, $h_1, \tilde{h}_1 \in L_2(0, l)$ и $T > 0$ за счет выбора управляющей функции $\tilde{g}(x, t) \in L_2$. Вслед за Ж. Лионсом [3] ученые называют такую ситуацию строгой управляемостью.

Задача гашения колебаний заключается в нахождении минимального значения $T_0 > 0$, при котором для любых начальных возмущений $h_0 \in \dot{W}_2^1(0, l)$, $h_1 \in L_2(0, l)$ найдется управляющая функция $g_0(x, t) \in L_2(0 \leq x \leq l, 0 \leq t \leq T_0)$ (определяющая оптимальный режим) такая, что

$$E(T_0) = 0, \quad (6)$$

или, говоря другими словами, при $g(x, t) = g_0(x, t)$ решение задачи (1)–(3) при $T = T_0$ принимает вид:

$$w|_{t=T_0} = 0, \quad w_t|_{t=0} = 0. \quad (7)$$

Из закона сохранения энергии (4) следует, что решение граничной задачи при (1), (3) и $g(x, t) = 0$ представляет собой т. н. «стоячие волны», которые можно найти методом разделения переменных, или методом Фурье. Они представляются в виде:

$$z_n(x, t) = (A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t) v_n(x), \quad (8)$$

где $v_n(x)$ (решения соответствующей спектральной задачи)

$$\begin{aligned} -v''(x) + q(x)v(x) &= \lambda v(x), \quad 0 < x < l, \\ v(0) &= v(l) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

образуют ортонормированный базис в $L_2(0, l)$ и являются собственными функциями задачи (9), отвечающими собственным значениям λ_n , $n = 1, 2, \dots$. При этом $0 < \lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_n < \dots$ образуют монотонно возрастающую последовательность, и для них справедливо асимптотическое разложение:

$$\omega_n = a\sqrt{\lambda_n} = \frac{a\pi n}{l} + c_n + O\left(\frac{1}{n}\right), \quad n \rightarrow \infty. \quad (10)$$

Выполнение условий (7) для построенной методом разделения переменных смешанной задачи (1)–(3) приводит к системе интегральных уравнений Фредгольма первого рода:

$$\begin{aligned} \int_0^T u_n(t) \cos \omega_n t dt &= -\beta_n, \\ \int_0^T u_n(t) \sin \omega_n t dt &= \alpha_n \omega_n, \end{aligned} \quad n = 1, 2, \dots, \quad (11)$$

которую принято называть тригонометрической проблемой моментов. Здесь $\alpha_n, \beta_n, u_n(t)$ – коэффициенты разложения функций $h_0(x), h_1(x)$ и $g(x, t)$ по ортонормированному базису $\{v_n(x)\}$.

Таким образом, решение задачи гашения колебаний сведено к нахождению минимального значения времени T_0 разрешимости бесконечной системы (11), т. е. существования решения $u_1^0(t), \dots, u_n^{(0)}(t)$ этой системы в пространстве $L_2(0, T)$, для которого справедлива оценка:

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^{\alpha} u_j^0(t)_{L_2(v, l)}^2 &< \text{const} \left(h_0^2_{\dot{W}_2^1(0, l)} + h_1^2_{L_2(0, l)} \right) \leq \\ &\leq \text{const} E(0). \end{aligned} \quad (12)$$



Заметим, что из (10) вытекает существование предела

$$\lim_{n \rightarrow N} \frac{n}{\omega_n} = \frac{l}{\alpha\pi}. \quad (13)$$

Поэтому, согласно результатам, полученным Н. Левинсоном [4], при

$$\frac{l}{\alpha\pi} = \frac{T_0}{\alpha\pi}, \text{ т. е. при } T_0 = \frac{2l}{\alpha} \quad (14)$$

система $\{\cos \omega_n t, \sin \omega_n t\}$ образует базис Рисса в $L_2(0, T_0)$. Следовательно, для нее существует биортогональная система в $L_2(0, T_0)$, что позволяет установить существование единственного решения $\{u_n^{(0)}(t)\}$ системы (11), а также найти оптимальное управление $g_0(x, t)$ в виде ряда

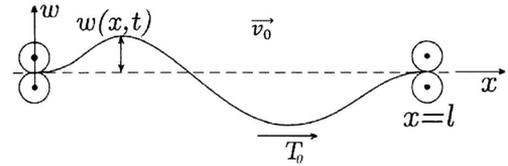
$$g_0(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(t) v_n(x). \quad (15)$$

Отметим, что результаты, полученные Дж. Лагнесом [1], имеют важное значение, поскольку из них вытекает гарантированное время гашения колебаний. Показано, что управляющую функцию можно использовать и в любой подобласти $[c, d]$ отрезка $[0, l]$, который на практике может иметь достаточно большую длину l . Однако приближенное оптимальное управление построить весьма затруднительно, т. к. приходится решать бесконечную систему интегральных уравнений для сопряженных функций и суммировать бесконечный ряд (15) в ситуации, когда его оценка стремится к бесконечности для $(d - c) \rightarrow 0$.

Поэтому все дальнейшие работы для (приближенного) решения задачи гашения колебаний, обзор которых будет сделан ниже, основаны на существенном сужении класса управляющих функций, причем в них рассматриваются не только струны, но и мембраны, балки и пластины.

Целью работы является решение задачи гашения поперечных колебаний

продольно движущейся струны, возникающей в производстве бумажного полотна. Исследования поперечных колебаний продольно движущейся струны начались около 60 лет назад [2; 5–6]. Была предложена следующая модель поперечных колебаний $w(x, t)$, связанных с движением бумажного полотна (см. рисунок) [7].



Р и с у н о к. Форма движущегося бумажного полотна

Figure. Shape of moving paper web

Здесь \vec{v}_0 – вектор продольной скорости, T_0 – вектор продольной силы на единицу длины, m – масса единицы длины:

$$m \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + 2v_0 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} + v_0^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) - T_0 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0.$$

Поэтому, приняв $c = \sqrt{\frac{T_0}{m}}$, можно привести данное уравнение к виду:

$$\frac{d^2 w}{dt^2} + 2v_0 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} + (v_0^2 - c^2) \frac{d^2 w}{dx^2} = 0, \quad 0 < x < l, t > 0. \quad (16)$$

При этом заданы граничные условия

$$w(0, t) = w(l, t) = 0, t > 0 \quad (17)$$

и начальные возмущения:

$$w(x, 0) = h_0(x), w_t(x, 0) = h_1(x), \quad x \in [0; l]. \quad (18)$$

Для решения смешанной задачи справедлив аналогичный случаю закрепленной струны закон сохранения энергии:

$$E(t) = \int_0^l [w_t^2(x, t) + (c^2 - v_0^2)w_x^2(x, t)] dx \equiv E(0) = \int_0^l [h_t^2(x) + (c^2 - v_0^2)(h_0'(x))^2] dx. \quad (19)$$

Таким образом, кориолисово ускорение $2v_0 w_{xt}$ не вносит вклад в энергию системы, и в ней должно существовать решение в виде стоячих волн. Но из-за наличия члена $2v_0 w_{xt}$ их невозможно найти традиционным методом разделения переменных.

Тем не менее данные функции найдены с использованием специальных функций и образуют систему решений $v_k(x, t) = \exp\left\{\pm \frac{ik\pi}{cl} [v_0^2 - c^2]t - v_0 x\right\}$, $k = 1, 2, \dots$. В работах Л. А. Муравья и Б. Т. Билалова¹⁻² [8] при естественном предположении $v_0 < c$ показано, что система $\{v_k(x, 0)\}$ образует базис Рисса в $L_2(-l, l)$. Это позволяет построить обобщенное решение смешанной задачи (16)–(18) с управляющей функцией $g(x, t) \in L_2(0 < x < l, 0 < t < T)$.

Доказано, что при $T_0 = \frac{lc}{\pi(c^2 - v_0^2)}$ тригонометрическая проблема моментов, вытекающая из условия $E(T_0) = 0$, имеет единственное решение: $\{u_1^\circ(t), \dots, u_k^\circ(t), \dots\}$ в $L_2[0, T_0]$.

Исследованы различные классы управляющих функций для построения приближенного решения, которые позволяют установить необходимые условия оптимальности или получить численное решение задачи гашения колебаний, используя методы

условий оптимизации градиентного спуска.

Обзор литературы

Как уже было отмечено, исследования, посвященные гашению колебаний упругих систем, различаются как управляемыми объектами, так и классами управляющих функций, часто называемыми демпферами.

Начнем обзор с работ, посвященных задаче гашения колебаний струны. В 1978 г. Дж. Расселл [4] предложил использовать только одну управляющую функцию (т. н. распределенный демпфер):

$$g(x, t) = u(t) f(x), \quad 0 \leq x \leq l, t > 0, \quad (20)$$

где $f(x)$ – некоторая заданная функция. Тогда проблему моментов (11) при ($q(x) = 0$) можно записать в виде:

$$\int_0^T e^{i \frac{\pi a n t}{l}} u(t) dt = -\beta_n + i \frac{\pi a n}{l} \alpha_n, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (21)$$

где

$$f_n = \sqrt{\frac{2}{l}} \int_0^l f(x) \sin \frac{\pi a n x}{l} dx$$

должны быть $\neq 0$. (22)

Видно, что при $T_0 = \frac{2l}{a}$ система экспонент $\left\{e^{i \frac{a \pi n}{l} t}\right\}$ образует ортогональный базис в комплексном пространстве $L_2(0, T_0)$, и функция оптимального управления $u_0(t)$ представляется в виде:

¹ Muravey L. A. On the suppression on membrane oscillations // Dynamical Problems of Rigid-Elastic System : Summaries of IUTAM Symposium. Moscow, 1990. P. 50–51.

² Билалов Б. Т., Муравей Л. А. О гашении колебаний больших механических систем // Интеллектуальные системы : тр. 2-го междунар. симпоз. «Интелс-96». М. : РУДН, 1996. С. 246–254.



$$u_0(t) = \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-i \frac{\pi a n t}{l}} \frac{\left(-\beta_n + i \frac{\pi a n}{l}\right) \alpha_n}{f_n}. \quad (23)$$

Заметим, что, если $f(x) \in L_2(0, l)$, то в силу равенства Парсеваля $f_n \rightarrow 0$, $n \rightarrow \infty$. Значит, ряд (23) не сходится в $L_2(0, T_0)$, и, таким образом, оптимальное решение $w(x, t)$ задачи (1)–(9) при $f_n \rightarrow 0$, $n \rightarrow \infty$ не принадлежит энергетическому пространству (для него не определен интеграл энергии).

Если принять $f_n = 1$, то получим, что:

$$f(x) = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{\pi n x}{l} = \delta(x), \quad (24)$$

где $\delta(x)$ – дельта функции Дирака. Далее приходим к исследованию проблемы моментов для управлений вида:

$$g(x, t) = u(t) \delta(x - x_0), \quad x_0 \in (0, l) \quad (25)$$

(т. н. неподвижные точечные демпферы).

Исследованию проблемы моментов для случая неподвижных точечных демпферов посвящен ряд работ А. Г. Бутковского [10]. Из них, в частности, следует, что для $f_n = \sin\left(\frac{\pi n}{l} x_0\right)$

точки $x_0 = \frac{k\pi}{nl}$, $k, n = 1, 2, \dots$, $k < n$ образуют множество точек неуправляемости системы (1)–(3). В этом случае возникают решения соответствующей однородной системы в виде стоячих волн типа (8), энергия которых постоянна и отлична от нуля, причем множество точек неуправляемости плотно на всем отрезке $[0, l]$. Это затрудняет построение устойчивых алгоритмов численного (приближенного) решения задачи гашения колебаний в точках управляемости системы. При этом принадлеж-

ность оптимального уравнения $u_0(t)$ пространству $L_2(0, T_0)$ требует значительной гладкости начальных возмущений $h_0(x)$ и $h_1(x)$.

Основными в работах авторов являются т. н. «точечные движущиеся демпферы»³, а именно уравнения вида:

$$g(x, t) = u(t) \delta(x - x_0 - s(t)). \quad (26)$$

Здесь $x_0 \in (0, l)$, а $s(t) = \int_0^t v(t') dt'$, где $v(t)$ – функция ограниченной вариации на отрезке $[0, T]$. Таким образом, имеем две управляющие функции $u(t) \in L_2(0, T)$ и $v(t) \in V[0, T]$ (т. е. для любого разбиения $0 < t_0 < t_1 < \dots < t_n = T$ отрезка $[0, T] \sum_{j=1}^n |v(t_j) - v(t_{j-1})| \leq \text{const}$).

Заметим, что введение точечных движущихся демпферов вполне естественно, поскольку множество точек неуправляемости системы имеет лебеговскую меру нуль на $[0, T]$, а значит, введение второй управляющей функции $v(t)$ позволяет почти всем $t \in [0, T]$ находиться в точках управляемости, и тем самым избежать появления нежелательных стоячих волн.

Проблема моментов для простейшего демпфера вида (26), а именно

$$x_0 = 0 \text{ и } s(t) = bt, \quad 0 \leq t \leq \frac{l}{b}$$

$$\text{и } s(t) = \frac{2l}{b} - t, \quad \frac{l}{b} \leq t \leq \frac{2l}{b},$$

где $b = \text{const} > a$, исследована Б. Т. Билаловым и соавторами⁴ [7]. В частности, было показано, что возникающие в случае простейшего демпфера тригонометрические системы

$$\left\{ e^{i \frac{\pi a n t}{l}} \sin\left(\frac{\pi l n t}{l}\right) \right\}_{n=1}^{\infty} \quad (27)$$

³ Muravey L. A. On the suppression on membrane oscillations // Dynamical Problems of Rigid-Elastic System : Summaries of IUTAM Symposium. Moscow, 1990. P. 50–51.

⁴ Там же.

образуют базис Рисса в $L_2(0, \tilde{T})$, где $\tilde{T} = \frac{2l}{b}$. Значит, время гашения колебаний точечным движущимся демпфером меньше времени гашения колебаний, полученного Дж. Лагнесом.

Использование точечного движущегося демпфера (26) при ограничениях $a < c \leq x_0 + s(t) \leq d < b$ позволило разработать эффективные численные методы гашения колебаний струн, круглых и прямоугольных мембран [11–13], а также балок и прямоугольных пластин⁵ [14]. Более подробный обзор результатов по этой теме содержится в монографии авторов статьи [15].

Ряд работ В. И. Ильина и В. М. Моисеева [16–18] посвящен граничному уравнению колебаний струны.

Материалы и методы

Построение обобщенного решения задачи поперечных колебаний продольно движущейся струны

Сначала рассмотрим уравнение (16) для всех $x \in (-\infty, +\infty)$ и $t \geq 0$. При естественном ограничении $c > v_0$ решение $x = \varphi(t)$ уравнения характеристик для (16) имеет вид:

$$(\varphi')^2 - 2v_0\varphi' + v_0^2 - c^2 = 0, \quad (28)$$

откуда следует, что $\varphi'(t) = v_0 \pm c$, и характеристики уравнения (16) имеют вид:

$$\xi = x - (v_0 + c)t, \quad \eta = x + (c - v_0)t. \quad (29)$$

Общее решение уравнения (1) имеет вид:

$$w(x, t) = f(x - (v_0 + c)t) + g(x + (c - v_0)t), \quad (30)$$

где f, g – произвольные функции из $C_{x,t}^2(0 < x < +\infty, t \geq 0)$.

Следует отметить, что представление (30) позволяет решить задачу Коши и особенно эффективно при численных решениях смешанной задачи (1)–(3) методом характеристик.

Для решения $w(x, t)$ смешанной задачи (16)–(18) обычным приемом [13] устанавливается закон сохранения энергии:

$$E(t) = \int_0^l [w_{0x}^2(x, t) + (c^2 - v_0^2)w_{0x}^2(x, t)] dx \equiv E(0) = \int_0^l [h_1^2(x) + (c^2 - v_0^2)(h_0'(x))^2] dx, \quad (31)$$

поэтому естественно искать решения смешанной задачи из соответствующего энергетического пространства [13]. При этом для вывода проблемы моментов требуется найти его решение в виде ряда стоячих волн. Заметим, что исследованию стоячих волн задачи (1)–(2) посвящено достаточно большое количество работ, в частности, Н. В. Баничука и соавторами [7]. Кроме того, целый ряд исследований (например, [19]) посвящен изучению стоячих волн приближенного уравнения (16).

Для вывода проблемы моментов необходимо найти такую систему стоячих волн $v_k(x, t), k = 1, 2, \dots$, чтобы система $\{v_k(x, 0)\}_{k=1}^\infty$ была базисом Рисса в $L_2(-l, l)$. Для этого сначала нужно найти комплексные решения задачи (16)–(17):

$$v(x, t) = \exp\{\pm i\alpha(v_0^2 - c^2)\beta t - v_0\gamma x\} \sin(\alpha x). \quad (32)$$

Непосредственно проверяется, что уравнение (16) выполняется при $\alpha > 0$ и $\gamma = \beta = \frac{1}{c}$, а граничные условия (2) – при $a = a_k = \frac{k\pi}{l}, k = 1, 2, \dots$

⁵ Atamuratov A. Zh., Mikhailov I. E., Muravey L. A. Damping of oscillations of a rectangular membrane by using multiple point dampers // VII International Conference on Optimization Methods and Applications «Optimization and Applications» (OPTIMA-2016) : Proceedings. M. : Dorodnicyn Computing Centre, FRC CSC RAS, 2016. 163 p.



Таким образом, мы получим систему функций

$$\gamma = \beta = \frac{1}{c}, \quad (33)$$

задающих все решения задачи (10), (15). Из (33) при $t = 0$ выведем систему

$$v_k(x) = e^{\pm i v_0 \left(\frac{k\pi x}{l} \right)} \sin \left(\frac{k\pi x}{l} \right), \quad k = 1, 2, \dots, \quad (34)$$

которая исследована в работах Б. Т. Билалова и Л. А. Муравья⁶ [8]. Отсюда, в частности, следует, что при $v_0 < c$ эта система в виде

$$\begin{aligned} & \{y_k(x), z_k(x)\} = \\ & = \left\{ \cos \left(\frac{k\pi v_0}{lc} x \right) \sin \frac{k\pi x}{l}, \sin \left(\frac{k\pi v_0}{lc} x \right) \sin \frac{k\pi x}{l} \right\} \end{aligned} \quad (35)$$

образует базис Рисса в пространстве $L_2(-l, l)$.

Следовательно, решение $w_0(x, t)$ смешанной задачи (16)–(18) из энергетического пространства определяется единственным образом в виде ряда

$$\begin{aligned} w_0(x, t) = & \sum_{k=1}^{\infty} \left[\alpha_k y_k(x) \cos \left(\frac{k\pi(c^2 - v_0^2)}{lc} t \right) + \right. \\ & \left. + \beta_k \frac{clz_k(x)}{k\pi(c^2 - v_0^2)} \sin \frac{k\pi(c^2 - v_0^2)}{lc} t \right], \end{aligned} \quad (36)$$

где α_k – коэффициенты Фурье продолженной нечетным образом на $[-l, 0]$ функции $h_0(x) \in \mathbb{W}_2^1(0, l)$; β_k – коэффициенты Фурье продолженной четным образом на $(-l, 0)$ функции $h_1(x) \in L_2(0, l)$ по системе $[y_k(x), z_k(x)]$, биортогональной рассматриваемой системе $\{\zeta_k(x), \eta_k(x)\}$. При этом справедливы оценки

$$\sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k^2 \leq \text{const} h_0(x)_{L_2(0, l)}^2,$$

$$\sum_{k=1}^{\infty} \beta_k^2 \leq \text{const} h_1(x)_{L_2(0, l)}^2,$$

$$\sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k^2 k^2 \leq \text{const} h_0'(x)_{L_2(-l, l)}^2. \quad (37)$$

Теперь введем функцию управления $g(x, t) \in L_2(\Pi_T)$, где $\Pi_T = \{0 \leq x \leq l, 0 \leq t \leq T\}$; представим решение смешанной задачи для уравнения:

$$\begin{aligned} w_{tt} + 2v_0 w_{tx} + (v_0^2 - c^2) w_{xx} = g(x, t), \\ 0 < x < l, 0 < t < T \end{aligned} \quad (38)$$

с граничными условиями (17) и начальными условиями (18) в виде $w = w_0 + w_g$, где

$$w_g(x, t) = \int_0^t \tilde{w}(x, t - \tau, \tau) d\tau, \quad (39)$$

где $\tilde{w}(x, t - \tau, \tau)$ является решением смешанной задачи при начальных условиях

$$\tilde{w}|_{t=\tau} = 0, \quad \tilde{w}|_{t=\tau} = g(x, \tau). \quad (40)$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} w_g(x, t) = & \sum_{k=1}^{\infty} \frac{z_k(x) cl}{k\pi(c^2 - v_0^2)} \times \\ & \times \int_0^t u_k(\tau) \sin \left(\frac{k\pi(c^2 - v_0^2)}{lc} (t - \tau) \right) d\tau, \end{aligned} \quad (41)$$

где u_k – коэффициенты разложения функции $g(x, t)$, продолженной четно по x на отрезок $[-l, 0]$, по системе $\{z_k(x)\}$.

⁶ Билалов Б. Т., Муравей Л. А. О гашении колебаний больших механических систем // Труды II Международного симпозиума «Интеллектуальные системы» INTELS '96. СПб., 1996. С. 246–254.

Результаты исследования

Решение задачи гашения поперечных колебаний продольно движущейся струны заключается в нахождении такого минимального значения времени $t = T_0$, при котором для любых допустимых начальных возмущений $h_0(x) \in \mathring{W}_0^1(0, l)$, $h_1(x) \in L_2(0, l)$ найдется такое оптимальное управление $g_0(x, t) \in L_2(0 \leq x \leq l, 0 \leq t \leq T_0)$, что в момент времени $t = T_0$ для решения $w(x, t) = w_0(x, t) + w_g(x, t)$ смешанной задачи выполняются равенства

$$w(x, T_0) = 0, w_t(x, T_0) = 0, x \in [0, l], \quad (42)$$

т. е. энергия системы в момент времени $t = T_0$ обращается в 0. Из представлений (36), (41) с помощью стандартных преобразований находим следующую систему интегральных уравнений первого рода:

$$\begin{cases} \int_0^T u_k(t) \cos\left(\frac{k\pi(c^2 - v_0^2)}{lc}t\right) dt = -\beta_k, \\ \int_0^T u_k(t) \sin\left(\frac{k\pi(c^2 - v_0^2)}{lc}t\right) dt = \alpha_k \frac{k\pi(c^2 - v_0^2)}{lc}, \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, \quad (43)$$

называемую проблемой моментов относительно тригонометрической системы

$$\left\{ \cos\left(\frac{k\pi(c^2 - v_0^2)}{lc}t\right), \sin\left(\frac{k\pi(c^2 - v_0^2)}{lc}t\right) \right\}, \quad k = 0, 1, \dots \quad (44)$$

на отрезке $[0, T]$. Приняв $\omega_k = \frac{k\pi(c^2 - v_0^2)}{lc}$, получим, что

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{k}{\omega_k} = \frac{lc}{\pi(c^2 - v_0^2)}. \quad (45)$$

Таким образом, из результатов Н. Левинсона [4] следует, что система

$$(44) \text{ при } \frac{lc}{\pi(c^2 - v_0^2)} = \frac{T_0}{2\pi}, \text{ т. е. при}$$

$$T_0 = \frac{2lc}{(c^2 - v_0^2)}, \quad (46)$$

образует базис Рисса на отрезке $[0, T_0]$. Следовательно, для нее в $L_2(0, T_0)$ существует биортогональная система $\{\varphi_k(t), \psi_k(t)\}$. А значит, существует решение проблемы моментов:

$$\begin{aligned} u_k^0(t) &= \beta_k \varphi_k(t) - \alpha_k \omega_k \psi_k(t), \\ t &\in [0, T_0], k = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (47)$$

Таким образом, вызываемые начальными возмущениями $h_0(x)$ и $h_1(x)$ колебания $w(x, t)$ можно погасить за минимальное время T_0 , не зависящее от $h_0(x)$ и $h_1(x)$, для всех допустимых возмущений. При этом оптимальное управление $g_0(x, t)$ представляется в виде сходящегося в $L_2(\Pi_{T_0})$ ряда

$$g_0(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} u_k^0(t) z_k(x) \quad (48)$$

и удовлетворяет оценке

$$g_0(x, t)_{L_2(T_0)}^2 \leq \text{const} \left(h_0^1(x)_{L_2(0, l)}^2 + (h_1(x)_{L_2(0, l)})^2 \right). \quad (49)$$

Следует отметить, что найденное T_0 должно удовлетворять неравенству



$T_0 v_0 \leq l$, которое выполняется при дополнительном ограничении на v_0

$$v_0 \leq (\sqrt{2} - 1)c. \quad (50)$$

О классах управляющих функций

Заметим, что в случае $v_0 = 0$ время гашения колебаний совпадает со временем гашения колебаний закрепленной струны, установленным Дж. Лагнесом [1]. Исследователь показал, что за это же время можно погасить колебания струны, если управление $g(x, t)$ сосредоточено на произвольном отрезке $[\gamma, \delta] \subset [0, l]$, т. е. при $g(x, t) \in L_2 \left(\gamma \leq x \leq \delta, 0 \leq t \leq \hat{T}_0 \right)$, где $\hat{T}_0 = \frac{2l}{c}$. Аналогичный результат справедлив и в рассматриваемом случае. Действительно, если $g(x, t) \in L_2(\Pi_T)$ и $\sup_x g(x, t) \in [\gamma, \delta]$, то вместо проблемы моментов (43) получим проблему моментов

$$\begin{cases} \int_0^{\delta} \int_0^{\hat{T}_0} g_0(x, t) \cos \omega_n t dx dt = -\beta_n, \\ \int_0^{\delta} \int_0^{\hat{T}_0} g_0(x, t) \sin \omega_n t dx dt = a_n \omega_n, \end{cases} \quad n=1, 2, \dots \quad (51)$$

В этом случае искомое решение $g_0(x, t)$ системы (51) имеет вид:

$$g_0(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} (A_n^2 \omega_n a_n y_n(x) \psi_n(t) - B_n^2 \beta_n z_n(x)) \cdot \chi_{[\alpha, \beta]}(x), \quad (52)$$

где $\chi_{[\gamma, \delta]}(x)$ – характеристическая функция отрезка $[\gamma, \delta]$,

$$A_n^2 = \left(\int_{\gamma}^{\delta} y_n^2(x) dx \right)^{-1}, \quad B_n^2 = \left(\int_{\gamma}^{\delta} z_n^2(x) dx \right)^{-1}, \quad n=1, 2, \dots \quad (53)$$

При этом $\inf A_n^2 \geq \text{const}(\delta - \gamma)$ и, аналогично,

$$\inf B_n^2 \geq \text{const}(\delta - \gamma). \quad (54)$$

Следовательно, построенное оптимальное управление $g_0(x, t)$ удовлетворяет оценке

$$g_0(x, t)_{L_2}^2 \leq \frac{\text{const}}{\delta - \gamma} (h_0^2(x)_{L_2(0, l)} + h_1^2(x)_{L_2(0, l)}). \quad (55)$$

В данной статье будем предполагать, что управляющая функция $g(x, t)$ имеет вид:

$$g(x, t) = \sum_{k=1}^K u_k(t) \chi_k(x), \quad (56)$$

где $0 < x_1 < \dots < x_k < l$, а $\chi_k(x)$ – характеристическая функция на отрезке $[x_k - \varepsilon, x_k + \varepsilon]$, при этом $\varepsilon > 0$ достаточно мало, так что все указанные отрезки не пересекаются и принадлежат отрезку $[0, l]$. Дополнительная информация представлена в работах А. Макмудова и Л. А. Муравья⁷ [20].

Введем минимизируемый функционал:

$$\begin{aligned} J(t) &= E(t) + \lambda \int_0^l g^2(x, t) dx = \\ &= \int_0^l [w_t^2(x, t) + (c^2 - v_0^2) w_x^2(x, t)] dx + \\ &\quad + 2\lambda \varepsilon \sum_{k=1}^K u_k^2(t). \end{aligned} \quad (57)$$

Примем $2\lambda \varepsilon = \mu$ и будем считать функции $u_k(t)$ кусочно-постоянными:

$$u_k(t) = u_{kp}, \quad \text{при } t_{p-1} < t < t_p, \quad p = 1, 2, \dots, P. \quad (58)$$

Здесь P может принимать значения от 1 до N , где N – число шагов по вре-

⁷ **Makmudov A., Muravey L.** The problem of string vibrations damping // 1st International Conference on Nonlinear Analysis and Nonlinear Modeling : Proceedings. Fethiye, 2001. P. 174–182.

мени, используемых при численном решении задачи.

Таким образом, функционал J становится функцией значений u_{kp} , и для применения градиентного метода требуется значение всех частных производных $\frac{\partial J}{\partial u_{kp}}$, $k = \overline{1, K}$, $p = \overline{1, P}$.

Обсуждение и заключение

В статье получено обобщенное решение уравнения движения бумажного полотна; с помощью стандартного приема установлен закон сохранения энергии колебаний. Показано, что возникающая система собственных функций $\left\{ \cos\left(\frac{k\pi v_0}{lc}x\right) \sin\frac{k\pi x}{l}, \sin\left(\frac{k\pi v_0}{lc}x\right) \sin\frac{k\pi x}{l} \right\}$ образует базис Рисса в соответствующем

функциональном пространстве, что позволило установить минимальное время гашения колебаний и явно выписать управляющую функцию, которая гасит эти колебания. Также описан класс управляющих функций; показана возможность применения градиентного метода для поиска минимума функционала энергии. Такой метод численной оптимизации будет рассмотрен в дальнейших работах, где будут также установлены необходимые условия оптимальности в форме принципа максимума Л. С. Понтрягина (аналогично тому, как это сделано в статье А. А. Гурченкова и соавторами [21]) и приведены графические иллюстрации оптимальных режимов и процесса гашения колебаний.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Lagnese J.** Control of wave process with distributed controls supported on a subregion // *SIAM Journal of Control and Optimization*. 1983. Vol. 21, Issue 1. P. 68–85. DOI: <https://doi.org/10.1137/0321004>
2. **Archibald F. R., Emslie A. G.** The vibration of a string having a uniform motion along its length // *Journal of Applied Mechanics*. 1958. Vol. 25, Issue 1. P. 347–348.
3. **Lions J. L.** Exact controllability, stabilization and perturbations for distributed systems // *SIAM Review*. 1988. Vol. 30, Issue 1. P. 1–68. DOI: <https://doi.org/10.1137/1030001>
4. **Levinson N.** Gap and density theorem // *Colloquium Publications*. 1940. Vol. 26. 246 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1090/coll/026>
5. **Mahalingam S.** Transverse vibrations of power transmission chains // *British Journal of Applied Physics*. 1957. Vol. 8, no. 4. P. 145–148. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0508-3443/8/4/303/pdf>
6. **Sack R. A.** Transverse oscillations in traveling strings // *British Journal of Applied Physics*. 1954. Vol. 5, no. 6. P. 224–226. DOI: <https://doi.org/10.1088/0508-3443/5/6/307>
7. *Mechanics of moving materials* / N. Banichuk [et al.]. Switzerland : Springer, 2014. 207 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-01745-7>
8. **Билалов Б. Т.** О базисности системы $\{e^{ia_n x} \sin(nx)\}$ экспонент со сдвигом // *Доклады Академии наук*. 1995. Т. 345, № 2. С. 644–647.
9. **Russell D. L.** Controllability and stabilizability theory for linear partial differential equations: recent progress and open questions // *SIAM Review*. 1978. Vol. 20, no. 4. P. 639–739. DOI: <https://doi.org/10.1137/1020095>
10. **Бутковский А. Г.** Методы управления системами с распределенными параметрами : монография. М. : Наука, 1975. 568 с. URL: <https://www.twirpx.com/file/34383>
11. **Асланов С. Ж., Михайлов И. Е., Муравей Л. А.** Аналитические и численные методы в задаче гашения колебаний струны точечным демпфером // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2006. № 7. С. 28–35.
12. **Асланов С. Ж., Михайлов И. Е., Муравей Л. А.** О гашении колебаний круглой мембраны с помощью кольцевого демпфера // *Труды ИСА РАН*. 2007. Т. 29 (1), № 11. С. 54–59.
13. **Михайлов В. П.** Дифференциальные уравнения в частных производных : монография. М. : Наука, 1983. 424 с.



14. **Атамуратов А. Ж., Михайлов И. Е., Муравей Л. А.** Проблема моментов в задачах управления упругими динамическими системами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 9. С. 587–598. DOI: <https://doi.org/10.17587/mau.17.587-598>
15. **Муравей Л. А., Романенков А. М., Петров В. М.** Оптимальное управление нелинейными процессами в задачах математической физики : монография. М. : Изд-во МАИ, 2018. 159 с.
16. **I'in V. A., Moiseev E. I.** Optimization of the boundary control by shift or elastic force at one end of string in a sufficiently long arbitrary time // Automation and Remote Control. 2008. Vol. 69, Issue 3. P. 354–362. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0005117908030028>
17. **Ильин В. А., Моисеев Е. И.** Граничное управление колебаниями струны, минимизирующее интеграл от степени $p \geq 1$ модуля управления или его производной // Автоматика и телемеханика. 2007. Т. 68, № 2. С. 313–319. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0005117907020117>
18. **Ильин В. А., Моисеев Е. И.** Оптимизация граничных управлений колебаниями струны // Успехи математических наук. 2005. Т. 60, вып. 6. С. 89–114. DOI: <https://doi.org/10.4213/rm1678>
19. **Malookani R. A., van Horsen W. T.** On the vibrations of an axially moving string with a time-dependent velocity // Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. ASME, 2015. Vol. 4B: Dynamics, Vibration, and Control. P. V04BT04A061. DOI: <https://doi.org/10.1115/IMECE2015-50452>
20. **Муравей Л. А.** Задача управления границей для эллиптических уравнений // Вестник МГУ (Сер. 15 «Вычислительная математика и кибернетика»). 1998. № 3. С. 7–13.
21. **Гурченков А. А., Муравей Л. А., Романенков А. М.** Моделирование и оптимизация технологического процесса ионно-лучевого травления // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. № 2 (26). DOI: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2014-2-1211>

Поступила 19.06.2018; принята к публикации 15.08.2018; опубликована онлайн 28.12.2018

Об авторах:

Муравей Леонид Андреевич, профессор кафедры компьютерной математики, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (121552, Россия, г. Москва, ул. Оршанская, д. 3), доктор физико-математических наук, ResearcherID: U-2857-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5432-8843>, l_muravey@mail.ru

Петров Виктор Михайлович, доцент кафедры компьютерной математики, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (121552, Россия, г. Москва, ул. Оршанская, д. 3), кандидат физико-математических наук, ResearcherID: U-2845-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3382-7496>, pm@mat.i.ru

Романенков Александр Михайлович, доцент кафедры компьютерной математики, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (121552, Россия, г. Москва, ул. Оршанская, д. 3), кандидат технических наук, ResearcherID: T-3538-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0700-8465>, romanaleks@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

Л. А. Муравей – постановка проблемы, разработка методики и анализ методологической базы исследования, обзор литературы, доказательство базисности Рисса для тригонометрической системы специального вида; В. М. Петров – получение ограничения на скорость в движущемся материале, постановка экстремальной задачи и выведение представления минимизируемого функционала; А. М. Романенков – получение оценки на оптимальное управление.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Lagness J. Control of wave process with distributed controls supported on a subregion. *SIAM Journal of Control and Optimization*. 1983; 21(1):68–85. DOI: <http://doi.org/10.1137/0321004>
2. Archibald F. R., Emslie A. G. The vibration of a string having a uniform motion along its length. *ASME Journal of Applied Mechanics*. 1958; 25(1):347–348.
3. Lions J. L. Exact Controllability, Stabilization and Perturbations for Distributed Systems. *SIAM Review*. 1983; 30(1):1–68. DOI: <http://doi.org/10.1137/1030001>
4. Levinson N. Gap and density theorem. *Colloquium Publications*. 1940; 26. 246 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1090/coll/026>
5. Mahalingam S. Transverse vibrations of power transmissions chains. *British Journal of Applied Physics*. 1957; 8(4):145–148. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0508-3443/8/4/303/pdf>
6. Sack R. A. Transverse oscillations in traveling strings. *British Journal of Applied Physics*. 1954; 5(6):224–226. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0508-3443/5/6/307/pdf>
7. Banichuk N., Jeronen J., Neittaanmäki P., Saksa T., Tuovinen T. *Mechanics of Moving Materials*. Switzerland: Springer; 2014. 207 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-01745-7>
8. Bilalov B. T. On the basis property of the system $\{e^{in\pi x}\sin(nx)\}$ of exponentials with a shift. *Doklady Akademii nauk* = Reports of the Academy of Sciences. 1995; 345(2):644–647. (In Russ.)
9. Russel D. L. Controllability and stabilizability theory for linear partial differential equations: recent progress and open questions. *SIAM Review*. 1978; 20(4):639–739. DOI: <https://doi.org/10.1137/1020095>
10. Butkovsky A. G. [*Methods of Control of Systems with Distributed Parameters*]. Moscow: Nauka Publ.; 1975. 568 p. Available at: <https://www.twirpx.com/file/34383> (In Russ.)
11. Aslanov S. Zh., Mikhailov I. E., Muravey L. A. [Analytical and numerical methods in the problem of string oscillation damping by a point damper]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* = Mechatronics, Automation, Control. 2006; 7:28–35. (In Russ.)
12. Aslanov S. Zh., Mikhailov I. E., Muravey L. A. [On damping oscillations of a circular membrane using a ring damper]. *Trudy ISA RAN* = Proceeding of the Institute for Systems Analysis of the Russian Academy of Science. 2007; 29(1)11:54–59. (In Russ.)
13. Mikhailov V. P. [*Partial Differential Equations*]. Moscow: Nauka Publ.; 1983. 424 p. (In Russ.)
14. Atamuratov A. Zh., Mikhailov I. Ye., Muravey L. A. The problem of moments in problems of controlling elastic dynamical systems. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* = Mechatronics, Automation, Control. 2016; 17(9):587–598. DOI: <https://doi.org/10.17587/mau.17.587-598> (In Russ.)
15. Muravey L. A., Romanenkov A. M., Petrov V. M. *Optimal Control of Nonlinear Processes in Problems of Mathematical Physics*. Moscow: MAI Publ.; 2018. 159 p. (In Russ.)
16. Il'in V. A., Moiseev E. I. Optimization of the boundary control by shift or elastic force at one end of string in a sufficiently long arbitrary time. *Automation and Remote Control*. 2008; 69(3):354–362. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0005117908030028>
17. Il'in V. A., Moiseev E. I. Boundary control of string vibrations that minimizes the integral of power $p \geq 1$ of the module of control or its derivative *Automation and Remote Control*. 2007; 68(2):313–319. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0005117907020117>
18. Il'in V. A., Moiseev E. I. Optimization of boundary controls of string vibrations. *Russian Mathematical Surveys*. 2005; 60(6):1093–1119. DOI: <http://dx.doi.org/10.1070/RM2005v060n06ABEH004283>
19. Malookani R., Van Horssen W. T. On the vibrations of the moving string with a time-dependent velocity. *ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 2015; V04BT04A061. DOI: <https://doi.org/10.1115/IMECE2015-50452>
20. Muravey L. A. The problem boundary control for elliptic equation. *Vesnik Moskovskogo universiteta. Ser. 15: Vychislitel'naya matematika i kibernetika* = MSU Bulletin. Series 15: Computational Mathematics and Cybernetics. 1998; 3:7–13. (In Russ.)



21. Gurchenkov A. A., Muravey L. A., Romanenkov A. M. Modeling and optimization of the technological process of ion-beam etching. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* = Engineering Journal: Science and Innovation. 2014; 2(26). DOI: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2014-2-1211>. (In Russ.)

Received 19.06.2018; revised 15.08.2018; published online 28.12.2018

About authors:

Leonid A. Muravey, Professor, Chair of Computer Mathematics, Moscow Aviation Institute (National Research University) (3 Orshanskaya St., Moscow 121552, Russia), D.Sc. (Physics and Mathematics), ResearcherID: U-2857-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5432-8843>, l_muravey@mail.ru

Victor M. Petrov, Associate Professor, Chair of Computer Mathematics, Moscow Aviation Institute (National Research University) (3 Orshanskaya St., Moscow 121552, Russia), Ph.D. (Physics and Mathematics), ResearcherID: U-2845-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3382-7496>, pm@mati.ru

Alexandr M. Romanenkov, Associate Professor, Chair of Computer Mathematics, Moscow Aviation Institute (National Research University) (3 Orshanskaya St., Moscow 121552, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: T-3538-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0700-8465>, romanaleks@gmail.com

Contribution of the authors:

L. A. Muravey – formulation of the problem, method development, analysis of the methodological base the research, literature review, proof of Riesz basicity for a special type of trigonometric system; V. M. Petrov – obtaining the speed limit in a moving material, posing an extremal problem, and deriving the representation of the minimized functional; A. M. Romanenkov – obtaining an estimate for optimal control.

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



Параметризация задачи Коши для нелинейных дифференциальных уравнений с контрастными структурами

Е. Б. Кузнецов*, С. С. Леонов, Е. Д. Цапко
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»
(г. Москва, Россия)

*kuznetsov@mai.ru

Введение. В статье приводятся результаты анализа численных методов решения задачи Коши для нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений с контрастными структурами (внутренними слоями). Подобные уравнения моделируют различные прикладные задачи гидроаэромеханики, химической кинетики, теории каталитических реакций и т. д. Получить аналитическое решение этих задач удается редко, а их численное решение сопряжено со значительными трудностями, связанными с плохой обусловленностью в окрестности пограничных и внутренних слоев. Целью статьи является анализ области применения традиционных численных методов к решению задач данного класса и апробация альтернативных методов решения. *Материалы и методы.* Для численного решения задачи Коши используются традиционные явные методы Эйлера и Рунге-Кутты четвертого порядка точности, а также неявный метод Эйлера с постоянным и переменным шагом. В качестве альтернативы предложено использовать метод продолжения решения по наилучшему аргументу, который заключается в замене исходного аргумента задачи на новый, отсчитываемый вдоль интегральной кривой задачи. Переход к наилучшему аргументу позволяет получить наилучшим образом обусловленную задачу Коши.

Результаты исследования. На примере решения тестовой задачи показаны вычислительные затруднения, возникающие при решении уравнений с контрастными структурами традиционными явными и неявными методами. Они выражаются в значительном уменьшении шага интегрирования в окрестности пограничных слоев, что приводит к увеличению времени счета и усложнению процесса решения сверхжестких задач. Достоверность полученных результатов подтверждается сопоставлением с аналитическим решением и известными работами других авторов.

Обсуждение и заключение. Результаты вычислительного эксперимента демонстрируют применимость традиционных методов решения задачи Коши к уравнениям с контрастными структурами лишь при малой жесткости, в остальных случаях данные методы малоэффективны. Показано, что метод продолжения решения по наилучшему аргументу позволяет снять большинство недостатков, присущих непроброзованной задаче. Это отражается в снижении времени счета и увеличении точности полученного решения.

Ключевые слова: контрастные структуры, метод продолжения решения, наилучший аргумент, плохая обусловленность, задача Коши, обыкновенное дифференциальное уравнение

Для цитирования: Кузнецов Е. Б., Леонов С. С., Цапко Е. Д. Параметризация задачи Коши для нелинейных дифференциальных уравнений с контрастными струк-



турами // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 4. С. 486–510. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.486-510>

Благодарности: Исследование проведено при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 18-19-00474).

The Parametrization of the Cauchy Problem for Nonlinear Differential Equations with Contrast Structures

E. B. Kuznetsov*, S. S. Leonov, E. D. Tsapko

Moscow Aviation Institute (National Research University)

(Moscow, Russia)

*kuznetsov@mai.ru

Introduction. The paper provides an analysis of numerical methods for solving the Cauchy problem for nonlinear ordinary differential equations with contrast structures (interior layers). Similar equations simulate various applied problems of hydro- and aeromechanics, chemical kinetics, the theory of catalytic reactions, etc. An analytical solution to these problems is rarely obtained, and numerical procedure is related with significant difficulties associated with ill-conditionality in the neighborhoods of the boundary and interior layers. The aim of the paper is the scope analysis of traditional numerical methods for solving this class problems and approbation of alternative solution methods.

Materials and Methods. The traditional explicit Euler and fourth-order Runge-Kutta methods, as well as the implicit Euler method with constant and variable step sizes are used for the numerical solution of the Cauchy problem. The method of solution continuation with respect to the best argument is suggested as an alternative to use. The solution continuation method consists in replacing the original argument of the problem with a new one, measured along the integral curve of the problem. The transformation to the best argument allows obtaining the best conditioned Cauchy problem.

Results. The computational difficulties arising when solving the equations with contrast structures by traditional explicit and implicit methods are shown on the example of the test problem solution. These difficulties are expressed in a significant decrease of the step size in the neighborhood of the boundary and interior layers. It leads to the increase of the computational time, as well as to the complication of the solving process for super stiff problems. The authenticity of the obtained results is confirmed by the comparison with the analytical solution and the works of other authors.

Conclusions. The results of the computational experiment demonstrate the applicability of the traditional methods for solving the Cauchy problem for equations with contrast structures only at low stiffness. In other cases these methods are ineffective. It is shown that the method of solution continuation with respect to the best argument allows eliminating most of the disadvantages inherent to the original problem. It is reflected in decreasing the computational time and in increasing the solution accuracy.

Keywords: contrast structures, method of solution continuation, the best argument, ill-conditionality, the Cauchy problem, ordinary differential equation

For citation: Kuznetsov E. B., Leonov S. S., Tsapko E. D. The Parametrization of the Cauchy Problem for Nonlinear Differential Equations with Contrast Structures. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(4):486–510. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.486-510>

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 18-19-00474.

Введение

В статье рассмотрена задача Коши для обыкновенного дифференциального уравнения n -го порядка, содержащего малый параметр ε при старшей производной [1]:

$$\varepsilon \frac{d^n y}{dt^n} = F\left(t, y, \frac{dy}{dt}, \dots, \frac{d^{n-1}y}{dt^{n-1}}\right), \varepsilon > 0 \quad (1)$$

с начальными условиями

$$y(0) = y_0, \frac{d^k y(0)}{dt^k} = y_0^k, k = 1, \dots, n-1. \quad (2)$$

В работах А. Н. Тихонова уравнения вида (1) получили название уравнений с малым параметром при старшей производной. Впоследствии они стали известны как сингулярно возмущенные уравнения (в практических задачах их называют уравнениями с пограничным слоем).

Характерной особенностью решений задачи (1)–(2) является наличие областей резкого изменения решения в окрестности начальной (или, в случае краевой задачи, граничной) точки. Одним из первых эффект пограничного слоя отметил в своих работах Л. Прандтль, рассматривавший движение вязкой жидкости с малым трением, описываемое уравнениями Навье-Стокса¹. Впоследствии сингулярно возмущенные уравнения нашли множество применений в гидроаэромеханике, химической кинетике, теории каталитических реакций, дифференциальной геометрии, проектировании атомных реакторов и т. д. С середины 70-х гг. XX в. помимо задач с пограничными слоями активно изучаются

задачи с внутренними слоями², получившими в работах А. Б. Васильевой, В. Ф. Бутузова и Н. Н. Нефедова название контрастных структур [2].

Несмотря на широкую область применения, уравнения с пограничным слоем и контрастными структурами остаются для исследователей трудоемкими в использовании. Если функция правой части уравнения (1) является нелинейной, то найти точное аналитическое решение задачи (1)–(2) удается лишь в исключительных случаях. Поэтому приходится использовать численные и приближенно-аналитические (асимптотические) методы решения. Стоит отметить, что явные методы численного решения задачи Коши³ при $\varepsilon \rightarrow 0$ требуют чрезмерного уменьшения шага интегрирования для получения решения высокой точности, что делает их малоэффективными для данного класса задач.

Кроме явных методов, существует большой класс специализированных методов решения жестких задач, к которым относится и задача (1)–(2). Им посвящена монография Э. Хайрера и Г. Ваннера⁴. Однако и специализированные методы чаще всего не позволяют устранить все недостатки, присущие явным методам. Более того, поскольку многие методы решения жестких задач основаны на применении неявных схем, возникает проблема решения нелинейных алгебраических или трансцендентных уравнений и их систем, что сопряжено с построением итерационной последовательности и доказательством ее сходимости из выбранного начального приближения. Все это усложняет вычислительный

¹ Прандтль Л. Теория несущего крыла. Ч. 1. Движение жидкости с очень малым трением. М. : Л. : ГНТИ, 1931. С. 5–11.

² Чанг К., Хауэс Ф. Нелинейные сингулярно возмущенные краевые задачи : теория и приложения. М. : Мир, 1988. 247 с.

³ Хайрер Э., Нерсетт С., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи. М. : Мир, 1990. 512 с.

⁴ Хайрер Э., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи. М. : Мир, 1999. 685 с.



процесс. Также неявные методы могут вызывать затруднения при переходе через внутренние слои.

Другой класс методов заключается в представлении решения задачи (1)–(2) рядом по степеням малого параметра ε . К этим методам относятся алгоритм А. Б. Васильевой⁵⁻⁶ и метод регуляризации, предложенный С. А. Ломовым⁷ [9]. Указанные методы широко известны и востребованы. Однако стоит обратить внимание, что построение асимптотических разложений требует сложных аналитических выкладок. При малых ε , т. е. при $\varepsilon \rightarrow 0$, для достижения необходимой точности достаточно учитывать лишь несколько слагаемых, но, если это условие не выполняется, может понадобиться учет десятков слагаемых. Таким образом, если для сверхжестких задач асимптотические методы дают хороший результат, то для некоторых классов плохо обусловленных задач их применение может вызывать затруднения.

Все это говорит о потребности в новых эффективных методах и подходах, и такие методы разрабатываются. Начиная со второй половины 90-х гг. XX в. в работах Э. И. Григолоука, В. И. Шалашилина, Е. Б. Кузнецова и их учеников развивается метод продолжения решения по наилучшему аргументу⁸, известный также как метод длины дуги. Он состоит в замене исходного аргумента на новый, отсчитываемый по касательной вдоль интегральной кривой рассматриваемой задачи. Доказано, что указанный аргумент доставляет исходной задаче наилучшую обусловленность, поэтому он получил название наилучшего. Применительно к рассматриваемому классу задач новый аргумент позволяет обходить трудности, связанные

с плохой обусловленностью исходной задачи, в том числе уменьшить показатель жесткости. Это дает возможность получить вычислительные преимущества при численном решении. В статье А. А. Белова и Н. Н. Калиткина [3] рассматривается ряд начальных задач с контрастными структурами. Они решаются при помощи преобразования к наилучшему аргументу специальными методами с переменным шагом интегрирования, автоматически изменяемым по кривизне интегральной кривой [4]. В другой их работе полученные результаты дополняются сопоставлением с правилом Рунге – Ромберга – Ричардсона [5]. Однако ни в одной из указанных статей нет сравнения с решением исходных непреобразованных задач, хотя и дается ряд рекомендаций относительно методов их решения.

Целью данной статьи является сравнительный анализ решения тестовой начальной задачи с контрастными структурами традиционными явными и неявными методами разного порядка точности, а также методом продолжения решения по наилучшему аргументу. Важным является аргументированное определение границ применимости традиционных методов к решению задач с контрастными структурами. Полученные в данной работе результаты согласуются с выводами, сделанными в статьях А. А. Белова и Н. Н. Калиткина [3; 5], дополняя их.

Обзор литературы

Теория сингулярно возмущенных уравнений берет начало в работах А. Н. Тихонова [1; 6–7]. В них впервые был рассмотрен общий вид нелинейных уравнений и систем с малым

⁵ Васильева А. Б., Бутузов В. Ф. Асимптотические разложения решений сингулярно возмущенных уравнений. М. : Наука, 1973. 272 с.

⁶ Васильева А. Б., Бутузов В. Ф. Асимптотические методы в теории сингулярных возмущений. М. : Высшая школа, 1990. 208 с.

⁷ Ломов С. А. Введение в общую теорию сингулярных возмущений. М. : Наука, 1981. 400 с.

⁸ Шалашилин В. И., Кузнецов Е. Б. Метод продолжения решения по параметру и наилучшая параметризация в прикладной математике и механике. М. : Эдиториал УРСС, 1999. 224 с.

параметром при старшей производной, дано определение области влияния решения вырожденного уравнения и вырожденной системы, а также доказаны первые общие утверждения о близости решения вырожденного уравнения (системы уравнений) к решению исходной задачи. Полученные результаты были развиты в работах ученицы А. Н. Тихонова А. Б. Васильевой. Совместно с В. Ф. Бутузовым и другими ее учениками и коллегами были получены фундаментальные результаты по представлению решений сингулярно возмущенных задач асимптотическими рядами специальных видов.

Помимо уже упомянутых монографий⁹⁻¹⁰, стоит отметить более поздние работы А. Б. Васильевой и А. А. Плотникова¹¹, а также В. Ф. Бутузова¹². В конце 80-х – начале 90-х гг. XX в., помимо задач с пограничными слоями, в работах А. Б. Васильевой, В. Ф. Бутузова и Н. Н. Нефедова рассмотрены задачи с контрастными структурами (внутренними слоями). основополагающей работой в этом направлении стала статья «Контрастные структуры в сингулярно возмущенных задачах» [2]. Обзор результатов, связанных с решением задач с контрастными структурами, дан в статье «Асимптотическая теория контрастных структур (обзор)» [8].

В последние пять лет новые результаты в области асимптотических методов решения сингулярно возмущенных задач получены во многих работах. Наиболее важные результаты получены представителями школы А. Н. Тихонова и А. Б. Васильевой. В работах В. Ф. Бутузова и соавторов с использованием метода дифференциальных неравенств рассматривается построе-

ние асимптотики для сингулярно возмущенных краевых задач (Дирихле и Неймана) для эллиптических уравнений с внутренними и угловыми пограничными слоями [9–10], а также для первой начальнo-краевой задачи для сингулярно возмущенного параболического уравнения [12]. Кроме того, рассмотрены краевые задачи для обыкновенных дифференциальных уравнений с многозонным внутренним слоем (контрастными структурами типа «всплеск» и «ступенька») и построены асимптотические разложения для них [13]. В указанных работах В. Ф. Бутузова рассматриваются случаи кратных корней вырожденного уравнения. В данном случае классический алгоритм А. Б. Васильевой не применим. Предложена модификация метода построения асимптотических разложений в случае двухкратного и трехкратного корней. К этой тематике можно отнести и статью М. В. Козлова и В. Н. Щенникова, посвященную асимптотической устойчивости вырожденного решения сингулярно возмущенных систем обыкновенных дифференциальных уравнений с однородной правой частью [14].

В работах Н. Н. Нефедова и соавт. рассматривается решение начальнo-краевых задач для уравнения реакции-диффузии-адвекции с контрастными структурами. Доказательство условий существования решения ведется методом дифференциальных неравенств. В статье «Существование и асимптотическая устойчивость периодического решения с внутренним переходным слоем в задаче со слабой линейной адвекцией» рассмотрено уравнение реакции-диффузии-адвекции со слабой адвекцией и реактивным членом

⁹ Васильева А. Б., Бутузов В. Ф. Асимптотические разложения решений сингулярно возмущенных уравнений. М. : Наука, 1973. 272 с.

¹⁰ Васильева А. Б., Бутузов В. Ф. Асимптотические методы в теории сингулярных возмущений. М. : Высшая школа, 1990. 208 с.

¹¹ Васильева А. Б., Плотников А. А. Асимптотическая теория сингулярно возмущенных задач. М. : Физический факультет МГУ, 2008. 398 с.

¹² Бутузов В. Ф. Асимптотические методы в сингулярно возмущенных задачах. Ярославль : Изд-во ЯрГУ, 2014. 140 с.



с кубической нелинейностью, даны достаточные условия существования решения [15]. При наличии большого адвективного слагаемого уравнение реакции-диффузии-адвекции рассмотрено в работе «Асимптотическое приближение решения уравнения реакция-диффузия-адвекция с нелинейным адвективным слагаемым» [16]; исследовано решение вида движущегося фронта. Существование и устойчивость решения краевой задачи для многомерного стационарного уравнения реакции-диффузии-адвекции с контрастными структурами рассмотрено в статье «Существование и устойчивость контрастных структур в многомерных задачах реакция-диффузия-адвекция в случае сбалансированной нелинейности» [17]. В работе «Асимптотика движения фронта в задаче реакция-диффузия-адвекция» [18] для начально-краевой задачи для уравнения реакции-диффузии-адвекции с граничными и внутренними слоями построено асимптотическое разложение решения с движущимся фронтом. Общая схема построения асимптотических разложений для задач с контрастными структурами и исследование их устойчивости дано в статье «Общая схема асимптотического исследования устойчивых контрастных структур» [19].

Стоит отметить, что на сегодняшний день аппарат дифференциальных неравенств играет одну из ведущих ролей при исследовании существования решения сингулярно возмущенных уравнений. Впервые дифференциальные неравенства были предложены в 1919–1920-м гг. С. А. Чаплыгиным¹³ для приближенного интегрирования систем дифференциальных уравнений.

В теории сингулярно возмущенных уравнений дифференциальные неравенства впервые использованы М. Нагумо¹⁴. Кроме указанных работ, значительное место в исследовании решений задач с пограничными и внутренними слоями занимает уже упомянутая монография К. Чанга и Ф. Хауэса¹⁵, в которой изложена основа аппарата дифференциальных неравенств применительно к доказательству существования решений нелинейных сингулярно возмущенных краевых задач, а также рассмотрено множество практических задач математической физики и вычислительной геометрии.

Отметим также вклад в теорию сингулярных возмущений С. А. Ломова и И. С. Ломова, в монографии которых дана математическая теория пограничного слоя для линейных дифференциальных уравнений в одномерном и многомерном случаях для операторов с различными свойствами¹⁶. В уже упомянутой монографии С. А. Ломова помимо линейных дифференциальных уравнений рассмотрены также некоторые классы нелинейных уравнений¹⁷.

В современных иностранных публикациях рассматриваются в основном прикладные задачи с пограничными и внутренними слоями, возникающие в гидродинамике и аэродинамике при моделировании течения вязкой жидкости или турбулентного течения [20–22]. Применительно к сингулярно возмущенным (с одним внутренним слоем) одномерным двухточечным краевым задачам типа реакция-диффузия в работе Д. Кумара [23] предложен численный метод на основе B -сплайнов, а также показана его эффективность

¹³ Чаплыгин С. А. Новый метод приближенного интегрирования дифференциальных уравнений. М. : Л. : Гостехиздат, 1950. 103 с.

¹⁴ Nagumo M. Uber das Verhalten der Integrals von fur $ky'' + f(x, y, y', k) = 0$ fur $k \rightarrow 0$ // Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan. 1939. No. 21. P. 529–534.

¹⁵ Чанг К., Хауэс Ф. Нелинейные сингулярно возмущенные краевые задачи : теория и приложения. М. : Мир, 1988. 247 с.

¹⁶ Ломов С. А., Ломов И. С. Основы математической теории пограничного слоя. М. : Изд-во Москов. ун-та, 2011. 456 с. URL: http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_72182

¹⁷ Ломов С. А. Введение в общую теорию сингулярных возмущений. М. : Наука, 1981. 400 с.

в ряде приложений. В статье китайских ученых [24] также рассматриваются общие подходы к построению асимптотических решений для квазилинейных сингулярно возмущенных систем высокого порядка с контрастными структурами при наличии гетероклинических орбит, соединяющих две точки непрерывности.

Большинство работ по численному решению жестких и плохо обусловленных задач не рассматривают отдельно класс задач с контрастными структурами. Одними из немногих работ, посвященных численному решению начальных задач с контрастными структурами, являются статьи Н. Н. Калиткина и А. А. Белова [3; 5]. В этих работах для решения тестовых задач с контрастными структурами предложено использовать комбинацию метода длины дуги со специальными методами на неравномерных сетках при оценке локальной погрешности по правилу Рунге и кривизне в точке интегральной кривой [4]. Полученные результаты применяются к задачам химической кинетики [25].

Идея метода продолжения решения по параметру используется в математике и механике еще в работах А. Пуанкаре и У. Леверье. По сути, метод замены переменной под знаком интеграла и метод малого параметра являются отражением этой общей идеи. В вычислительных целях метод продолжения решения по параметру был впервые использован в работах бельгийского математика М. Лаэя для построения решений трансцендентных уравнений и систем [26–27]. Позднее в работах советского математика Д. Ф. Давиденко был предложен метод сведения системы нелинейных уравнений к си-

стеме обыкновенных дифференциальных уравнений [28–29]. Однако при построении замкнутых кривых приходится менять параметр продолжения решения в окрестности предельных особых точек. Для решения этой проблемы было предложено использовать параметры продолжения общего вида.

С целью решения нелинейных краевых задач теории упругости в работе И. И. Воровича и В. Ф. Зипаловой был предложен параметр продолжения, отсчитываемый по касательной к кривой множества решений рассматриваемой задачи [30]. В этой же работе впервые показано, что данный параметр продолжения будет в некотором смысле наилучшим для задач, кривые множества решений которых имеют предельные особые точки. Доказательство этого факта было намечено в статье голландского инженера Э. Рикса [31] применительно к исследованию устойчивости прощелкивающихся и выпучивающихся конструкций.

С конца 70-х гг. XX в. началось систематическое исследование применения наилучшего параметра к задачам математики и механики с предельными особыми точками и точками бифуркации. Стоит отметить монографии Э. И. Григолюка и В. И. Шалашилина¹⁸, а также К. Георга и Ю. Л. Аллгауэра¹⁹, подводящие итог полученным результатам. В уже упомянутой монографии В. И. Шалашилина и Е. Б. Кузнецова²⁰ было доказано, что аргумент, отсчитываемый по касательной к кривой множества решений системы нелинейных уравнений, доставляет задаче наилучшую обусловленность, т. е. является наилучшим. Более того, этот результат был обобщен на системы обыкновенных дифференциальных, дифферен-

¹⁸ Григолюк Э. И., Шалашилин В. И. Метод продолжения решения по параметру в нелинейных задачах механики твердого деформируемого тела. М. : Наука, 1988. 232 с.

¹⁹ Allgower E. L., Georg K. Introduction to Numerical Continuation Methods. Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 1990. 388 p.

²⁰ Шалашилин В. И., Кузнецов Е. Б. Метод продолжения решения по параметру и наилучшая параметризация в прикладной математике и механике. М. : Эдиториал УРСС, 1999. 224 с.



циально-алгебраических и функционально-дифференциальных уравнений. В дальнейших работах Е. Б. Кузнецова было рассмотрено обобщение полученных результатов на многомерный случай²¹, а также дан алгоритм прохождения точек бифуркации различной коразмерности с использованием редукции Ляпунова-Шмидта²². Один из последних результатов связан с развитием нового подхода – метода продолжения решения по модифицированному наилучшему аргументу, отсчитываемому в направлении, близком к касательному, для систем обыкновенных дифференциальных уравнений [32–33]. Кроме применения продолжения решения по наилучшему параметру к решению жестких задач в статьях Н. Н. Калиткина и соавторов, данный подход успешно использовался А. А. Семеновым при исследовании устойчивости панелей конических оболочек из ортотропных материалов при деформировании [34], а также иностранными исследователями – при решении гиперболических систем с предельными особыми точками и физически нелинейных задач [35–36], и т. д. Специальные виды параметров продолжения используют в своих работах Е. А. Лопаницын при расчете тонких пологих оболочек с учетом конечных прогибов²³ и С. С. Гаврюшин – при расчете напряжений и деформаций сложных стержневых и оболочечных элементов конструкций²⁴.

Материалы и методы

Приведем основные численные методы решения задач с контрастными структурами, используемые в статье. Известно, что любое обыкновен-

ное дифференциальное уравнение n -го порядка можно свести к системе n обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. Поэтому сформулируем методы решения для системы дифференциальных уравнений вида

$$\frac{dy_i}{dt} = f_i(t, y_1, y_2, \dots, y_n), \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

с начальными условиями

$$y_i(0) = y_{i,0}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (4)$$

где $f_i(t, y_1, y_2, \dots, y_n)$ – заданные функции.

Явный метод Эйлера

Одним из наиболее простых методов численного решения задачи Коши является явный метод Эйлера, схема которого на k -ом шаге имеет вид²⁵:

$$\begin{aligned} y_{i,k+1} &= y_{i,k} + h \cdot f_i(t_k, y_{1,k}, y_{2,k}, \dots, y_{n,k}), \\ t_{k+1} &= t_k + h, \quad i = 1, \dots, n, \end{aligned} \quad (5)$$

где h – шаг интегрирования по аргументу t .

Таким образом, решение задачи (3)–(4) на каждом шаге сводится к вычислению рекуррентных соотношений (5).

Явный метод Рунге – Кутты четвертого порядка точности

Несмотря на свою простоту, при необходимости высокой точности решения явный метод Эйлера даже для простых нежестких задач может требовать значительного уменьшения шага интегрирования, что приводит к уве-

²¹ Кузнецов Е. Б. Некоторые приложения метода продолжения решения по наилучшему параметру. М. : Изд-во МАИ, 2013. 160 с.

²² Кузнецов Е. Б. Параметризация краевых задач и прохождение точек бифуркации. М. : Изд-во МАИ, 2016. 160 с.

²³ Григолюк Э. И., Лопаницын Е. А. Конечные прогибы, устойчивость и закритическое поведение тонких пологих оболочек. М. : Изд-во МАМИ, 2004. 162 с.

²⁴ Гаврюшин С. С., Барышникова О. О., Борискин О. Ф. Численный анализ элементов конструкций машин и приборов. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 479 с.

²⁵ Хайрер Э., Нерсетт С., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи. М. : Мир, 1990. 512 с.

личению вычислительных затрат. Для устранения этого недостатка можно использовать методы более высокого порядка точности. Наиболее часто применяется метод Рунге – Кутты четвертого порядка точности, схема которого записывается в виде²⁶:

$$y_{i,k+1} = y_{i,k} + \frac{h}{6} \cdot (K1_{i,k} + 2K2_{i,k} + 2K3_{i,k} + K4_{i,k}),$$

где

$$\begin{aligned} t_{k+1} &= t_k + h, \\ K1_{i,k} &= f_i(t_k, y_{1,k}, \dots, y_{n,k}), \\ K2_{i,k} &= f_i\left(t_k + \frac{h}{2}, y_{1,k} + \frac{h}{2} \cdot K1_{i,k}, \dots, y_{n,k} + \frac{h}{2} \cdot K1_{i,k}\right), \\ K3_{i,k} &= f_i\left(t_k + \frac{h}{2}, y_{1,k} + \frac{h}{2} \cdot K2_{i,k}, \dots, y_{n,k} + \frac{h}{2} \cdot K2_{i,k}\right), \\ K4_{i,k} &= f_i(t_k + h, y_{1,k} + h \cdot K3_{i,k}, \dots, y_{n,k} + h \cdot K3_{i,k}). \end{aligned}$$

Переменный шаг интегрирования и метод Рунге-Ромберга-Ричардсона

На практике показано, что постоянный шаг интегрирования целесообразно использовать только для не жестких задач. В случае, когда задача (3)–(4) является плохо обусловленной или жесткой, более эффективным становится применение переменного шага интегрирования. Существует множество методов построения неравномерных сеток, некоторые из которых приведены в работах Н. Н. Калиткина и соавт.²⁷, О. Б. Арушаняна и С. Ф. Залеткина²⁸. Традиционно для смены шага используется правило Рунге, известное также как метод Рунге-Ромберга-Ричардсона.

Согласно правилу Рунге, локальную погрешность численного решения задачи (3)–(4) на k -ом шаге, вычи-

сленного с шагом h , можно записать в виде²⁹:

$$\Delta_i = \rho_k^h + O(h^{p+2}),$$

где выражение ρ_k^h – главная часть локальной погрешности, вычисляемая по формуле

$$\rho_k^h = \frac{y_k^{2h} - y_k^h}{2^p - 1}. \quad (6)$$

Здесь $y_k = (y_{1,k}, \dots, y_{n,k})^T$, $\|\cdot\|_2$ – квадратичная (евклидова) норма вектора, p – порядок точности численного метода, верхними индексами h и $2h$ обозначены используемые шаги интегрирования.

Используя значение (6) как оценку локальной погрешности, можно реализовать процедуру смены шага. Задавая точность численного решения ε_1 , при $\rho_k^h > \varepsilon_1$ шаг следует уменьшить вдвое. Процедура уменьшения шага повторяется до момента, когда $\rho_k^h < \varepsilon_1$. Если значение $\rho_k^h < \varepsilon_1 / 2^p$, то шаг увеличивается вдвое.

Неявный метод Эйлера

Для некоторых классов жестких и плохо обусловленных начальных задач даже методы с переменным шагом интегрирования могут оказаться малоэффективными. Это относится, например, к задачам Коши для уравнений с предельными особыми точками, в которых правая часть теряет смысл, или контрастными структурами. При прохождении предельных особых точек или внутренних слоев большинство явных методов теряют устойчивость, т. е. погрешность решения начинает неограниченно расти. Для предотвращения роста погрешности целесообразно использовать неявные методы. Используемый в статье неявный метод Эйлера

²⁶ Там же.

²⁷ Вычисления на квазиравномерных сетках : монография / Н. Н. Калиткин [и др.]. М. : Физматлит, 2005. 224 с.

²⁸ Арушанян О. Б., Залеткин С. Ф. Численное решение обыкновенных дифференциальных уравнений на Фортране. М. : Изд-во МГУ, 1990. 336 с.



не только является одним из наиболее простых методов данного класса, но и обладает значительной устойчивостью³⁰. Его схема имеет вид³¹:

$$y_{i,k+1} = y_{i,k} + h \cdot f_i(t_{k+1}, y_{1,k+1}, y_{2,k+1}, \dots, y_{n,k+1}),$$

$$t_{k+1} = t_k + h, \quad i=1, \dots, n. \quad (7)$$

Решение задачи (3)–(4) находится на каждом шаге из системы нелинейных уравнений (7). Система уравнений в работе решается двумя методами: простых итераций и Ньютона³².

Структура системы (7) делает удобным в использовании метод простых итераций, который сводится на каждом шаге к итерационному процессу

$$y_{i,k+1}^{(j+1)} = y_{i,k} + h \cdot f_i(t_{k+1}, y_{1,k+1}^{(j)}, \dots, y_{n,k+1}^{(j)}) =$$

$$= \varphi_i(y_{1,k+1}^{(j)}, \dots, y_{n,k+1}^{(j)}).$$

Здесь $j = 0, \dots, j_k$; j_k – количество итераций на k -ом шаге.

Несмотря на кажущуюся простоту, известно, что условие сходимости метода простых итераций накладывает значительные ограничения на шаг интегрирования, а также его скорость сходимости – линейная. Все указанные недостатки можно устранить, применяя более сложный метод Ньютона.

Записывая систему (7) в виде

$$\Phi_i(y_{1,k+1}, \dots, y_{n,k+1}) =$$

$$= y_{i,k+1} - y_{i,k} -$$

$$- h \cdot f_i(t_{k+1}, y_{1,k+1}, \dots, y_{n,k+1}) = 0 \quad (8)$$

и вводя обозначение

$$\Phi = (\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n)^T,$$

запишем итерационный процесс по методу Ньютона в виде

$$y_k^{(j+1)} = y_k^{(j)} - J^{-1} \Big|_{y=y_k^{(j)}} \cdot \Phi \Big|_{y=y_k^{(j)}},$$

где $y_k^{(j)}$ – решение задачи (3)–(4) на k -ом шаге и j -ой итерации; J – матрица Якоби системы (8).

Замечание 1

Важной задачей при использовании итерационных методов решения нелинейных уравнений и систем является выбор начального приближения. Для задачи (3)–(4) начальное приближение приходится выбирать на каждом шаге численного метода. Если на k -ом шаге получено решение $y_k^{(j_k)}$ и оно не обращает уравнения системы в бесконечность, то можно рекомендовать выбор начального приближения для $k+1$ -го шага в форме

$$y_{k+1}^{(0)} = y_k^{(j_k)}.$$

В противном случае начальное приближение можно выбрать в виде

$$y_{k+1}^{(0)} = y_k^{(j_k)} + \delta,$$

где δ – вектор, компоненты которого выбираются из условий сходимости метода.

Замечание 2

Для задачи (3)–(4) сходимость итерационного процесса зависит от величины шага интегрирования h . Условия сходимости методов простых итераций и Ньютона накладывают ограничения на выбор h . При этом использование правила Рунге в большинстве случаев позволяет получить значения шага интегрирования, удовлетворяющие условиям сходимости. Лишь в окрестностях предельных особых точек и внутренних слоев необходимо дополнительно уменьшать шаг интегрирования.

Нашлучшая параметризация

Неявные методы позволяют найти решения жестких и плохо обусловлен-

²⁹ Там же.

³⁰ Деккер К., Вервер Я. Устойчивость методов Рунге-Кутты для жестких нелинейных дифференциальных уравнений. М.: Мир, 1988. 334 с.

³¹ Хайрер Э., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи. М.: Мир, 1999. 685 с.

ных задач Коши, но не могут сравниться по быстродействию с явными методами, т. к. на каждом шаге неявного метода приходится решать систему нелинейных уравнений. Этот недостаток удается устранить при помощи метода продолжения решения³³, который заключается в замене исходного аргумента задачи Коши на новый. Можно выбирать различные аргументы продолжения решения, но наиболее часто используют наилучший аргумент. Данный аргумент отсчитывается по касательной к интегральной кривой рассматриваемой задачи и обладает рядом исключительных свойств. Для задачи (3)–(4) наилучший аргумент λ записывается в скалярной форме:

$$d\lambda^2 = dy_1^2 + \dots + dy_n^2 + dt^2. \quad (9)$$

Будем полагать, что все переменные y_1, y_2, \dots, y_n и аргумент t зависят от λ . Дополняя систему (3) соотношением (9) и разрешая полученную систему относительно производных по λ , получим преобразованную систему

$$\begin{aligned} \frac{dy_i}{d\lambda} &= \frac{f_i(t, y_1, \dots, y_n)}{Q(t, y_1, \dots, y_n)}, \\ \frac{dt}{d\lambda} &= \frac{1}{Q(t, y_1, \dots, y_n)}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$i = 1, \dots, n,$$

где

$$Q(t, y_1, \dots, y_n) = \sqrt{1 + f_1^2(t, y_1, \dots, y_n) + \dots + f_n^2(t, y_1, \dots, y_n)}.$$

Начальные условия (4) для системы (10) переписутся в виде

$$y_i(0) = y_{i,0}, \quad t(0) = 0, \quad i = 1, \dots, n. \quad (11)$$

Задача (10)–(11) обладает рядом важных для численного решения свойств³⁴:

1. Квадратичная норма правой части системы (10) равна единице, т. е. устраняются все вычислительные трудности, связанные с неограниченным возрастанием правых частей системы (3).

2. Обусловленность системы (10) является наилучшей.

3. Показатель жесткости преобразованной системы (10) меньше, чем у исходной.

Все отмеченные свойства дают возможность решать преобразованную задачу (10)–(11) любыми численными методами, в том числе и явными.

Далее рассмотрим применение указанных методов к решению задачи Коши для систем дифференциальных уравнений с контрастными структурами.

Результаты исследования

В статье А. А. Белова и Н. Н. Калиткина [3] для проверки эффективности численных методов при решении задач с контрастными структурами предложен ряд тестовых задач. Проанализируем решение одной из этих задач, называемой степенным тестом.

Постановка задачи

Рассмотрим начальную задачу для уравнения следующего вида [3]:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{\xi(t)(u^2 - a^2)^2}{(u^2 + a^2)} \quad (12)$$

с начальным условием

$$u(0) = 0. \quad (13)$$

При $\xi(t) = \xi_0 \cdot \cos t$ решение задачи (12)–(13) имеет вид:

$$u(t) = -\frac{2\Xi(t)a^2}{1 + \sqrt{1 + 4a^2\Xi^2(t)}}, \quad (14)$$

где $\Xi(t) = \xi_0 \sin t$.

³² Калиткин Н. Н. Численные методы. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 592 с.

³³ Шалашилин В. И., Кузнецов Е. Б. Метод продолжения решения по параметру и наилучшая параметризация в прикладной математике и механике. М.: Эдиториал УРСС, 1999. 224 с.



В дальнейших расчетах $a = \pi$. Жесткость задачи характеризуется множителем ξ_0 при периодической функции. Условно по значению параметра ξ_0 можно разбить задачу вида (12)–(13) на следующие классы [5]: при малых значениях ξ_0 (порядка нескольких единиц) задача является нежесткой, при $\xi_0 \geq 10$ – жесткой и при $\xi_0 \geq 1000$ – сверхжесткой. Это определяется видом правой части: при приближении значения косинуса к нулю скорость изменения решения, даже при большом параметре ξ_0 , стремится к нулю, а при стремлении значения косинуса к единице значение правой части становится наибольшим. Таким образом, происходит смена плавно меняющихся компонент решения с быстро меняющимися переходными зонами, которые тем короче, чем больше значение ξ_0 . Данные особенности видны на рис. 1.

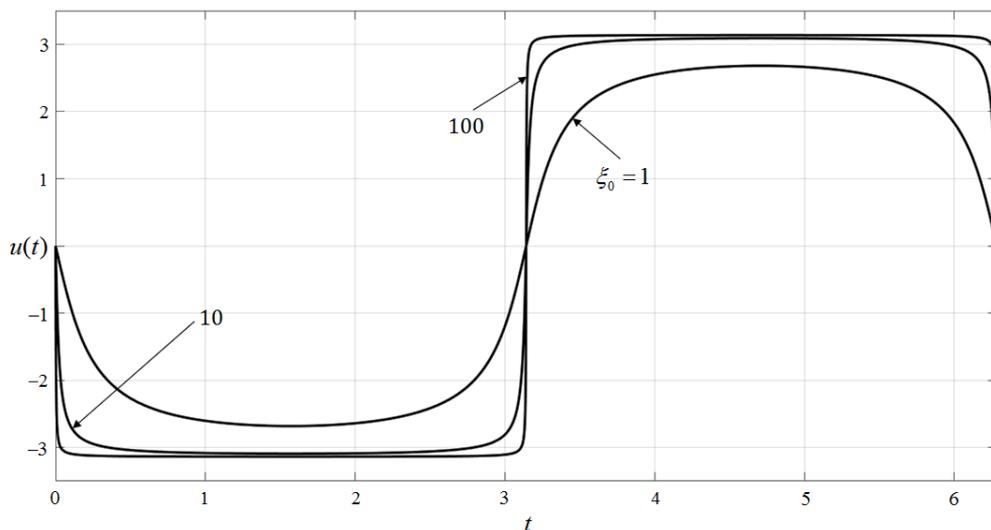
Явные методы решения

Результаты решения задачи явным методом Эйлера и явным методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности с постоянным шагом, схемы которых

даны выше, представлены на рис. 1 и в табл. 1.

На рис. 1 изображены кривые, соответствующие решениям задачи (12)–(13) для значений $\xi_0 = 1; 10; 100$, полученные методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности с постоянным шагом $h = 0,001$. Полученные численные решения визуально совпадают с аналитическими. Для явного метода Эйлера кривые аналогичны изображенным на рис. 1.

В табл. 1 приведены данные о средней погрешности ε , вычисленной с использованием аналитического решения (14), и времени счета t_c решений задачи (12)–(13), полученных явными методами с постоянным шагом интегрирования. Из нее видно, что метод Рунге-Кутты четвертого порядка выигрывает у явного метода Эйлера в точности, хотя и требует большего времени счета. Стоит также отметить, что при повышении значения параметра ξ_0 невозможно получить решение при малых шагах интегрирования. Так, для $\xi_0 = 10$ невозможно получить решение при



Р и с. 1. Численное решение задачи (12)–(13) при $\xi_0 = 1; 10; 100$, метод Рунге-Кутты четвертого порядка с постоянным шагом $h = 10^{-3}$

F i g. 1. Numeric solution of problem (12)–(13) for $\xi_0 = 1; 10; 100$, fourth order Runge-Kutta method with constant step size $h = 10^{-3}$

**Погрешность решения и время счета для задачи (12)–(13),
явные методы с постоянным шагом**
**Computational error and computational time for problem (12)–(13),
explicit methods with constant step size**

Параметры / Parameters		Явный метод Эйлера / Explicit Euler method		Метод Рунге-Кутты четвертого порядка / Fourth order Runge-Kutta method	
ξ_0	h	ε	t_c , с	ε	t_c , с
1	0,1	0,4548	0,009	$2,1332 \cdot 10^{-4}$	0,0081
	0,01	0,0361	0,0095	$2,2776 \cdot 10^{-8}$	0,0656
	0,001	0,0035	0,0255	$2,1461 \cdot 10^{-12}$	0,1732
10	0,1	–	–	–	–
	0,01	0,0826	0,0109	$2,3893 \cdot 10^{-5}$	0,0168
	0,001	0,008	0,0301	$2,5136 \cdot 10^{-9}$	0,0759
100	0,1	–	–	–	–
	0,01	–	–	–	–
	0,001	0,0127	0,0381	$2,4843 \cdot 10^{-6}$	0,1011

$h = 0,1$, а при $\xi_0 = 1\,000$ нельзя получить решение при $h \geq 10^{-3}$.

Здесь и далее расчет проведен на персональном компьютере с процессором DualCore Intel Core i5-660 3477 MHz, оперативной памятью 2,00 ГБ DDR3 SDRAM Kingston «ValueRAM» KVR1333D3N9/2G (2 шт.), видеокартой ATI Radeon HD 5770 (Juniper) 1,00 ГБ и 64-разрядной операционной системой Windows 10. Используемые методы реализованы в вычислительной среде Matlab R2012b.

Замечание 3

В рассматриваемом диапазоне шагов интегрирования не удалось получить решение задачи (12)–(13) для $\xi_0 \geq 1\,000$.

Анализируя полученные результаты, отметим, что для решения задачи с фиксированным ξ_0 шаг интегрирования h не может превышать величину $1/\xi_0$. Это говорит о малоэффективности применения явных методов для решения сверхжестких задач при больших значениях ξ_0 .

Неявный метод Эйлера

Явные методы с постоянным шагом интегрирования позволяют получить ре-

шение задачи (12)–(13) только при умеренных значениях ξ_0 . Уже при $\xi_0 = 10^3$ в рассматриваемом диапазоне шагов интегрирования не удается найти решение. Можно ожидать, что неявные методы за счет расширения области устойчивости позволят получить решение при больших шагах интегрирования.

Используем неявный метод Эйлера. На k -ом шаге решение задачи (12)–(13) неявным методом Эйлера находится как решение нелинейного уравнения вида:

$$u_{k+1} = u_k - h \cdot \frac{\xi_0 \cos(t_{k+1}) \left((u_{k+1})^2 - a^2 \right)^2}{(u_{k+1})^2 + a^2}. \quad (15)$$

Уравнение (15) решается методом простых итераций и методом Ньютона. Итерационный процесс метода простых итераций задается соотношением:

$$u_{k+1}^{(j+1)} = u_k - h \cdot \frac{\xi_0 \cos(t_{k+1}) \left((u_{k+1}^{(j)})^2 - a^2 \right)^2}{(u_{k+1}^{(j)})^2 + a^2},$$



а для метода Ньютона –

$$u_{k+1}^{(j+1)} = u_{k+1}^{(j)} - \frac{F(t_{k+1}, u_{k+1}^{(j)})}{F'_u(t_{k+1}, u_{k+1}^{(j)})}. \quad (16)$$

В формуле (16)

$$F(t, u) = u - u_k + h \cdot \frac{\xi_0 \cos t (u^2 - a^2)^2}{u^2 + a^2},$$

$$F'_u(t, u) = 1 - h \cdot \frac{2\xi_0 \cos t (u^2 - a^2) u (u^2 + 3a^2)}{(u^2 + a^2)^2},$$

где $F'_u(t, u) = \frac{dF(t, u)}{du}$.

Кривые, полученные при решении задачи (12)–(13) неявным методом Эйлера, имеют вид, аналогичный представленному на рис. 1. В табл. 2 даны значения средней погрешности ε и времени счета t_c решений задачи (12)–(13), полученные неявным методом Эйлера с постоянным шагом интегрирования

при использовании метода простых итераций и Ньютона.

Расчеты показывают, что по сравнению с явным методом Эйлера неявный метод Эйлера позволяет получить результаты с меньшей погрешностью. Однако время счета в связи с усложнением вычислительного процесса как для метода простых итераций, так и метода Ньютона, может увеличиваться на порядок и более. При малой жесткости метод Ньютона позволяет быстрее получить решение задачи по сравнению с методом простых итераций, но с повышением жесткости уступает ему как в точности, так и в быстродействии. Это можно связать и с особенностями реализации метода Ньютона (в частности, с выбором начального приближения на каждом шаге) и с затруднением при переходе через внутренний слой для неявного метода Эйлера. Таким образом, используемый неявный метод не позволяет значительно улучшить результаты явных методов, затрачивая

Таблица 2

Table 2

Погрешность решения и время счета для задачи (12)–(13), неявный метод Эйлера с постоянным шагом
Computational error and computational time for problem (12)–(13), implicit Euler method with constant step size

Параметры / Parameters		Неявный метод Эйлера / Implicit Euler method			
		Метод простой итерации / Fixed-point iteration method		Метод Ньютона / The Newton's method	
ξ_0	h	ε	t_c, c	ε	t_c, c
1	0,1	0,3137	0,0662	0,3138	0,0255
	0,01	0,034	0,1774	0,0345	0,1457
	0,001	$8,6629 \cdot 10^{-4}$	1,188	0,0035	0,6134
10	0,1	–	–	–	–
	0,01	0,074	0,1864	0,0787	0,0878
	0,001	0,0029	1,1653	0,008	0,7302
100	0,1	–	–	–	–
	0,01	–	–	–	–
	0,001	0,0078	0,9977	0,0126	1,5954

при этом большее время счета. Для повышения точности можно, как и в статье А. А. Белова и Н. Н. Калиткина «Численные методы решения задач Коши с контрастными структурами» [5], рекомендовать использование более сложных методов, например, неявных обратных схем Рунге-Кутты [37] или явно-неявных комплексных схем Розенброка [38].

Наилучшая параметризация

Из приведенных выше расчетных данных видно, что ни явные методы, ни неявный метод Эйлера не позволяют получить решение задачи (12)–(13) без значительных вычислительных затруднений. Применим к этой задаче метод продолжения решения по наилучшему аргументу³⁵, описанный выше.

Наилучший аргумент λ для рассматриваемой задачи запишется в скалярном виде:

$$d\lambda^2 = du^2 + dt^2. \quad (17)$$

Преобразуя к аргументу (17) систему (12), получим:

$$\begin{cases} \frac{du}{d\lambda} = \frac{-\xi(t)(u^2 - a^2)^2}{\sqrt{(u^2 + a^2)^2 + \xi^2(t)(u^2 - a^2)^4}}, \\ \frac{dt}{d\lambda} = \frac{(u^2 + a^2)}{\sqrt{(u^2 + a^2)^2 + \xi^2(t)(u^2 - a^2)^4}}. \end{cases} \quad (18)$$

Начальные условия (13) для системы (18) примут вид:

$$u(0) = 0, \quad t(0) = 0. \quad (19)$$

Как отмечалось выше, преобразованная задача (18)–(19) обладает рядом преимуществ при численном решении. В табл. 3 приведены результаты расчета преобразованной задачи (18)–(19) методом Рунге-Кутты четвертого по-

рядка точности с постоянным шагом (качественно для метода Эйлера результаты аналогичны), где l – шаг по аргументу λ . Кривые, полученные при численном решении, аналогичны приведенным на рис. 1. Для сравнения в табл. 3 приведены результаты решения исходной задачи (12)–(13) с шагом, подбираемым из условия равенства порядков средней ошибки решения исходной и преобразованной задач.

Видно, что для непреобразованной задачи (12)–(13) для достижения того же порядка ошибки приходится брать шаг до нескольких порядков меньше по сравнению с преобразованной. При этом, несмотря на то, что интервал изменения значений аргумента λ больше, чем у аргумента t , для задачи (18)–(19) удается сократить время счета от 0,4 (при $\xi_0 = 1$) до 10 раз (при $\xi_0 = 1000$).

В табл. 4 приведены результаты расчета задач (12)–(13) и (18)–(19) методом Рунге-Кутты четвертого порядка с переменным шагом. Процедура изменения шага описана выше. Для преобразованной задачи (18)–(19) параметр точности для правила Рунге $\theta = 10^{-12}$. Для исходной задачи (12)–(13) параметр θ выбирался из условия равенства порядков средней погрешности для обеих задач.

Результаты показывают, что и при переменном шаге интегрирования использование наилучшего аргумента λ позволяет получить вычислительные преимущества: удается сократить время счета минимум в два раза. Для сверхжестких задач уменьшение времени счета может достигать нескольких порядков. Отметим также, что, в отличие от преобразованной задачи, решение исходной задачи зависит от начального шага; в особенности это характерно для больших значений ξ_0 .

Однако стоит указать и на ряд недостатков наилучшей параметризации. Преобразованная задача (18)–(19)

³⁴ Там же.



**Средняя ошибка и время счета задач (12)–(13) и (18)–(19),
метод Рунге-Кутты четвертого порядка с постоянным шагом**
**Computational error and computational time for problems (12)–(13) and (18)–(19),
fourth order Runge-Kutta method with constant step size**

ξ_0	Параметризованная задача / Parameterized problem			Непараметризованная задача / Nonparametrized problem		
	l	ε	t_c, c	h	ε	t_c, c
1	0,1	$5,4369 \cdot 10^{-7}$	0,0213	0,02	$3,6307 \cdot 10^{-7}$	0,0418
	0,01	$2,9799 \cdot 10^{-11}$	0,183	0,002	$3,6427 \cdot 10^{-11}$	0,2405
	0,001	$5,0522 \cdot 10^{-14}$	0,5505	0,0002	$6,4592 \cdot 10^{-13}$	2,0987
10	0,1	$2,4647 \cdot 10^{-4}$	0,0236	0,02	$3,0375 \cdot 10^{-4}$	0,0422
	0,01	$3,2723 \cdot 10^{-9}$	0,0969	0,001	$2,5136 \cdot 10^{-9}$	0,4414
	0,001	$3,7533 \cdot 10^{-12}$	0,5886	$2 \cdot 10^{-4}$	$3,662 \cdot 10^{-12}$	2,2979
100	0,1	0,3525	0,0289	0,004	0,0012	0,1303
	0,01	$4,834 \cdot 10^{-6}$	0,1178	0,001	$2,4843 \cdot 10^{-6}$	0,4484
	0,001	$5,0063 \cdot 10^{-11}$	0,5289	$5 \cdot 10^{-5}$	$1,7076 \cdot 10^{-11}$	8,2501
1000	0,1	–	–	–	–	–
	0,01	0,0047	0,2086	$4,7 \cdot 10^{-4}$	0,0012	0,9134
	0,001	$4,0885 \cdot 10^{-8}$	0,5288	$7 \cdot 10^{-5}$	$5,9638 \cdot 10^{-8}$	5,9466

**Средняя ошибка и время счета задач (12)–(13) и (18)–(19),
метод Рунге-Кутты четвертого порядка с переменным шагом**
**Computational error and computational time for problems (12)–(13) and (18)–(19),
fourth order Runge-Kutta method with variable step size**

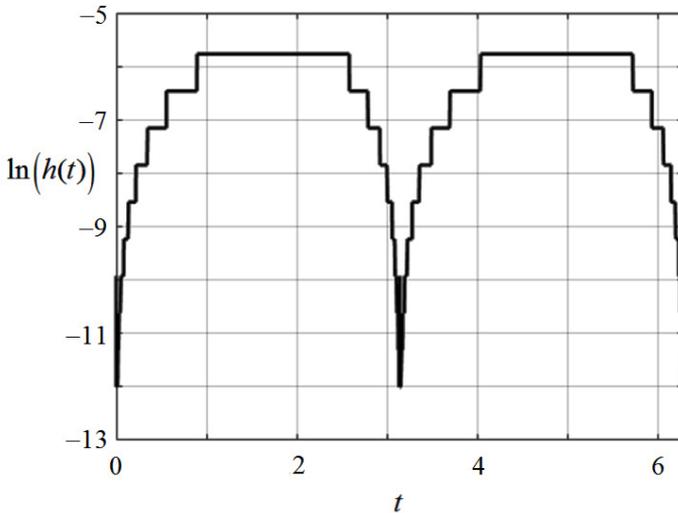
Параметры / Parameters		Параметризованная задача / Parameterized problem			Непараметризованная задача / Nonparametrized problem		
ξ_0	h_0 / l_0	θ	ε	t_c, c	θ	ε	t_c, c
1	0,1	10^{-12}	$1,1561 \cdot 10^{-10}$	0,2388	10^{-10}	$2,1774 \cdot 10^{-10}$	0,4892
	0,01	10^{-12}	$1,6079 \cdot 10^{-10}$	0,2592	$3 \cdot 10^{-10}$	$1,1338 \cdot 10^{-10}$	0,571
	0,001	10^{-12}	$1,7008 \cdot 10^{-10}$	0,1889	10^{-10}	$2,1458 \cdot 10^{-12}$	1,3038
10	0,1	10^{-12}	$2,365 \cdot 10^{-9}$	0,2065	10^{-7}	$1,5164 \cdot 10^{-9}$	1,6533
	0,01	10^{-12}	$2,2218 \cdot 10^{-9}$	0,2812	$4 \cdot 10^{-8}$	$1,1642 \cdot 10^{-9}$	2,025
	0,001	10^{-12}	$1,6625 \cdot 10^{-9}$	0,2691	10^{-7}	$2,5134 \cdot 10^{-9}$	1,3089
100	0,1	10^{-12}	$3,497 \cdot 10^{-8}$	0,2982	10^{-4}	$5,8346 \cdot 10^{-8}$	3,2128
	0,01	10^{-12}	$3,1933 \cdot 10^{-8}$	0,3346	10^{-5}	$2,3953 \cdot 10^{-8}$	4,0536
	0,001	10^{-12}	$3,0792 \cdot 10^{-8}$	0,3015	$3 \cdot 10^{-5}$	$2,3106 \cdot 10^{-8}$	4,7691
1000	0,1	10^{-12}	$4,2953 \cdot 10^{-7}$	0,2729	–	–	–
	0,01	10^{-12}	$3,2001 \cdot 10^{-7}$	0,2318	10^{-3}	$9,1802 \cdot 10^{-8}$	15,794
	0,001	10^{-12}	$8,7845 \cdot 10^{-7}$	0,1772	10^{-2}	$6,4254 \cdot 10^{-7}$	9,8967

имеет более сложный вид и большую размерность по сравнению с исходной (12)–(13). Для рассматриваемой задачи это несущественно, но при решении задач большой размерности преимуществами, даваемые наилучшей параметризацией, могут перекрываться сложностью преобразованной задачи.

Еще одним недостатком является заниженная оценка погрешности по правилу Рунге для преобразованной задачи. Уже при $\xi_0 = 1$ оценка погрешности на два порядка ниже, чем реальная средняя погрешность. Для сверхжестких задач разница возрастает до пяти порядков. Диаметрально противоположная ситуация характерна для исходной задачи. Здесь правило Рунге дает завышенную оценку погрешности начиная с $\xi_0 = 10$. Если посмотреть на характер изменения шага интегрирования, изображенный на рис. 2 в полулогарифмических координатах, то видно, что уже при значении $\xi_0 = 30$ значение шага интегрирования не поднимается выше 10^{-5} , снижаясь до 10^{-12} в окрестности пограничных и внутреннего слоев. При этом значение шага изме-

няется плавно, т. е. после прохождения внутреннего слоя шаг начинает плавно возрастать до максимального значения, а при подходе к внутреннему слою – плавно убывать до минимума (при этом ширина переходного слоя уменьшается при увеличении ξ_0). Данный механизм изменения шага интегрирования и приводит к уменьшению погрешности решения на горизонтальных участках до значений меньших, чем задаваемая точность θ .

Для преобразованной задачи кривая решения в зависимости от аргумента λ изменяется более плавно, как это отмечено в статьях А. А. Белова и Н. Н. Калиткина [3; 5]. По этой причине такого же падения погрешности не происходит; наоборот, в узловых точках, соответствующих внутренним слоям, концентрируется максимальная погрешность. В заключение отметим, что, исходя из характера изменения шага интегрирования, можно объяснить и увеличение времени счета для исходной задачи. Помимо усложнения процесса решения, связанного со сменой шага, уже при относительно малом значении $\xi_0 = 30$ шаг



Р и с. 2. Шаг интегрирования в полулогарифмических координатах для задачи (12)–(13) при $\xi_0 = 30$, метод Рунге-Кутты четвертого порядка, $\theta = 10^{-4}$

F i g. 2. Step size in semilogarithmic coordinates for problem (12)–(13), $\xi_0 = 30$, fourth order Runge-Kutta method, $\theta = 10^{-4}$



интегрирования не поднимается выше 10^{-5} , при повышении же значения ξ_0 шаг интегрирования будет уменьшаться еще сильнее, а вместе с этим будет возрастать время счета.

Замечание 4

В отличие от непреобразованной задачи (12)–(13), переход к наилучшему аргументу позволяет получить хорошие результаты при параметре жесткости ξ_0 большем, чем рассмотренные в табл. 3 и табл. 4. При задаваемой точности $\theta = 10^{-12}$ и начальном шаге $h = 0,001$ удается построить решение вплоть до $\xi_0 = 10^6$.

Замечание 5

Использование неявного метода Эйлера с переменным шагом не позволило получить результаты значительно лучшие, чем приведенные в табл. 2. Получить решение со средней погрешностью ε порядка 10^{-2} удастся, но время счета по сравнению с результатами табл. 2 возрастает до 10 раз при $\xi_0 \leq 100$. При большей точности ($\varepsilon \leq 10^{-3}$) или большей жесткости ($\xi_0 \geq 1000$) результаты либо не удавалось получить, либо время счета составляло до 1 000 с.

Обсуждение и заключение

В статье рассмотрено применение традиционных явных и неявных методов решения задачи Коши с контрастными структурами. Получены численные решения задачи (12)–(13) с постоянным и переменным шагом, изменяемым по правилу Рунге. Анализируя результаты, приведенные на рис. 1 и в табл. 1–2, отметим следующее.

1. Все полученные расчетные данные хорошо согласуются как с аналитическим решением, так и с результатами, полученными А. А. Беловым и Н. Н. Калиткиным [3; 5].

2. При малых значениях параметра жесткости ξ_0 явные методы с постоянным шагом позволяют получить решение с приемлемой погрешностью, но при больших ξ_0 явные методы становятся малоэффективными, т. к. при фиксированном ξ_0 шаг интегрирования

h не может превосходить значения $1/\xi_0$. Уже при $\xi_0 \geq 1\,000$ решение в рассматриваемом диапазоне шагов интегрирования построить не удалось.

3. Используемый в статье неявный метод Эйлера дает возможность уменьшить погрешность полученного решения для малых ξ_0 , но не позволяет построить решение при $\xi_0 \geq 1\,000$. При этом, в силу особенностей реализации, время счета для неявного метода Эйлера значительно превышает аналогичные значения для явных методов.

4. Метод Ньютона, используемый при решении нелинейных уравнений в неявном методе Эйлера, при малых ξ_0 позволяет сократить время счета по сравнению с методом простых итераций, но уступает ему в точности.

5. Неявный метод Эйлера вызывает значительные затруднения при переходе через внутренний слой, что сказывается на быстродействии и точности.

Для устранения отмеченных недостатков исходная задача (12)–(13) преобразуется к наилучшему аргументу λ . Преобразованная задача (18)–(19) обладает рядом вычислительных преимуществ (см. табл. 3–4).

1. При решении задачи (18)–(19) с постоянным шагом удается получить большую точность. При этом для исходной задачи, в зависимости от значения ξ_0 , аналогичные результаты можно получить с меньшим (от нескольких раз до нескольких порядков) шагом. Время счета для преобразованной задачи меньше от 0,4 (при $\xi_0 = 1$) до 10 раз (при $\xi_0 = 1\,000$).

2. При использовании переменного шага интегрирования задача (18)–(19) также выигрывает в быстродействии. Переход к аргументу λ позволяет при одинаковых значениях средней погрешности сократить время счета от двух раз для малых значений ξ_0 до нескольких порядков при $\xi_0 = 1\,000$. Более того, в отличие от исходной, преобразованную задачу можно решать вплоть до значений $\xi_0 = 10^6$.

3. Для преобразованной задачи (18)–(19) процедура смены шага слабо зависит от начального шага l_0 , в то время как для исходной задачи решение существенно зависит от выбора начального шага h_0 .

Помимо значительных преимуществ задача (18)–(19) имеет и ряд недостатков.

1. Правило Рунге для преобразованной задачи дает заниженную оценку локальной погрешности. Уже при $\zeta_0 = 1$ оценка погрешности на два порядка ниже, чем реальная средняя погрешность. Для сверхжестких задач разница возрастает до пяти порядков. Диаметрально противоположная ситуация отмечается с исходной задачей. Для нее правило Рунге дает завышенную оценку погрешности начиная с $\zeta = 10$. Это необходимо учитывать при построении решения.

2. В отличие от исходного уравнения (12), преобразованная система (18) имеет большую размерность и усложненный вид. В ряде случаев это может

перекрывать преимущества наилучшей параметризации.

Несмотря на отмеченные недостатки, наилучшая параметризация является одним из наиболее эффективных методов решения плохо обусловленных задач, к которым можно отнести и задачи с контрастными структурами. Показано, что традиционные явные и неявные методы имеют существенные ограничения в использовании при больших ζ_0 и малоэффективны. В то же время переход к наилучшему аргументу позволяет получить решение рассматриваемой задачи даже при больших ζ_0 быстро и с приемлемой точностью. В дальнейшем для подтверждения полученных результатов необходимо рассмотреть решение еще ряда тестовых и прикладных задач данного класса. Однако, опираясь на уже полученные результаты решения различных задач^{36–38} [33], можно предположить, что метод продолжения решения по наилучшему аргументу будет также эффективен и для других задач данного класса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тихонов А. Н. О зависимости решений дифференциальных уравнений от малого параметра // Математический сборник. 1948. Т. 22 (64), № 2. С. 193–204. URL: <http://mi.mathnet.ru/msb6075>
2. Васильева А. Б., Бутузов В. Ф., Нефедов Н. Н. Контрастные структуры в сингулярно возмущенных задачах // Фундаментальная и прикладная математика. 1998. Т. 4, № 3. С. 799–851. URL: <http://mi.mathnet.ru/fpm344>
3. Belov A. A., Kalitkin N. N. Features of calculating contrast structures in the Cauchy problem // Mathematical Models and Computer Simulations. 2017. Vol. 9, Issue 3. P. 281–291. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070048217030048>
4. Belov A. A., Kalitkin N. N. Curvature-based grid step selection for stiff Cauchy problems // Mathematical Models and Computer Simulations. 2017. Vol. 9, Issue 3. P. 305–317. DOI: <https://doi.org/10.1134/S207004821703005X>
5. Белов А. А., Калиткин Н. Н. Численные методы решения задач Коши с контрастными структурами // Моделирование и анализ информационных систем. 2016. Т. 23, № 5. С. 529–538. DOI: <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2016-5-529-538>

³⁵ Там же.

³⁶ Там же.

³⁷ Кузнецов Е. Б. Некоторые приложения метода продолжения решения по наилучшему параметру. М. : Изд-во МАИ, 2013. 160 с.

³⁸ Кузнецов Е. Б. Параметризация краевых задач и прохождение точек бифуркации. М. : Изд-во МАИ, 2016. 160 с.



6. **Тихонов А. Н.** О системах дифференциальных уравнений, содержащих параметры // Математический сборник. 1950. Т. 27 (69), № 1. С. 147–156. URL: <http://mi.mathnet.ru/msb5907>
7. **Тихонов А. Н.** Системы дифференциальных уравнений, содержащие малые параметры при производных // Математический сборник. 1952. Т. 31 (73), № 3. С. 575–586. URL: <http://mi.mathnet.ru/msb5548>
8. **Butuzov V. F., Vasileva A. B., Nefedov N. N.** Asymptotic theory of contrast structures (review) // *Automatic and Remote Control*. 1997. Vol. 58, Issue 7. P. 1068–1091. Available at: <http://mi.mathnet.ru/at2615>
9. **Butuzov V. F., Levashova N. T., Melnikova A. A.** A steplike contrast structure in a singularly perturbed system of elliptic equations // *Computational Mathematics and Mathematical Physics Journal*. 2013; 53(9):1239–1259. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0965542513090054>
10. **Бутузов В. Ф., Денисов И. В.** Угловой пограничный слой в нелинейных эллиптических задачах, содержащих производные первого порядка // *Моделирование и анализ информационных систем*. 2014. Т. 21, № 1. С. 7–31. URL: <http://mi.mathnet.ru/mais356>
11. **Бутузов В. Ф., Белошапко В. А.** Сингулярно возмущенная эллиптическая задача Дирихле с кратным корнем вырожденного уравнения // *Моделирование и анализ информационных систем*. 2016. Т. 23, № 5. С. 515–528. DOI: <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2016-5-515-528>
12. **Butuzov V. F., Bychkov A. I.** Asymptotics of the solution of the initial boundary value problem for a singularly perturbed parabolic equation in the case of a triple root of the degenerate equation // *Computational Mathematics and Mathematical Physics Journal*. 2016. Vol. 56, Issue 4. P. 593–611. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0965542516040060>
13. **Бутузов В. Ф.** О контрастных структурах с многозонным внутренним слоем // *Моделирование и анализ информационных систем*. 2017. Т. 24, № 3. С. 288–308. DOI: <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2017-3-288-308>
14. **Козлов М. В., Щенников В. Н.** Асимптотическая устойчивость однородных сингулярных систем // *Вестник Мордовского университета*. 2017. Т. 27, № 4. С. 546–554. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.027.201704.546-554>
15. **Нефедов Н. Н., Никулин Е. И.** Существование и асимптотическая устойчивость периодического решения с внутренним переходным слоем в задаче со слабой линейной адвекцией // *Моделирование и анализ информационных систем*. 2018. Т. 25, № 1. С. 125–132. DOI: <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2018-1-125-132>
16. **Антипов Е. А., Левашова Н. Т., Нефедов Н. Н.** Асимптотическое приближение решения уравнения реакция-диффузия-адвекция с нелинейным адвективным слагаемым // *Моделирование и анализ информационных систем*. 2018. Т. 25, № 1. С. 18–32. DOI: <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2018-1-18-32>
17. **Давыдова М. А., Нефедов Н. Н.** Существование и устойчивость контрастных структур в многомерных задачах реакция-диффузия-адвекция в случае сбалансированной нелинейности // *Моделирование и анализ информационных систем*. 2017. Т. 24, № 1. С. 31–38. DOI: <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2017-1-31-38>
18. **Antipov E. A., Levashova N. T., Nefedov N. N.** Asymptotics of the front motion in the reaction-diffusion-advection problem // *Computational Mathematics and Mathematical Physics Journal*. 2014. Vol. 54, Issue 10. P. 1536–1549. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0965542514100029>
19. **Нефедов Н. Н.** Общая схема асимптотического исследования устойчивых контрастных структур // *Нелинейная динамика*. 2010. Т. 6, № 1. С. 181–186. URL: <http://mi.mathnet.ru/nd65>
20. **Efstathiou C., Luhar M.** Mean turbulence statistics in boundary layers over high-porosity foams // *Journal of Fluid Mechanics*. 2018. Vol. 841. P. 351–379. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2018.57>
21. Comparison of turbulent boundary layers over smooth and rough surfaces up to high Reynolds numbers / D. T. Squire [et al.] // *Journal of Fluid Mechanics*. 2016. Vol. 795. P. 210–240. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2016.196>

22. **Swaters G. E.** Internal dissipative boundary layers in the cross-equatorial flow of a grounded deep western boundary current // *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*. 2017. Vol. 111, no. 2. P. 91–114. DOI: <https://doi.org/10.1080/03091929.2017.1287909>
23. **Kumar D.** A parameter-uniform method for singularly perturbed turning point problems exhibiting interior or twin boundary layers // *International Journal of Computer Mathematics*. 2018. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207160.2018.1458098>
24. **Xu H., Jin Y. L.** The contrast structures for a class of singularly perturbed systems with heteroclinic orbits // *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2016. Article ID 6405853. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6405853>
25. **Belov A. A., Kalitkin N. N., Kuzmina L. V.** Modeling of chemical kinetics in gases // *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2017. Vol. 9, Issue 1. P. 24–39. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070048217010057>
26. **Lahaye M. E.** Une methode de resolution d'une categorie d'equations transcendentes // *Comptes rendus hebdomadaires des seances de L'Academie des sciences*. 1934. Vol. 198, no. 21. P. 1840–1842.
27. **Lahaye M. E.** Solution of system of transcendental equations // *Académie royale de Belgique. Bulletin de la Classe des sciences*. 1948. Vol. 5. P. 805–822.
28. **Давиденко Д. Ф.** Об одном новом методе численного решения систем нелинейных уравнений // *Доклады Академии наук СССР*. 1953. Т. 88, № 4. С. 601–602.
29. **Давиденко Д. Ф.** О приближенном решении систем нелинейных уравнений // *Украинский математический журнал*. 1953. Т. 5, № 2. С. 196–206.
30. **Ворович И. И., Зипалова В. Ф.** К решению нелинейных краевых задач теории упругости методом перехода к задаче Коши // *Прикладная математика и механика*. 1965. Т. 29, вып. 5. С. 894–901.
31. **Riks E.** The application of Newton's method to the problem of elastic stability // *Journal of Applied Mechanics*. 1972; Vol. 39, Issue 4. P. 1060–1065. URL: <http://appliedmechanics.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1400638>
32. **Kuznetsov E. B., Leonov S. S.** Parametrization of the Cauchy problem for systems of ordinary differential equations with limiting singular points // *Computational Mathematics and Mathematical Physics Journal*. 2017. Vol. 57, Issue 6. P. 931–952. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0965542517060094>
33. **Кузнецов Е. Б., Леонов С. С.** Примеры параметризации задачи Коши для систем обыкновенных дифференциальных уравнений с предельными особыми точками // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2018. Т. 58, № 6. С. 914–933. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0044466918060066>
34. **Semenov A. A.** Strength and stability of geometrically nonlinear orthotropic shell structures // *Thin-Walled Structures*. 2016. Vol. 106. P. 428–436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.05.018>
35. **May S., Vignollet J., de Borst R.** A new arc-length control method based on the rates of the internal and the dissipated energy // *Engineering Computations*. 2016. Vol. 33, Issue 1. P. 100–115. DOI: <https://doi.org/10.1108/EC-02-2015-0044>
36. A local pseudo arc-length method for hyperbolic conservation laws / X.Wang [et al.] // *Acta Mechanica Sinica*. 2015. Vol. 30, no. 6. P. 956–965. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10409-014-0091-0>
37. **Kalitkin N. N., Poshivaylo I. P.** Computations with inverse Runge-Kutta schemes // *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2014. Vol. 6, Issue 3. P. 272–285. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070048214030077>
38. **Rosenbrock H. H.** Some general implicit processes for the numerical solution of differential equations // *The Computer Journal*. 1963. Vol. 5, no. 4. P. 329–330. DOI: <https://doi.org/10.1093/comjnl/5.4.329>

Поступила 05.07.2018; принята к публикации 03.09.2018; опубликована онлайн 28.12.2018



Об авторах:

Кузнецов Евгений Борисович, профессор кафедры моделирования динамических систем, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (125993, Россия, г. Москва, Волоколамское ш., д. 4), доктор физико-математических наук, профессор, ResearcherID: S-9576-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9452-6577>, kuznetsov@mai.ru

Леонов Сергей Сергеевич, доцент кафедры моделирования динамических систем, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (125993, Россия, г. Москва, Волоколамское ш., д. 4), кандидат физико-математических наук, ResearcherID: E-7641-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6077-0435>, powerandglory@yandex.ru

Цапко Екатерина Дмитриевна, студент кафедры моделирования динамических систем, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (125993, Россия, г. Москва, Волоколамское ш., д. 4), ResearcherID: S-8613-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4215-3510>, zapkokaty@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

Е. Б. Кузнецов – проведение теоретических исследований по методу продолжения решения по параметру, формулирование основной концепции исследования, доработка текста; С. С. Леонов – обзор и анализ литературы, разработка вычислительных алгоритмов метода продолжения решения по наилучшему аргументу, формулировка выводов, редактирование текста; Е. Д. Цапко – разработка программного комплекса и проведение численных экспериментов, подготовка первоначального варианта рукописи, верстка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Tikhonov A. N. On the dependence of the solutions of differential equations on a small parameter. *Matematicheskiiy sbornik* = Mathematical Collection (New Series). 1948; 22(2):193–204. Available at: <http://mi.mathnet.ru/msb6075> (In Russ.)
2. Vasileva A. B., Butuzov V. F., Nefedov N. N. Contrast structures in singularly perturbed problems. *Fundamentalnaya i prikladnaya matematika* = Fundamental and Applied Mathematics. 1998; 4(3):799–851. Available at: <http://mi.mathnet.ru/fpm344> (In Russ.)
3. Belov A. A., Kalitkin N. N. Features of calculating contrast structures in the Cauchy problem. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2017; 9(3):281–291. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070048217030048>
4. Belov A. A., Kalitkin N. N. Curvature-based grid step selection for stiff Cauchy problems. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2017; 9(3):305–317. DOI: <https://doi.org/10.1134/S207004821703005X>
5. Belov A. A., Kalitkin N. N. Numerical methods of solving Cauchy problems with contrast structures. *Modelirovaniye i analiz informatsionnykh sistem* = Modelling and Analysis of Information System. 2016; 23(5):529–538. DOI: <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2016-5-529-538>
6. Tikhonov A. N. On systems of differential equations containing parameters. *Matematicheskiiy sbornik* = Mathematical Collection. 1950; 27(1):147–156. Available at: <http://mi.mathnet.ru/msb5907> (In Russ.)
7. Tikhonov A. N. Systems of differential equations containing a small parameter in front of the derivatives. *Matematicheskiiy sbornik* = Mathematical Collection. 1952; 31(3):575–586. Available at: <http://mi.mathnet.ru/msb5548> (In Russ.)

8. Butuzov V. F., Vasileva A. B., Nefedov N. N. Asymptotic theory of contrast structures (review). *Automatics and Remote Control*. 1997; 58(7):1068–1091. Available at: <http://mi.mathnet.ru/at2615>
9. Butuzov V. F., Levashova N. T., Melnikova A. A. A steplike contrast structure in a singularly perturbed system of elliptic equations. *Computational Mathematics and Mathematical Physics Journal*. 2013; 53(9):1239–1259. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0965542513090054>
10. Butuzov V. F., Denisov I. V. Corner boundary layer in nonlinear elliptic problems containing derivatives of first order. *Modelirovaniye i analiz informatsionnykh sistem = Modeling and Analysis of Information Systems*. 2014; 21(1):7–31. Available at: <http://mi.mathnet.ru/mais356> (In Russ.)
11. Butuzov V. F., Beloshapko V. A. Singularly perturbed elliptic Dirichlet problem with a multiple root of the degenerate equation. *Modelirovaniye i analiz informatsionnykh sistem = Modeling and Analysis of Information Systems*. 2016; 23(5):515–528. DOI: <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2016-5-515-528> (In Russ.)
12. Butuzov V. F., Bychkov A. I. Asymptotics of the solution of the initial boundary value problem for a singularly perturbed parabolic equation in the case of a triple root of the degenerate equation. *Computational Mathematics and Mathematical Physics Journal*. 2016; 56(4):593–611. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0965542516040060>
13. Butuzov V. F. On contrast structures with a multizonal interior layer. *Modelirovaniye i analiz informatsionnykh sistem = Modeling and Analysis of Information Systems*. 2017; 24(3):288–308. DOI: <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2017-3-288-308> (In Russ.)
14. Kozlov M. V., Shchennikov V. N. Asymptotic stability of homogeneous singular systems. *Vestnik Mordovskogo universiteta = Mordovia University Bulletin*. 2017; 27(4):546–554. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.027.201704.546-554> (In Russ.)
15. Nefedov N. N., Nikulin E. I. Existence and stability of the periodic solution with an interior transitional layer in the problem with a weak linear advection. *Modelirovaniye i analiz informatsionnykh sistem = Modeling and Analysis of Information Systems*. 2018; 25(1):125–132. DOI: <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2018-1-125-132> (In Russ.)
16. Antipov E. A., Levashova N. T., Nefedov N. N. Asymptotic approximation of the solution of the reaction-diffusion-advection equation with a nonlinear advective term. *Modelirovaniye i analiz informatsionnykh sistem = Modeling and Analysis of Information Systems*. 2018; 25(1):18–32. DOI: <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2018-1-18-32> (In Russ.)
17. Davydova M. A., Nefedov N. N. Existence and stability of the solutions with internal layers in multidimensional problems of the reaction-diffusion-advection type with balanced nonlinearity. *Modelirovaniye i analiz informatsionnykh sistem = Modeling and Analysis of Information Systems*. 2017; 24(1):31–38. DOI: <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2017-1-31-38> (In Russ.)
18. Antipov E. A., Levashova N. T., Nefedov N. N. Asymptotics of the front motion in the reaction-diffusion-advection problem. *Computational Mathematics and Mathematical Physics Journal*. 2014; 54(10):1536–1549. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0965542514100029>
19. Nefedov N. N. General scheme of asymptotic investigation of stable contrast structures. *Nelineynaya dinamika = Nonlinear Dynamics*. 2010; 6(1):181–186. Available at: <http://mi.mathnet.ru/nd65> (In Russ.)
20. Efstathiou C., Luhan M. Mean turbulence statistics in boundary layers over high-porosity foams. *Journal of Fluid Mechanics*. 2018; 841:351–379. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2018.57>
21. Squire D. T., Morrill-Winter C., Hutchins N., Schultz M. P., Klewicki J. C., Marusic I. Comparison of turbulent boundary layers over smooth and rough surfaces up to high Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*. 2016; 795:210–240. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2016.196>
22. Swaters G. E. Internal dissipative boundary layers in the cross-equatorial flow of a grounded deep western boundary current. *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*. 2017; 111(2):91–114. DOI: <https://doi.org/10.1080/03091929.2017.1287909>



23. Kumar D. A parameter-uniform method for singularly perturbed turning point problems exhibiting interior or twin boundary layers. *International Journal of Computer Mathematics*. 2018, p. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207160.2018.1458098>
24. Xu H., Jin Y. The contrast structures for a class of singularly perturbed systems with heteroclinic orbits. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2016. Article ID 6405853. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6405853>
25. Belov A. A., Kalitkin N. N., Kuzmina L. V. Modeling of chemical kinetics in gases. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2017; 9(1):24–39. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070048217010057>
26. Lahaye M. E. Une metode de resolution d'une categorie d'equations transcendentales. *Compter Rendus Hebdomataires des Seances de L'Academie des Sciences*. 1934; 198(21):1840–1842.
27. Lahaye M. E. Solution of system of transcendental equations. *Académie Royale de Belgique. Bulletin de la Classe des Sciences*. 1948; 5:805–822.
28. Davidenko D. F. On a new numerical method for solving systems of nonlinear equations. *Doklady Akademii nauk SSSR = Reports of the Academy of Science of the USSR*. 1953; 88(4):601–602. (In Russ.)
29. Davidenko D. F. Approximate solution of nonlinear equation systems. *Ukrainskiy matematicheskii zhurnal = Ukrainian Mathematical Journal*. 1953; 5(2):196–206. (In Russ.)
30. Vorovich I. I., Zupalova V. F. On solution of nonlinear boundary value elasticity problems by method of transformation to Cauchy problem. *Prikladnaya matematika i mekhanika = Applied Mathematics and Mechanics*. 1965; 29(5):894–901. (In Russ.)
31. Riks E. The application of Newton's method to the problem of elastic stability. *Journal of Applied Mechanics*. 1972; 39(4):1060–1065. Available at: <http://appliedmechanics.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1400638>
32. Kuznetsov E. B., Leonov S. S. Parametrization of the Cauchy problem for systems of ordinary differential equations with limiting singular points. *Computational Mathematics and Mathematical Physics Journal*. 2017; 57(6):931–952. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0965542517060094>
33. Kuznetsov E. B., Leonov S. S. Examples of parametrization of the Cauchy problem for systems of ordinary differential equations with limiting singular points. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki = Computational Mathematics and Mathematical Physics Journal*. 2018; 58(6):914–933. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0044466918060066> (In Russ.)
34. Semenov A. A. Strength and stability of geometrically nonlinear orthotropic shell structures. *Thin-Walled Structures*. 2016; 106:428–436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.05.018>
35. May S., Vignollet J., de Borst R. A new arc-length control method based on the rates of the internal and the dissipated energy. *Engineering Computations*. 2016; 33(1):100–115. DOI: <https://doi.org/10.1108/EC-02-2015-0044>
36. Wang X., Ma T.-B., Ren H.-L., Ning J.-G. A local pseudo arc-length method for hyperbolic conservation laws. *Acta Mechanica Sinica*. 2015; 30(6):956–965. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10409-014-0091-0>
37. Kalitkin N. N., Poshivaylo I. P. Computations with inverse Runge-Kutta schemes. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2014; 6(3):272–285. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070048214030077>
38. Rosenbrock H. H. Some general implicit processes for the numerical solution of differential equations. *The Computer Journal*. 1963; 5(4):329–330. DOI: <https://doi.org/10.1093/comjnl/5.4.329>

Received 05.07.2018; revised 03.09.2018; published online 28.12.2018

*About authors:*

Evgenii B. Kuznetsov, Professor, Department of Modelling of Dynamic Systems, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, Russia), D.Sc. (Physics and Mathematics), ResearcherID: S-9576-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9452-6577>, kuznetsov@mai.ru

Sergey S. Leonov, Associate Professor, Department of Modelling of Dynamic Systems, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, Russia), Ph.D. (Physics and Mathematics), ResearcherID: E-7641-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6077-0435>, powerandglory@yandex.ru

Ekaterina D. Tsapko, Student, Department of Modelling of Dynamic Systems, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, Russia), ResearcherID: S-8613-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4215-3510>, zapkokaty@gmail.com

Contribution of the authors:

E. B. Kuznetsov – conducting theoretical research on the method of solution continuation with respect to a parameter, formulation of the basic research concepts, final editing the text; S. S. Leonov – reviewing and analysing the literature, development of computational algorithms of the solution continuation method with respect to the best argument, formulation of conclusions, editing the text; E. D. Tsapko – development of software and numerical experiments, writing the draft, word processing.

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



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

УДК 621.01:658

DOI: 10.15507/0236-2910.028.201804.511-522



Проектно-операционное управление в машиностроительном производстве

А. В. Цырков¹, П. М. Кузнецов^{1*}, Г. А. Цырков¹,
Е. А. Ермохин¹, В. К. Москвин²

¹ ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»
(г. Москва, Россия)

² ФГБОУ ВО «Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана» (г. Москва, Россия)

*profpol@rambler.ru

Введение. Целью статьи является разработка основных положений проектно-операционного управления на предприятиях машиностроительного производства.

Материалы и методы. Проведенный авторами обзор научных работ, посвященных проектно-операционному управлению машиностроительным производством в автоматизированном режиме, свидетельствует о сложности его внедрения из-за большого количества факторов, которые необходимо учитывать. На основании этого был разработан подход, позволяющий решить поставленную задачу посредством автоматизации процессов анализа и принятия решения при управлении производством. *Результаты исследования.* В данной статье установлены основные положения проектно-операционного управления, направленного на повышение производительности и снижение себестоимости выпускаемой продукции на основе моделирования состояния производственной среды. Определены требования, в соответствии с которыми разработана прогностическая модель состояния производственной системы предприятия во времени.

Обсуждение и заключение. Задачи, решенные в данной статье, позволяют повысить уровень автоматизации процессов проектно-операционного управления предприятием в условиях быстросменного производства. Реализация разработанного подхода к проектно-операционному управлению предприятием позволяет упорядочить запуск изделий в производство при снижении объемов незавершенного производства и повысить производительность выпуска продукции.

Ключевые слова: технологический процесс, проектно-операционное управление, проектирование, прогностическая модель, продукция, трудоемкость, производительность

© Цырков А. В., Кузнецов П. М., Цырков Г. А., Ермохин Е. А., Москвин В. К., 2018



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

Для цитирования: Проектно-операционное управление в машиностроительном производстве / А. В. Цырков [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 4. С. 511–522. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.511-522>

Project and Operations Management of Machine-Building Production

A. V. Tsyrov¹, P. M. Kuznetsov^{1*}, G. A. Tsyrov¹,
Ye. A. Yermokhin¹, V. K. Moskvina²

¹*Moscow Aviation Institute (National Research University)
(Moscow, Russia)*

²*Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)*

**profpol@rambler.ru*

Introduction. The aim of this work is to develop the main guidelines of project and operations management at machine-building enterprises.

Materials and Methods. The authors reviewed the state of application of the project and operations management of machine-building production in the automated mode. The review showed the complexity of its application due to a large number of factors, which must be taken into account when implementing. An approach was developed that allows solving the task using the automation of analysis processes and decision-making in production management.

Results. The article establishes the main guidelines of the project and operations management, aimed at increasing productivity and reducing production costs based on modeling the state of production environment. It also defines the requirements for the model. A prognostic time model for forecasting the state of the enterprise production system has been developed.

Conclusions. The tasks have been solved in this article allow increasing the level of automation of the processes of project and operations management of the enterprise in the conditions of quick-change production. The implementation of the developed approach to project and operations management of the enterprise will allow streamlining the launch of products with a reduction in the amount of work in progress and increasing the productivity of output.

Keywords: technological process, project and operations management, design, prognostic model, production, labor intensity, productivity

For citation: Tsyrov A. V., Kuznetsov P. M., Tsyrov G. A., Yermokhin Ye. A., Moskvina V. K. Project and Operations Management of Machine-Building Production. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(4):511–522. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.511-522>

Введение

Современное машиностроительное производство – сложная система, представляющая собой большое количество взаимодействующих друг с другом разнородных частей производственной и технологической подсистем, направленных на решение производственных задач. Успешное функционирование системы характеризуется конкурентоспособностью выпускаемой продукции. Конкурентоспособность продукции

обеспечивается прежде всего снижением себестоимости ее изготовления, повышением производительности и сокращением времени на подготовку производства новых видов продукции. Снижение производственных мощностей для выполнения каждого производственного задания является основой соответствия перечисленным факторам и достигается путем рационального изменения структуры и параметров производственной системы в кратчайшие сроки.



Изменение состояния производственной системы определяется и обеспечивается организацией такого воздействия на нее, в результате которого она переходит в состояние, когда оказывается возможным выпуск новой продукции при положительных условиях.

Таким образом, важным является обеспечение процесса управления системой, при котором она гарантировала бы максимальные производственные показатели.

Обзор литературы

Под технологическим процессом, согласно ГОСТ 3.1109-73¹, будем понимать часть производственного процесса, непосредственно связанную с последовательным изменением состояния объекта производства. Проектирование технологического процесса определяется двумя взаимосвязанными частями – структурным и параметрическим синтезом. При проектировании технологических процессов нужно исходить из таких общепринятых критериев, как себестоимость, производительность, трудоемкость. Проектированию трудно формализуемой структуры технологических процессов посвящено достаточно большое количество исследований. Предлагается формирование массивов технологических операций с учетом особенностей конкретного предприятия [1] и создание на их основе матриц распределения временных ресурсов в зависимости от структуры технологического процесса [2]. В ряде работ рассматриваются методы получения информации,

учитываемой при формировании указанных матриц для конкретных условий проектирования: например, качества поверхностного слоя [3] и обработки (в частности, лазерной [4]). Отмечается, что процесс проектирования носит итерационный характер [5], и прежде всего на стадиях проектирования опытной продукции [6]. Однако при малых партиях данная тенденция сохраняется [7]; особенно итерационный характер проявляется при дальнейшем улучшении качества продукции [8] по мере совершенствования производственного процесса ее выпуска.

Процессы проектирования регламентируются рядом документов, определяющих обмен графической информацией², формой представления данных³, организацией баз данных⁴. Важными аспектами являются: требования к вопросам конфиденциальности и целостности используемой информации [9], к определению файла и независимости логических данных [10], а также структура хранения и независимость физических данных [11]. Стандарт «ISO 10303: Industrial automation system and integration: Product data representation and exchange: Integrated generic resources»⁵ регламентирует геометрическое и топологическое представление о проектируемом объекте.

В связи с этим особое значение приобретает формирование структуры маршрутной технологии. В. В. Борзенков предлагает создать структуру на основе топологических свойств макроэлементов, структуры деталей в САПР

¹ Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Процессы технологические. Основные термины и определения : ГОСТ 3.1109-73. Введ. 1975-01-07. М. : Изд-во стандартов, 1973. 11 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200115338>

² The initial graphics exchange specification (IGES) Version 6.0. Draft baseline. 2001. № 1. URL: <https://filemonger.com/specs/igs/devdept.com/version6.pdf>

³ STEP ISO 10303-203 Industrial automation systems and integration: Product data representation and exchange. Part 203 (IS). Application protocol. Configuration controlled design. URL: <http://docs.cntd.ru/document/461920360>

⁴ Database management systems: relational, object-relational, and object-oriented data models. URL: <http://www.cit.dk/COT/reports/reports/Case4/05-v1.1/cot-4-05-1.1.pdf>

⁵ ISO 10303: Industrial automation system and integration: Product data representation and exchange: Integrated generic resources. Part 42. Geometric and topological representation. G.: ISO, 1998. P. 451.

ТП⁶. Д. Е. Максимовский рассматривает способы выбора технологических баз для корпусных деталей в автоматизированном производстве с использованием САПР ТП [12;13].

С. Ю. Калякулин разработал систему автоматизированной конструкторско-технологической параметризации процессов изготовления деталей типа тел вращения [14]. Использование предложенной системы позволяет проектировать процессы технологической подготовки для производства деталей указанного класса.

С. В. Байбаков разработал методику выбора комплектов технологических баз на операциях механической обработки машиностроительных деталей [15]. В. Н. Бровцин предложил метод адаптивного управления и структуры настраиваемых моделей технологических процессов сельскохозяйственного производства [16]. З. Т. Акашев описал методологию совершенствования и выбора структуры технологических процессов горнодобывающих предприятий [17].

Важным аспектом автоматизации операционно-проектного управления является смещение процессов построения систем в область организации целеустремленных систем проектирования производственных процессов [18–20]. Подобные системы отличаются наличием поведенческого характера при определении стратегии управления производством [21;22]. Важное значение здесь приобретает графическое представление данных [23] и методы параметризации⁷.

Материалы и методы

Важным аспектом выпуска новых изделий является повышение риска их затоваривания или даже не востребо-

ванности вследствие ошибок маркетинга, внезапных изменений конъюнктуры рынка и т. д. [20; 24]. Это обстоятельство явилось, в частности, причиной появления венчурных предприятий. В данных условиях принимаются активные меры по снижению подобных рисков, в частности, путем оперативного изготовления пробных партий, верификации полученных решений и, в случае положительных результатов, отработки на них технологических аспектов выпуска основной части партии продукции.

Создание адекватной прогностической модели является одним из основных условий успешного осуществления проектно-операционного управления. Успех ее использования определяется наличием необходимой и достоверной информации о процессе. Адекватность прогностической модели в проектно-операционном управлении предполагает, что поведение системы под влиянием различных внешних возмущений будет совпадать с прогнозом, представленным моделью, при условии, что рассматриваемое состояние объекта достаточно полно представлено в модели. Возникает задача получения достоверного описания текущего процесса, что может быть обеспечено постоянным наблюдением за объектом управления, а также регистрацией и обработкой информации о его состоянии.

Формирование необходимой информации о состоянии объекта осуществляется путем правильного определения точек съема информации и последовательности опроса, а также объемом съема и частотой опроса. Кроме того, требуется получение информации о предполагаемых событиях, связанных с перспективной загрузкой управляемой

⁶ Борзенков В. В. Топологические свойства макроэлементов, описывающих структуру деталей в САПР ТП механической обработки // Сотрудничество в области машиностроительных производств, реинжиниринга и образования : сб. мат-лов науч.-практ. конф. с междунар. уч. Смоленск : Изд-во Филиала МГОУ им. В. С. Черномырдина в Смоленске. 2013. С. 18–21. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22658937>

⁷ ProTechnologies. Оформление чертежей в Creo Parametric 1.0. М. : Pro Technologies, 2011. 326 с. URL: <https://dwg.url/dnl/11722>



системы. Планирование перспективных событий должно осуществляться на самых ранних этапах их наступления даже при недостаточной степени их определенности. Уточнение информации осуществляется по мере приближения времени наступления событий.

Поведенческий характер системы проектно-операционного управления можно охарактеризовать активной и пассивной составляющими реакции. Активная составляющая системы управления позволяет ей вмешиваться в текущий ход событий и менять состояние объекта в соответствии с выработанной стратегией управления. Пассивная составляющая предусматривает накопление информации, на основе которой вырабатывается стратегия управления. Целью вмешательства в работу управляемой системы является нахождение лучшей стратегии выполнения производственных процессов.

При оперативном планировании запуска изделий в производство основополагающей является информация о требуемых сроках их выполнения, которая необходима для планирования загрузки складского хозяйства, транспортных служб и т. д. Кроме того, осуществляется синхронизация работы различных производств, например, работа поставщиков. В противном случае приходится принимать организационно-производственные решения в состоянии неопределенности.

Для эффективного оперативного планирования требуется прогнозная модель, достоверно описывающая процесс изменения состояния производственной системы в течение некоторого отрезка предстоящего времени. Прогнозная модель позволяет определять перспективные возможные состояния производственной системы на некотором временном интервале, оценивать последствия возникновения таких состояний и выработать стратегию и тактику оперативного управления ее состоянием с целью получения поло-

жительного эффекта. Прогнозирование представляет собой совокупность процедур синтеза и анализа ситуационной информации в рамках производственной системы. В этом случае прогнозная модель определяется следующими параметрами.

1. Степень достоверности определения времени выполнения производственного задания, а, следовательно, и срока возможного запуска очередного задания.

2. Величина отрезка времени, в течение которого степень достоверности прогноза остается приемлемой величиной, т. к. с увеличением такого отрезка снижается степень достоверности прогноза вследствие возрастающего количества труднопрогнозируемых событий и случайных, непрогнозируемых, изначально возмущающих внешних факторов.

Таким образом, с увеличением глубины прогноза (отрезка времени прогнозирования) увеличивается расхождение предполагаемого срока выполнения производственного задания с реальным сроком его выполнения. Другими словами, глубина прогноза определяется качеством прогнозной модели и полнотой информации о последовательности наступающих как штатных, так и труднопредсказуемых событий. Последние, очевидно, носят стохастический характер.

При построении и эксплуатации прогнозной модели происходит балансировка между затратами на получение информации о дестабилизирующих факторах, степенью адекватности модели и глубиной прогноза.

Прогнозная модель представляет собой информационную модель, потребляющую информацию о текущем состоянии производственной системы о предсказуемых (плановых) событиях и о предполагаемых дестабилизирующих производственную систему событиях. Мы видим здесь совокупность детерминированной и стохастической

информации. При ее разработке были использованы процедуры, связанные с формированием, накоплением, переработкой, анализом и выработкой управляющей информации воздействия на производственную систему.

Состояние производственной системы Z описывается конечным множеством значений:

x_1, x_2, \dots, x_m с вероятностями P_1, P_2, \dots, P_m ,
 $P_i = P(Z \sim x_i)$

x_i^j	X_1^j	X_2^j
P_i^j	P_1^j	P_2^j

Индекс j отражает признак наступления 1-го или 2-го события. Структура одинакова в любом случае, различаются только их вероятности P_i^j .

Накопленный статистический материал позволяет достаточно достоверно определять изменения состояния производственной системы на рассматриваемом интервале времени и, следовательно, получать информацию о состоянии производственной системы в любой момент временного отрезка прогноза, а также прогнозировать время выполнения производственных заданий и планирования запуска очередных заданий.

Для прогнозной модели входной информацией является набор свойств предполагаемых событий за прогнозный отрезок времени, причем эти события имеют различную вероятность наступления. Чем больше количество событий и ниже их вероятности, тем хуже достоверность получаемых результатов моделирования и меньше глубина прогноза. Тем не менее, в плане стратегического планирования во многих случаях оказывается полезным моделирование в пределах длительного отрезка времени, имеющего заведомо низкую достоверность, т. к. в этом случае удается получить «черновой вариант» предполагаемого

состояния производственной системы в будущем. Данный вариант оказывается определенным ориентиром, к которому следует или, наоборот, не следует стремиться.

Математически можно записать:

$$T = \sum_{j=1}^N T_j^i + \sum T_{ож}^i,$$

где T – время выполнения задания; T_j – длительность j -ой операции i -ого задания; N – количество технологических операций в маршруте изготовления изделия; $\sum T_{ож}^i$ – суммарная длительность периода прерывания выполнения технологического процесса ввиду отсутствия свободного технологического оборудования производственной системы. Компоненты $\sum T_{ож}^i$ являются событиями с известными вероятностями. Таким образом, прогнозная модель определения времени выполнения i -го производственного задания оказывается стохастической.

Для оценки точности результатов математической модели определения априорной неопределенности системы используем энтропию.

Энтропия рассматриваемой производственной системы $H(Z)$ равна суммарному произведению значений вероятностей с обратным знаком:

$$H(Z) = - \sum_{i=1}^m P_i \log P_i,$$

где m – число предполагаемых событий на расчетном отрезке времени.

Целесообразным оказывается представление энтропии в двоичных единицах. С этой целью процедура логарифмирования основывается на использовании логарифма с основанием 2. Вся совокупная последовательность изменения состояния производственной системы имеет дискретный характер, и его вероятность определяется как

$$P(x_1, x_2, \dots, x_m) = P(x_1) P(x_2) \dots P(x_m),$$



откуда

$$\log P(x_1, x_2, \dots, x_m) = \log P(x_1) + \log P(x_2) + \dots + \log P(x_m)$$

и

$$H(x_1, x_2, \dots, x_m) = H(x_1) + H(x_2) + \dots + H(x_m),$$

т. е. энтропии возможных событий складываются. В результате получим:

$$H(x_1, x_2, \dots, x_m) = \sum_{i=1}^m H(x_i).$$

Данная формула является реальной оценкой уровня неопределенности прогнозной модели при варьировании глубины прогноза. Можно сделать вывод, подтверждающий целесообразность использования прогнозной модели и для стратегического планирования с большой глубиной прогноза: результаты прогнозного моделирования, имеющие низкую достоверность, оказываются особенно полезными при высокой степени неопределенности состояния производственной системы.

Полученная выше формула дает возможность оценить величину неопределенности состояния производственной системы на моделируемом отрезке времени. Отсюда следует, что глубина прогноза определяется интервалом времени, на котором выполняется следующее условие:

$$\sum_{i=1}^m H(x_i) \leq H^*,$$

где m – количество событий на моделируемом отрезке времени; H^* – предельно допустимое значение энтропии производственной системы Z .

Предельно допустимое значение энтропии H^* определяется, в частности, таким параметром, как приоритет производственного задания. Для производственных заданий с высоким приоритетом энтропия стремится к нулю. Это обусловлено низкой вероятностью

появления производственного задания с еще более высоким уровнем приоритета. С другой стороны, период выполнения задания с низким приоритетом будет зависеть от большого числа заданий, поступающих на выполнение, т. к. вероятность их более высокого приоритета велика.

При наступлении событий, обусловленных ремонтом или техническим обслуживанием технологического оборудования, уменьшается производственная мощность технологической системы, что приводит к вытеснению менее приоритетных производственных заданий более приоритетными, и период их выполнения возрастает. Поэтому каждому производственному заданию устанавливается своя максимально допустимая величина энтропии.

Значение максимально допустимой величины энтропии можно определить как

$$H^*(Z) = -P^* \log P^*,$$

где P^* – допустимое значение величины вероятности выполнения конкретного производственного задания в прогнозируемый срок.

Допустимое значение вероятности P^* определяется рядом условий. Если, например, величина экономических потерь существенно меньше размеров прибыли, получаемой в результате жесткого следования плановым срокам выполнения производственных заданий, энтропия производственной системы возрастает, увеличивая при этом глубину прогноза, значение P^* может быть уменьшено, что, в свою очередь, позволяет увеличить глубину прогноза при прочих условиях. И наоборот, невыполнение плановых сроков повлечет высокие экономические потери, величину P^* необходимо увеличивать и снижать глубину прогноза. Реальную величину P^* следует определять, основываясь на требованиях к жесткости

обеспечения сроков, производственной ситуации и т. д.

Обсуждение и заключение

На основе выявленных связей сформулированы основные требования к проектно-операционному управлению, показана связь детерминиро-

ванного и стохастического подхода к поставленной задаче. Разработано математическое описание модели процессов планирования во времени и предпосылки для принятия решения по срокам запуска заданий в производство.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Кузнецов П. М.** Поддержка стадии изготовления изделия в условиях мелкосерийного и единичного производства // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2014. № 1. С. 40–44. URL: http://izdat.ntkompas.ru/editions/for_readers/archive/article_detail.php?SECTION_ID=244&ELEMENT_ID=16302
2. **Кузнецов П. М.** Оперативная разработка систем технологического проектирования в машиностроительном производстве // Технология машиностроения. 2014. № 5. С. 40–43. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22138970>
3. **Усов С. В., Свириденко Д. С., Кузнецов П. М.** Информационное обеспечение конструкторско-технологического проектирования с учетом трибологических характеристик поверхностного слоя деталей машин // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2015. № 1. С. 46–49. URL: http://izdat.ntkompas.ru/editions/for_readers/archive/article_detail.php?SECTION_ID=159&ELEMENT_ID=20158
4. **Усов С. В., Свириденко Д. С., Кузнецов П. М.** Информационное обеспечение процесса лазерной сварки сплавов черных и цветных металлов // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2015. № 4. С. 55–58. URL: http://izdat.ntkompas.ru/editions/for_readers/archive/article_detail.php?SECTION_ID=160&ELEMENT_ID=21211
5. **Лопота А. В., Цырков А. В.** Построение системы проектно-операционного управления научно-производственным машиностроительным комплексом // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2016. № 2. С. 47–55. URL: http://izdat.ntkompas.ru/editions/for_readers/archive/article_detail.php?SECTION_ID=160&ELEMENT_ID=21729
6. **Лопота А. В., Цырков А. В., Цырков Г. А.** Реализация системы проектно-операционного управления предприятием. Организационно-методические решения // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2016. № 3 (163). С. 9–18. URL: http://izdat.ntkompas.ru/editions/for_readers/archive/article_detail.php?SECTION_ID=159CachedSimilar%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%B2&ELEMENT_ID=22775
7. **Lopota A. V., Tsyrcov A. V., Tsyrcov G. A.** Methods and tools of project-operational management of an machine-building enterprise // Proceedings of the 2017 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS). IEEE, 2017. P. 536–539. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITMQIS.2017.8085882>
8. **Tsyrcov A. V., Tsyrcov G. A.** Intelligent components to support workflow in the design and production activities // Proceedings of the 2017 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS). IEEE, 2017. P. 764–768. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITMQIS.2017.8085942>
9. **Dean A. L.** Data privacy and integrity requirements for online data management systems // Proceedings of the 1971 ACM SIGFIDET (now SIGMOD) Workshop on Data Description, Access and Control. New York : ACM, 1971. P. 279–298. DOI: <https://doi.org/10.1145/1734714.1734736>
10. **Date C. J., Hopewell P.** File definition and logical data independence // Proceedings of the 1971 ACM SIGFIDET (now SIGMOD) Workshop on Data Description, Access and Control. New York : ACM, 1971. P. 117–138. DOI: <https://doi.org/10.1145/1734714.1734724>



11. **Date C. J., Hopewell P.** Storage structure and physical data independence // Proceedings of the 1971 ACM SIGFIDET (now SIGMOD) Workshop on Data Description, Access and Control. New York : ACM, 1971. P. 139–168. DOI: <https://doi.org/10.1145/1734714.1734725>
12. **Кузьмин В. В., Максимовский Д. Е.** Выбор технологических баз на основе решения прямой задачи размерного анализа // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2012. № 2. С. 64–69. URL: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/590>
13. **Maksimovskii D. E.** Automation of process design by design-technological parameterization // Russian Engineering Research. 2011. Vol. 31, no. 9. С. 870–872. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X1109019X>
14. **Kalyakulin S. Yu.** Algorithm for calculating the parameters of the initial blank in the SITEP MO automated design system // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34, no. 11. P. 713–715. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X14110082>
15. **Байбаков С. В.** Система комплексной автоматизации технологической подготовки производства // Программные продукты и системы. 2010. № 1. С. 85–87. URL: <http://www.swsys.ru/index.php?page=article&id=2437>
16. **Бровцин В. Н.** Выбор метода адаптивного управления и структуры настраиваемых моделей технологических процессов сельскохозяйственного производства // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 1996. № 66. С. 45–54. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23067702>
17. **Акашев З. Т.** Методология совершенствования и выбора структуры технологических процессов горнодобывающих предприятий // Тяжелое машиностроение. 2005. № 12. С. 17–19. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9482961>
18. **Кузнецов П. М., Москвин В. К.** Информационно-технологическое обеспечение гибких промышленных производств // Инновационная наука. 2016. № 1, ч. 2. С. 67–72. URL: <https://aeterna-ufa.ru/sbornik/IN-16-1-2.pdf>
19. **Кузнецов П. М., Москвин В. К.** Управление целеустремленной средой сопровождения изготовления изделий // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2016. № 1. С. 58–64. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26203215>
20. **Кузнецов П. М., Москвин В. К.** Оперативное управление единичным производством // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2018. № 1. С. 18–22. URL: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/1794>
21. **Кузнецов П. М., Цырков Г. А.** Целеустремленная среда проектно-операционного управления // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2017. № 4. С. 10–14. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30575555>
22. **Land A. H., Doig A. G.** An automatic method of solving discrete programming problems // Econometrica. 1960. Vol. 28, no. 3. P. 497–520. DOI: <https://doi.org/10.2307/1910129>
23. **Meguid S. A.** Integrated computer-aided design of mechanical systems. London : Elsevier Applied Science, 1987. 196 p.
24. **Кузнецов П. М., Москвин В. К., Федоров В. А.** Информационная среда сопровождения технологических процессов в машиностроительном производстве // Вестник Тамбовского университета. 2017. Т. 22, № 1. С. 56–59. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28821703>

Поступила 10.05.2018; принята к публикации 29.06.2018; опубликована онлайн 28.12.2018

Об авторах:

Цырков Александр Владимирович, профессор кафедры системного моделирования и автоматизированного проектирования, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4), доктор технических наук, ResearcherID: K-1128-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2334-1962>, tias@inbox.ru

Кузнецов Павел Михайлович, профессор кафедры системного моделирования и автоматизированного проектирования, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (националь-

ный исследовательский университет)» (125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4), доктор технических наук, ResearcherID: K-8831-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9237-3848>, profpol@ Rambler.ru

Цырков Георгий Александрович, доцент кафедры системного моделирования и автоматизированного проектирования, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4), кандидат технических наук, ResearcherID: P-1620-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9379-5380>, george@matias.ru

Ермохин Егор Алексеевич, аспирант кафедры системного моделирования и автоматизированного проектирования, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4), ResearcherID: K-1122-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2819-2318>, ermokhin@matias.ru

Москвин Валерий Константинович, доцент кафедры металлорежущих станков, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана» (105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д 5), кандидат технических наук, ResearcherID: L-4930-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5377-4390>, moskvin1945@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. В. Цырков – научное руководство, постановка задачи исследования, анализ литературных источников; П. М. Кузнецов – разработка математического аппарата прогностической модели; Г. А. Цырков – разработка моделей технологических процессов; Е. А. Ермохин – написание текста статьи, перевод на английский язык и редактирование; В. К. Москвин – верстка текста, поиск и анализ литературных источников.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Kuznetsov P. M. Support of the stage of manufacturing the product in the conditions of small-scale and single production. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve* = Information Technologies in Design and Manufacturing. 2014; 1:40–44. Available at: http://izdat.ntkompas.ru/editions/for_readers/archive/article_detail.php?SECTION_ID=244&ELEMENT_ID=16302 (In Russ.)
2. Kuznetsov P. M. Operative development of the systems of technological design in machine-building production. *Tekhnologiya mashinostroeniya* = Technology of Mechanical Engineering. 2014; 5:40–43. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22138970> (In Russ.)
3. Usov S. V., Sviridenko D. S., Kuznetsov P. M. Information support of design and technological design taking into account the tribological characteristics of the surface layer of machine parts. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve* = Information Technologies in Design and Production. 2015; 1:46–49 Available at: http://izdat.ntkompas.ru/editions/for_readers/archive/article_detail.php?SECTION_ID=159&ELEMENT_ID=20158 (In Russ.)
4. Usov S. V., Sviridenko D. S., Kuznetsov P. M. Information support of the process of laser welding of alloys of ferrous and non-ferrous metals. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve* = Information Technologies in Design and Production. 2015; 4:55–58. Available at: http://izdat.ntkompas.ru/editions/for_readers/archive/article_detail.php?SECTION_ID=160&ELEMENT_ID=21211 (In Russ.)
5. Lopota A. V., Tsykov A. V. Construction of the system of design and operational management of the scientific and production machine-building complex. *Oboronnyy kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii* = Defense Complex to Scientific and Technical Progress of Russia. 2016; 2:47–55. Available at: http://izdat.ntkompas.ru/editions/for_readers/archive/article_detail.php?SECTION_ID=160&ELEMENT_ID=21729 (In Russ.)



6. Lopota A. V., Tsyrvkov A. V., Tsyrvkov G. A. Implementation of the system of project-operational management of the enterprise. Organizational-methodical solutions. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve* = Information technologies in design and production. 2016; 3(163):9–18. Available at: http://izdat.ntckompas.ru/editions/for_readers/archive/article_detail.php?SECTION_ID=159CachedSimilar%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%B2&ELEMENT_ID=22775 (In Russ.)
7. Lopota A. V., Tsyrvkov A. V., Tsyrvkov G. A. Methods and tools of project-operational management of an machine-building enterprise. In: *Proceedings of the 2017 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS)*. 2017. p. 536–539. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITMQIS.2017.8085882>
8. Tsyrvkov A. V., Tsyrvkov G. A. Intelligent components to support workflow in the design and production activities. In: *Proceedings of the 2017 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS)*. 2017. p. 764–768. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITMQIS.2017.8085942>
9. Dean A. L. Data privacy and integrity requirements for online data management systems. In: *Proceedings of the 1971 ACM SIGFIDET (now SIGMOD) Workshop on Data Description, Access and Control*. New York: ACM; 1971. p. 279–298. DOI: <https://doi.org/10.1145/1734714.1734736>
10. Date C. J., Hopewell P. File definition and logical data independence. In: *Proceedings of the 1971 ACM SIGFIDET (now SIGMOD) Workshop on Data Description, Access and Control*. New York: ACM; 1971. p. 117–138. DOI: <https://doi.org/10.1145/1734714.1734724>
11. Date C. J., Hopewell P. Storage Structure and Physical Data Independence. In: *Proceedings of the 1971 ACM SIGFIDET (now SIGMOD) Workshop on Data Description, Access and Control*. New York: ACM; 1971. p. 139–168. DOI: <https://doi.org/10.1145/1734714.1734725>
12. Kuzmin V. V., Maksimovskiy D. E. Choice of technological bases on the basis of solving a direct problem of dimensional analysis. *Vestnik MGTU "STANKIN"* = MSTU STANKIN Bulletin. 2012; 2:64–69. Available at: <http://www.stankin-journal.ru/articles/590> (In Russ.)
13. Maksimovskii D. E. Automation of process design by design-technological parameterization. *Russian Engineering Research*. 2011; 31(9):870–872. Available at: DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X1109019X>
14. Kalyakulin S. Yu. Algorithm for calculating the parameters of the initial blank in the SITEP MO automated design system. *Russian Engineering Research*. 2014; 34(11):713–715. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X14110082>
15. Baibakov S. V. System of complex automation of technological preparation of production. *Programmye produkty i sistemy* = Software Products and Systems. 2010; 1:85–87. Available at: <http://www.swsys.ru/index.php?page=article&id=2437> (In Russ.)
16. Brovtsin V. N. Choice of the method of adaptive control and the structure of customizable models of technological processes of agricultural production. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies and Technical Means of Mechanized Production of Crop and Livestock Production. 1996; 66:45–54. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23067702> (In Russ.)
17. Akashev Z. T. Methodology of improvement and selection of the structure of mining enterprises technological processes. *Tyazheloye mashinostroeniye* = Heavy Engineering. 2005; 12:17–19. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9482961> (In Russ.)
18. Kuznetsov P. M., Moskvina V. K. Information and technological support of flexible industrial production. *Innovatsionnaya nauka* = Innovative Science. 2016; 1(2):67–72. Available at: <https://aeterna-ufa.ru/sbornik/IN-16-1-2.pdf> (In Russ.)
19. Kuznetsov P. M., Moskvina V. K. Management of a purposeful environment for the conduct of manufacturing of products. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve* = Information Technology in Design and Production. 2016; 1:58–64. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26203215> (In Russ.)
20. Kuznetsov P. M., Moskvina V. K. Operative management of individual production. *Vestnik MGTU "STANKIN"* = MSTU STANKIN Bulletin. 2018; 1:18–22. Available at: <http://www.stankin-journal.ru/articles/1794> (In Russ.)

21. Kuznetsov P. M., Tsyrov G. A. Purpose-oriented environment of project-operational management. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve* = Information Technologies in Design and Production. 2017; 4:10–14. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30575555> (In Russ.)

22. Land A. H., Doig A. G. An automatic method of solving discrete programming problems. *Econometrica*. 1960; 28(3):497–520. DOI: <https://doi.org/10.2307/1910129>

23. Meguid S. A. *Integrated Computer-Aided Design of Mechanical Systems*. London: Elsevier Applied Science; 1987. 196 p.

24. Kuznetsov P. M., Moskvina V. K., Fedorov V. A. Information environment of technological processes support in machine-building production. *Vestnik Tambovskogo universiteta* = Tambov University Bulletin. 2017; 22(1):56–59. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28821703> (In Russ.)

Received 10.05.2018; revised 29.06.2018; published online 28.12.2018

About authors:

Alexander V. Tsyrov, Professor, Chair of System Modeling and Computer-Aided Design, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: K-1128-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2334-1962>, tias@inbox.ru

Pavel M. Kuznetsov, Professor, Chair of System Modeling and Computer-Aided Design, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: K-8831-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9237-3848>, profpol@rambler.ru

George A. Tsyrov, Associate Professor, Chair of System Modeling and Computer-Aided Design, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: P-1620-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9379-5380>, george@matias.ru

Yegor A. Yermokhin, Graduate, Chair of System Modeling and Computer-Aided Design, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, Russia), ResearcherID: K-1122-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2819-2318>, ermokhin@matias.ru

Valery K. Moskvina, Associate Professor, Chair of Metal Machines, Bauman Moscow State Technical University (5 2nd Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: L-4930-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5377-4390>, moskvina1945@mail.ru

Contribution of the authors:

A. V. Tsyrov – academic guidance, formulation of the research task and analysis of literary data; P. M. Kuznetsov – development of the mathematical apparatus of the prognostic model; G. A. Tsyrov – development of models of technological processes; Ye. A. Yermokhin – writing the draft, translation into English and editing; V. K. Moskvina – word processing, review of literary sources.

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



Разработка автоматической системы распределенного обогащения воздушного заряда тракторного дизеля

М. В. Рыблов*, Д. А. Уханов, А. П. Уханов

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

**mr3273pgsha@mail.ru*

Введение. Исследования, посвященные интенсификации рабочего процесса транспортных дизелей путем обогащения воздушного заряда определенной дозой (10–20%) углеводородного активатора (спирт, бензин, керосин, биотопливо и др.), являются актуальной и практически значимой проблемой. Несмотря на эффективность, данный способ не нашел массового применения в технике, так как известные механические устройства для обогащения воздушного заряда не обеспечивают точную дозировку и своевременную подачу активатора в дизель в различных режимах его работы.

Материалы и методы. Решением данной проблемы является разработка автоматической системы распределенного обогащения воздушного заряда, осуществляющей впрыск активатора в ветви впускного трубопровода дизеля с помощью электромагнитных форсунок, управляемых электронным блоком. Такая система должна обеспечивать работу форсунок по алгоритму, соответствующему порядку работы цилиндров дизеля, а также вычислять продолжительность впрыска, соответствующую заданной дозе активатора. Для программирования электронного блока управления теоретически рассчитана продолжительность впрыска определенной дозы активатора и обоснован алгоритм работы электромагнитных форсунок (на примере тракторного дизеля Д-243).

Результаты исследования. Установлено, что при распределенном обогащении воздушного заряда в зависимости от дозы активатора и нагрузочно-скоростного режима работы дизеля массовая цикловая подача активатора может составлять от 1 мг/цикл до 13 мг/цикл, а продолжительность впрыска активатора – от 0,27 мс до 3,5 мс. Для практической реализации способа распределенного обогащения воздушного заряда применительно к дизелю Д-243 трактора МТЗ-82.1 разработана автоматическая система, содержащая бак для активатора, фильтр, электрический насос, рампу, регулятор давления, электромагнитные форсунки, электронный блок управления, датчик расхода топлива, датчик фаз и частоты вращения коленчатого вала.

Обсуждение и заключение. Разработанная, изготовленная и испытанная система решает проблему практической реализации автоматического обогащения воздушного заряда активатором в такте впуска и способствует улучшению мощностных, топливно-экономических и экологических показателей транспортных дизелей.

Ключевые слова: дизель, воздушный заряд, обогащение воздушного заряда, активатор, система, электромагнитная форсунка, электронный блок управления, датчик

Для цитирования: Рыблов М. В., Уханов Д. А., Уханов А. П. Разработка автоматической системы распределенного обогащения воздушного заряда тракторного дизеля // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 4. С. 523–536. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.523-536>



Благодарности: Авторы благодарят инженера АО «ПНИЭИ» А. В. Грунюшкина за помощь в изготовлении электронного блока и программировании микроконтроллера; президента НПО «ГАКС-Армсервис», доктора технических наук, профессора С. В. Сейнова за содействие в изготовлении модернизированного впускного трубопровода дизеля. Авторы выражают отдельную благодарность анонимным рецензентам за объективный анализ представленной статьи.

Developing the Automatic System for the Multi-Point Fumigation of Air Charge in the Diesel Engine

M. V. Ryblov*, D. A. Ukhanov, A. P. Ukhanov

Penza State Agrarian University (Penza, Russia)

*mr3273pgsha@mail.ru

Introduction. The study deals with enhancement of an automotive diesel engine duty cycle through fumigating air charge by the certain dose (10–20 %) of hydrocarbon activator (alcohol, gasoline, kerosene, biodiesel, etc.). This is a relevant problem in engineering. In spite of its effectiveness, this method has not yet been widely applied to machinery. The existing mechanical devices for fumigating air charge do not provide the exact dosage of activator and its timely supply in a diesel engine at different operating modes.

Materials and Methods. The solution for this problem may be the development of an automatic system for the multi-point fumigation of air charge. This device performs the injection of activator into the diesel engine intake manifold branches with the help of electromagnetic injectors managed by the electronic control unit. The system should provide the injectors operation by the algorithm for the cylinders firing order and calculate the injection duration for the adjusted activator dose. For the programming of the Electronic Control Unit, the injection duration of the exact activator dose was theoretically calculated. The algorithm of electromagnetic injectors operation was substantiated (for D-243 tractor diesel engine by the example).

Results. To implement the multi-point fumigation of air charge, it was determined that depending on the activator dose and the engine speed and load mode, the cyclic dose of activator amounts may be from 1 mg per cycle to 13 mg per cycle, while the activator injection duration is from 0.27 ms to 3.5 ms. For the practical realization of the multi-point fumigation of air charge for D-243 diesel engine of MTZ-82.1 tractor the automatic system was designed. The system consists of an activator tank, filter, electric pump, rail, pressure regulator, electromagnetic injectors, electronic control unit, fuel consumption sensor, and sensor of phase and crankshaft speed.

Conclusions. The device solves the problem of the automatic fumigation of air charge at the intake stroke and helps to improve power, fuel economy and environmental indicators of the automotive diesel engines.

Keywords: diesel engine, fumigation of air charge, activator, system, electromagnetic injector, electronic control unit, sensor

For citation: Ryblov M. V., Ukhanov D. A., Ukhanov A. P. Developing the Automatic System for the Multi-Point Fumigation of Air Charge in the Diesel Engine. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(4):523–536. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.523-536>

Acknowledgements: The authors thank the engineer of PNIEI company A. V. Grunushkin for help in invention of Electronic Control Unit and in programming of microcontroller; the President of GAKS-Armservis Research and Manufacturing Association, D.Sc. (Engineering), professor S. V. Seynov for help in manufacturing of the modified intake manifold for diesel engine. Special thanks to anonymous reviewers for the objective analysis of the article.



Введение

Основные энергетические мощносты в АПК РФ представлены дизелями тракторной, комбайновой и автомобильной техники. Повышение энергоэффективности и экологической безопасности такой техники до сих пор представляет актуальную и практически значимую проблему. В данном направлении значительный научный и практический интерес в России и за рубежом представляют исследования, связанные с обогащением воздушного заряда дизеля углеводородным активатором. Данный способ заключается, как правило, в одноточечной подаче определенной дозы (10–20 %) мелкораспыленного активатора (спирт, бензин, керосин, биотопливо и др.) во впускной трубопровод дизеля в такте впуска свежего заряда. При этом моторное дизельное топливо, подаваемое в цилиндр дизеля в конце такта сжатия штатной системой топливоподачи, впрыскивается не в воздушный поток, а в активаторно-воздушную смесь, образованную во внутренней полости впускного трубопровода и содержащую активные очаги воспламенения, способствующие интенсификации процесса сгорания. В результате за счет повышения полноты сгорания совокупного топлива (моторное топливо + активатор) происходит улучшение индикаторных, эффективных и экологических показателей дизеля [1–4].

Несмотря на известность и эффективность данного способа, одноточечное обогащение не нашло массового применения в автотракторной технике, поскольку известные механические устройства для обогащения воздушного заряда не способны обеспечить точную подачу заданной дозы активатора в различных нагрузочных и скоростных режимах работы дизеля. При этом подача активатора не согласована с тактами впуска свежего воздушного заряда; возникает существенная не-

равномерность распределения активаторно-воздушной смеси по цилиндрам двигателя.

Для решения указанной проблемы необходимо разработать такую систему обогащения воздушного заряда, которая обеспечивала бы точное автоматическое поддержание заданной дозы активатора во всем диапазоне нагрузочных и скоростных режимов работы дизеля, своевременную подачу активатора во время такта впуска свежего заряда в одном из цилиндров и равномерное распределение образованной во впускном трубопроводе активаторно-воздушной смеси по цилиндрам двигателя.

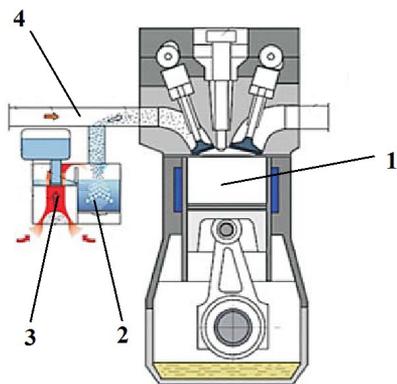
Обзор литературы

В СССР и за рубежом исследования по обогащению воздушного заряда ДВС начали проводиться с 30-х гг. XX в.: вначале для форсирования двигателей танков, самоходных машин и авиационных дизелей, позднее – для улучшения топливной экономичности и снижения токсичности отработавших газов транспортных средств. Для подачи активатора во впускной трубопровод ДВС применялись различные механические устройства: карбюратор, дозатор, испаритель или дополнительная форсунка. Обогащение воздушного заряда, например, бензином способствовало повышению мощности дизеля и снижению выбросов оксидов азота, а применение спиртовых активаторов – значительному снижению дымности отработавших газов [4–6].

Несмотря на технический эффект от использования активаторов, механические устройства для обогащения воздушного заряда не получили широкого распространения, т. к. обладали одним общим недостатком, а именно невозможностью автоматического обеспечения заданной дозы активатора в различных нагрузочных и скоростных режимах работы дизеля. Поэтому к концу XX в. интерес к данному на-

учному направлению снизился, а совершенствование конструкции дизелей происходило по другим направлениям: повышение давление впрыска топлива, электронное управление впрыском, рециркуляция отработавших газов, использование каталитических нейтрализаторов и сажевых фильтров и т. п.¹. Однако в настоящее время интерес исследователей к обогащению воздушного заряда различными активаторами возобновляется, поскольку законодательные нормы токсичности отработавших газов ДВС во всем мире продолжают ужесточаться, а существующие методы и средства улучшения экологической чистоты двигателей уже исчерпали свой потенциал²⁻³ [7–8].

Так, одной из последних известных работ по обогащению воздушного заряда являются исследования Технического университета Румынии с подачей в дизель биоэтанола, обработанного ультразвуком. Для подачи данного активатора в одноцилиндровый дизель использовался карбюратор, оснащенный ультразвуковым излучателем (рис. 1). Результаты исследований свидетельствуют о некотором улучшении топливной экономичности дизеля и снижении выбросов оксидов азота. Однако проблема автоматической дозировки активатора в данной работе не была решена, т. к. в условиях стендовых испытаний подача биоэтанола регулировалась вручную путем изменения степени открытия дроссельной заслонки карбюратора [9].



Р и с. 1. Схема установки для обогащения воздушного заряда активатором, обработанным ультразвуком: 1 – дизель; 2 – ультразвуковой излучатель; 3 – карбюратор; 4 – впускной трубопровод

F i g. 1. The scheme of the test bench for fumigating of air charge with the activator modified by ultrasound: 1 – diesel engine; 2 – ultrasonic emitter; 3 – carburetor; 4 – intake manifold

Для обеспечения высокоточной дозировки активатора наиболее целесообразно осуществлять обогащение воздушного заряда с помощью электромагнитной форсунки, управляемой электронным блоком [10]. Такое решение предложено, например, в системе по патенту США № 6679224, содержащей насос для подачи дизельного топлива, насос для подачи активатора, форсунку впрыска топлива в камеру сгорания дизеля и форсунку впрыска активатора во впускной трубопровод. Работой форсунки впрыска активатора на основании сигнала, поступающего с датчика температуры охлаждающей

¹ Грехов Л. В., Габитов И. И., Неговора А. А. Конструкция, расчет и технический сервис топливоподающих систем дизелей : учебное пособие. М. : Легион-Автодата, 2013. 292 с.

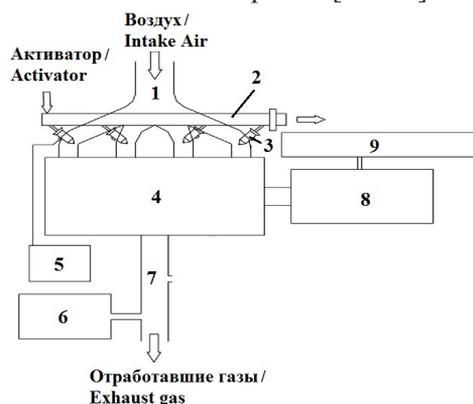
² Thermodynamic modeling of ethanol fumigation in a diesel engine / R. Situ [et al.] // 20th International Congress on Modelling and Simulation. 2013. P. 1568–1574. URL: <https://www.mssanz.org.au/modsim2013/G6/situ.pdf>

³ Janousek G. S. Evaluation of ethanol and water introduction via fumigation on efficiency and emissions of a compression ignition engine using an atomization technique : thesis. Lincoln : University of Nebraska, 2010. 112 p. URL: <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.ru/&httpsredir=1&article=1008&context=biosysengdiss>



жидкости и датчика состава рабочей смеси, управляет электронный блок. Система дополнительно оснащена устройством для приготовления активатора на борту транспортного средства путем разделения дизельного топлива на тяжелую («топливную») и легкую («активаторную») фракции [11].

В США, Европе и Китае активно ведутся научно-исследовательские работы по обогащению воздушного заряда дизелей, штатно оснащенных системами электронного впрыска топлива Common-Rail. В качестве активаторов в основном используются спирты (этанол и метанол), а приоритетной задачей является улучшение экологических показателей ДВС. Последней тенденцией является использование систем распределенного впрыска активатора в ветви впускного трубопровода электромагнитными форсунками, количество которых равно количеству цилиндров дизеля. Один из вариантов такой системы показан на рис. 2 [12–14].



Р и с. 2. Схема установки для распределенного обогащения воздушного заряда: 1 – впускной трубопровод; 2 – рампа; 3 – электромагнитные форсунки; 4 – дизель; 5 – электронный блок управления; 6 – газоанализатор; 7 – выпускной трубопровод; 8 – динамометрический стенд; 9 – пульт управления двигателем

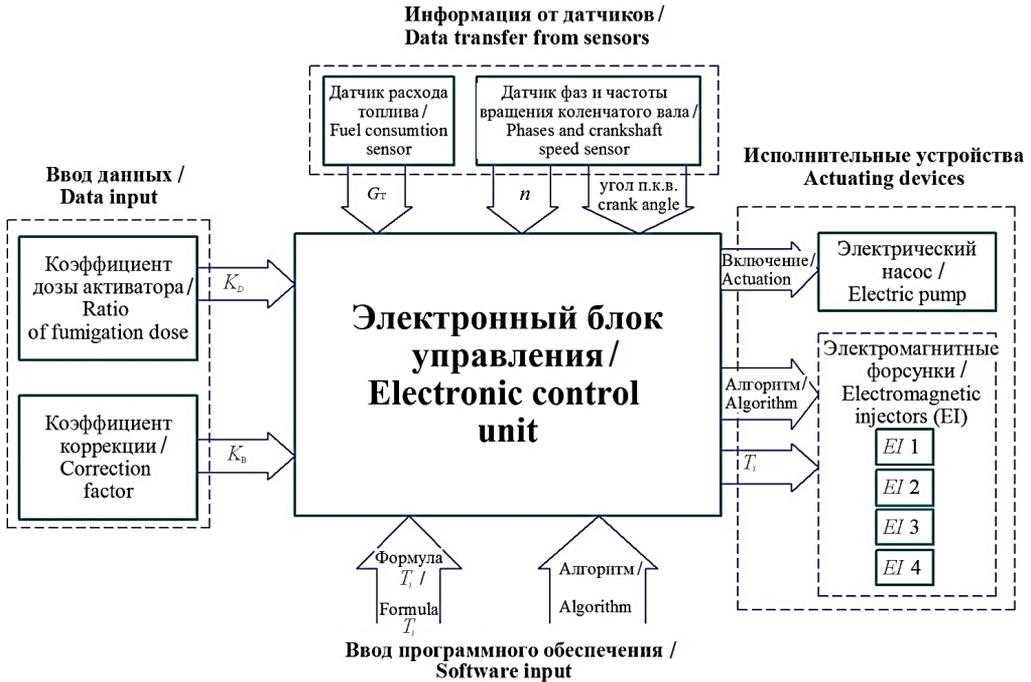
Fig. 2. The scheme of the test bench for the multi-point fumigation of air charge: 1 – intake manifold; 2 – rail; 3 – electromagnetic injectors; 4 – diesel engine; 5 – electronic control unit; 6 – gas analyzer; 7 – exhaust manifold; 8 – dynamometer brake; 9 – engine control board

Таким образом, для точного поддержания заданной дозы активатора на различных режимах работы дизеля, ее своевременной подачи в такте впуска и равномерного распределения активаторно-воздушной смеси по цилиндрам двигателя необходимо разработать автоматическую систему распределенного обогащения воздушного заряда, осуществляющую впрыск активатора в ветви впускного трубопровода дизеля электромагнитными форсунками, управляемыми электронным блоком по информативным сигналам с соответствующих датчиков.

Материалы и методы

Принцип построения такой автоматической системы показан на рис. 3. Основу системы составляет электронный блок управления (ЭБУ), который должен обеспечивать функционирование исполнительных устройств: включение электрического насоса и работу электромагнитных форсунок по определенному алгоритму, соответствующему порядку работы цилиндров дизеля. Основным выходным параметром ЭБУ является длительность управляющего импульса T_i (продолжительность впрыска активатора электромагнитной форсункой), соответствующая требуемой цикловой подаче активатора. Поэтому ЭБУ должен быть изготовлен на основе микроконтроллера, в программное обеспечение которого закладывается формула для расчета длительности T_i и алгоритм работы электромагнитных форсунок, осуществляющих распределенный впрыск активатора в соответствующие ветви впускного трубопровода дизеля.

ЭБУ должен обладать простотой настройки системы на требуемую дозу активатора (10 или 20 % от массового расхода моторного топлива) и возможностью коррекции цикловой подачи активатора (ЦПА), учитывающей изменение пропускной способности электромагнитной форсунки при использовании активаторов с раз-



Р и с. 3. Функциональная схема автоматической системы распределенного обогащения воздушного заряда дизеля: K_D – коэффициент дозы активатора; K_B – коэффициент коррекции; G_T – массовый расход моторного топлива; n – частота вращения коленчатого вала; п.к.в. – поворот коленчатого вала; T_i – продолжительность впрыска активатора; EI 1 – EI 4 – электромагнитные форсунки

Fig. 3. The functional scheme of the automatic system for the multi-point fumigation of air charge in the diesel engine: K_D – ratio of fumigation dose; K_B – correction factor; G_T – mass fuel consumption; n – crankshaft speed; T_i – injector pulse width; EI 1 – EI 4 – electromagnetic injectors

личными физико-химическими свойствами. Таким образом, в конструкции ЭБУ должны быть предусмотрены задающие клавиши для ввода коэффициента дозы активатора K_D и коэффициента коррекции цикловой подачи активатора K_B .

Для вычисления микроконтроллером ЭБУ требуемой цикловой подачи активатора в зависимости от нагрузочного и скоростного режима работы дизеля необходима информация о текущих параметрах работы двигателя: массовом расходе моторного топлива (G_T) и частоте вращения коленчатого вала (n), а для обеспечения фазированного впрыска активатора в такте впуска и работы форсунок по заданному алгоритму – информация об угле поворота коленчатого вала. Поэтому для работы ЭБУ необходимы

соответствующие датчики, информативные сигналы с которых содержат сведения об указанных параметрах.

Таким образом, величина требуемой цикловой подачи активатора ($g_{\text{ца}}$, г/цикл), подаваемого в такте впуска для обогащения воздушного заряда дизеля, зависит от параметров, характеризующих нагрузочный и скоростной режимы работы дизеля:

$$g_{\text{ца}} = f(G_T, n), \quad (1)$$

где G_T – массовый расход моторного топлива, кг/ч; n – частота вращения коленчатого вала дизеля, мин⁻¹.

Цикловая подача активатора связана с массовым расходом топлива через соотношение



$$g_{\text{ца}} = K_D \cdot g_{\text{ит}} = K_D \cdot \frac{G_T \cdot \tau}{0,12 \cdot n \cdot z}, \quad (2)$$

где K_D – коэффициент дозы активатора (при дозе активатора 10 % коэффициент $K_D = 0,1$; при дозе 20 % $K_D = 0,2$); $g_{\text{ит}}$ – цикловая подача моторного топлива, г/цикл; $\tau = 4$ – тактность дизеля; z – число цилиндров дизеля.

Цикловая подача активатора прямо пропорциональна длительности управляющего импульса T_i (мс), подаваемого на электромагнитную форсунку, поэтому данные величины связаны соотношением [15]:

$$T_i = \frac{60 \cdot 10^3 \cdot K_B \cdot g_{\text{ца}}}{C_{\Pi}} = \frac{2 \cdot 10^6 \cdot K_B \cdot K_D \cdot G_T}{C_{\Pi} \cdot n \cdot z}, \quad (3)$$

где K_B – коэффициент коррекции ЦПА; C_{Π} – статическая производительность электромагнитной форсунки, г/мин.

Массовый расход топлива в единицу времени G_T определяется с помощью расходомера топлива, который используется в качестве датчика нагрузочного режима и вырабатывает информативные импульсные сигналы определенной частоты $N_{\text{имп}}$ на 1 л моторного топлива. При этом число импульсов, вырабатываемых расходомером в секунду (частота f , Гц), прямо пропорционально расходу G_T :

$$f = \frac{G_T \cdot N_{\text{имп}}}{3600 \rho_{\text{дт}}}, \quad (4)$$

где $\rho_{\text{дт}}$ – плотность дизельного топлива, г/см³.

Выразив из формулы (4) расход G_T и подставив его в формулу (3), получим формулу для программирования микроконтроллера ЭБУ по длительности управляющего импульса T_i :

$$T_i = \frac{7,2 \cdot 10^9 \cdot K_B \cdot K_D \cdot \rho_{\text{дт}} \cdot f}{C_{\Pi} \cdot n \cdot z \cdot N_{\text{имп}}}. \quad (5)$$

Величины z , $\rho_{\text{дт}}$, $N_{\text{имп}}$ и C_{Π} зависят от конструкции дизеля, марки моторно-

го топлива, характеристик расходомера топлива, пропускной способности электромагнитной форсунки и вида активатора, используемого для обогащения воздушного заряда. Если данные величины известны и их считать константами, то в программное обеспечение микроконтроллера ЭБУ вводится формула, представляющая собой функцию четырех переменных:

$$T_i = f(K_B, K_D, f, n). \quad (6)$$

При этом программа микроконтроллера ЭБУ должна не только вычислять значение длительности импульсов T_i , но и обеспечивать их своевременную подачу в обмотки электромагнитных форсунок в определенной последовательности (по алгоритму). Данный алгоритм зависит от порядка работы цилиндров дизеля, а также количества и расположения цилиндров (или ветвей впускного трубопровода).

Рассмотрим такой алгоритм на примере тракторного дизеля Минского моторного завода Д-243 (4Ч11/12,5).

Конструктивной особенностью данного дизеля является невозможность установки индивидуальных электромагнитных форсунок для каждого цилиндра, т. к. на четыре цилиндра приходится только две ветви впускного трубопровода. Поэтому распределенное обогащение воздушного заряда на данной модели дизеля было реализовано с помощью двух электромагнитных форсунок, первая из которых осуществляет обогащение воздушного заряда, поступающего в первый и второй цилиндры, вторая – заряда, поступающего в третий и четвертый цилиндры. В соответствии с порядком работы цилиндров дизеля 1-3-4-2 порядок работы электромагнитных форсунок будет 1-2-2-1. Если за начальный сигнал датчика фаз принять момент начала такта впуска во втором цилиндре, то порядок работы электромагнитных форсунок примет вид 1-1-2-2. Таким образом, форсун-

ки осуществляют попарный последовательный впрыск активатора в ветви впускного трубопровода в соответствии с диаграммой, представленной на рис. 4 [15].

Результаты исследования

Для вывода окончательной формулы по расчету продолжительности T_i , подставим в выражение (5) известные значения, которые будут являться константами: число цилиндров дизеля Д-243 $z = 4$, плотность моторного топлива $\rho_{дт} = 0,82 \text{ г/см}^3$, частота импульсов расходомера топлива $N_{имп} = 800 \text{ импульсов/л}$, статическая производительность электромагнитной форсунки $C_{п} = 200 \text{ г/мин}$.

Сгруппировав и перемножив все константы, получим формулу, которая вводится в программное обеспечение микроконтроллера ЭБУ:

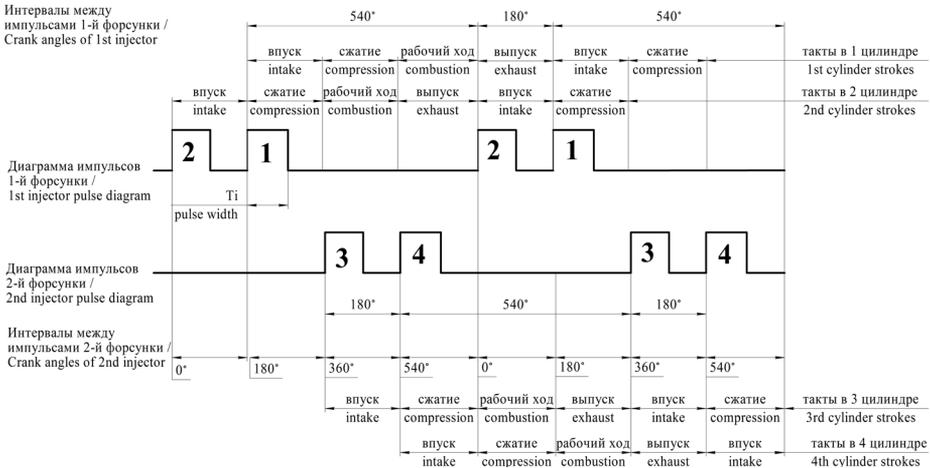
$$T_i = \frac{7,2 \cdot 10^9 \cdot 0,82 \cdot K_B \cdot K_D \cdot f}{200 \cdot 4 \cdot 800 \cdot n} = 9225 \cdot \frac{K_B \cdot K_D \cdot f}{n}, \text{ мс.} \quad (7)$$

Результаты расчетов по формулам (2) и (7) показывают, что величина цик-

ловой подачи активатора может варьироваться от 1 мг/цикл (при 10%-ной дозе активатора и работе дизеля в режиме холостого хода) до 13 мг/цикл (при 20%-ной дозе активатора и работе дизеля в номинальном режиме). При этом длительность импульса T_i , подаваемого в обмотку электромагнитной форсунки, составляет от 0,27 мс до 3,5 мс.

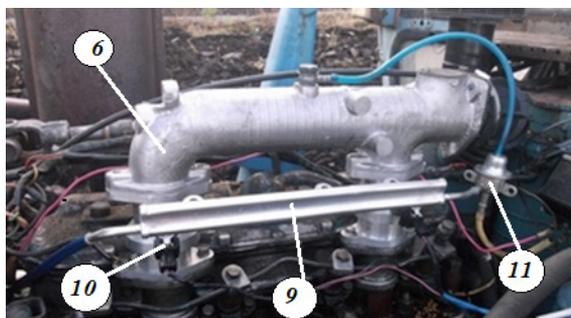
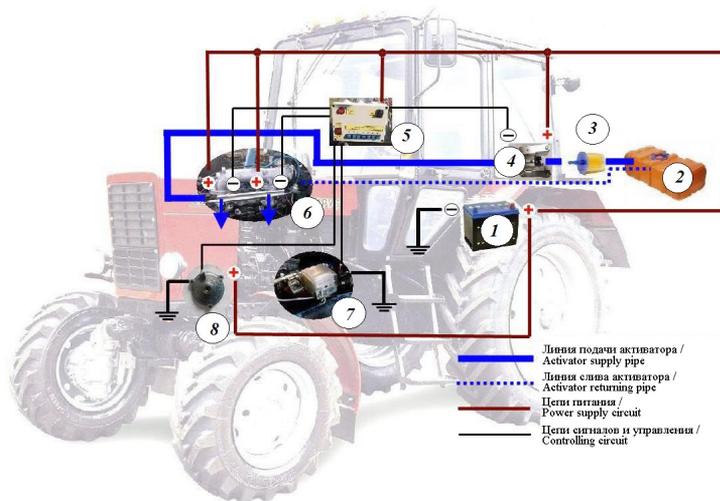
На основании полученных результатов теоретических исследований была разработана и запатентована автоматическая система распределенного обогащения воздушного заряда активатором применительно к дизелю Д-243 трактора МТЗ-82.1 [16–18].

Система (рис. 5) содержит бак 2 для активатора, фильтр 3, электрический насос 4, ЭБУ 5, модернизированный впускной трубопровод 6, датчик расхода топлива (расходомер) 7, датчик фаз и частоты вращения коленчатого вала 8. Модернизированный трубопровод 6 установлен взамен штатного впускного трубопровода и оснащен рампой 9, электромагнитными форсунками 10 и регулятором давления 11. Электрические цепи питания ЭБУ 5, насоса 4, датчиков 7 и 8, форсунок 10 подклю-



Р и с. 4. Диаграмма управляющих импульсов при распределенном обогащении воздушного заряда четырехцилиндрового дизеля двумя электромагнитными форсунками (1, 2, 3, 4 – номера цилиндров, в которых происходит такт впуска)

F i g. 4. The control pulse diagram for multi-point fumigation of air charge on four-cylinder diesel engine with two electromagnetic injectors (1, 2, 3, 4 are the numbers of cylinders at the intake stroke)



Р и с. 5. Система распределенного обогащения воздушного заряда дизеля Д-243 трактора МТЗ-82.1:
 1 – источник тока; 2 – бак для активатора; 3 – фильтр; 4 – электрический насос; 5 – ЭБУ;
 6 – модернизированный впускной трубопровод; 7 – датчик расхода топлива;
 8 – датчик фаз и частоты вращения коленчатого вала; 9 – рампа;
 10 – электромагнитные форсунки; 11 – регулятор давления

Fig. 5. The system for multi-point fumigation of air charge on D-243 diesel engine of MTZ-82.1 tractor:
 1 – power source; 2 – activator tank; 3 – filter; 4 – electric pump; 5 – electronic control unit;
 6 – modified intake manifold; 7 – fuel consumption sensor; 8 – sensor of phase and crankshaft speed;
 9 – rail; 10 – electromagnetic injectors; 11 – pressure regulator

ны к источнику тока 1 бортовой сети трактора.

ЭБУ 5 оснащен клавишей «Пуск/Сброс» и задающими клавишами для ввода коэффициентов дозы (K_D) и коррекции цикловой подачи (K_B) активатора. Основным элементом электрической схемы ЭБУ является микроконтроллер⁴ [19], в программу которого заложены

алгоритм работы электромагнитных форсунок и формула (7) для вычисления длительности управляющего импульса T_i . К ЭБУ подключены датчики 7 и 8, электрический насос 4 и электромагнитные форсунки 10.

Датчик-расходомер 7 предназначен для согласования заданной дозы активатора (10 или 20 %) и массового рас-

⁴ Рыблов М. В., Матвеев В. А., Новичков А. В. Электронный блок управления системы распределенного обогащения воздушного заряда дизеля // Агропромышленный комплекс: состояние, проблемы, перспективы : мат-лы XIII Междунар. науч.-практ. конф. Пенза : РИО ПГАУ, 2017. С. 160–162.

хода моторного топлива, информация о котором поступает в микроконтроллер ЭБУ в виде импульсного сигнала определенной частоты (параметр f). Датчик-расходомер роторно-поршневого типа установлен в линии низкого давления штатной системы топливоподдачи дизеля между фильтром грубой очистки и топливоподкачивающим насосом.

В узле привода топливного насоса высокого давления (ТНВД) смонтирован датчик фаз и частоты вращения коленчатого вала 8. Работа датчика основана на эффекте Холла. Момент начала такта впуска в цилиндрах дизеля определяется по углу поворота кулачкового вала ТНВД, что служит опорным сигналом для срабатывания электромагнитных форсунок. Кроме того, с датчика 8 в блок ЭБУ поступает информация о скоростном режиме дизеля (параметр n), т. к. частота вращения коленчатого вала прямо пропорциональна частоте вращения кулачкового вала ТНВД.

Система работает следующим образом. В ЭБУ 5 подается напряжение питания от источника тока 1. После пуска и прогрева дизеля оператор клавишами на панели ЭБУ задает коэффициенты K_D и K_B . После нажатия клавиши «Пуск/Сброс» происходит включение электрического насоса 4, который подает активатор в рампу 9 и далее – к электромагнитным форсункам 10.

Микроконтроллер ЭБУ обрабатывает информативные сигналы (параметры f и n), поступающие с датчиков 7 и 8. Кроме того, микроконтроллер обрабатывает введенные оператором значения коэффициентов K_D и K_B . На основании полученных параметров микроконтроллер по формуле (7) вычисляет значение длительности импульса T_i , подаваемого на электромагнитную форсунку, и определяет момент начала впрыска активатора форсунками (такты впуска). Управляющие импульсы, вырабатываемые микроконтроллером, подаются в электрические цепи элек-

тромагнитных форсунок, осуществляющих впрыск активатора в ветви впускного трубопровода дизеля по алгоритму, соответствующему порядку работы цилиндров дизеля.

При изменении нагрузочного и скоростного режимов работы дизеля изменяются и информативные сигналы, поступающие с датчиков 7 и 8. В результате изменения параметров f и n микроконтроллер вычисляет новое значение продолжительности импульса T_i , подаваемого в обмотки электромагнитных форсунок. При этом изменится цикловая подача активатора в соответствии с предварительно заданными коэффициентами K_D и K_B .

Если при работе дизеля на малых нагрузках пропускная способность электромагнитных форсунок 10 снизится и станет меньше производительности электрического насоса 4, давление активатора в рампе повысится, сработает регулятор давления 11, и произойдет перепуск избыточного количества активатора обратно в бак, в результате чего давление активатора в рампе стабилизируется.

Для прекращения подачи активатора в дизель оператор нажимает клавишу «Пуск/Сброс». При этом происходит размыкание цепей питания электрического насоса 4 и электромагнитных форсунок 10, после чего можно задать новые значения коэффициентов K_D и K_B .

Обсуждение и заключение

Представленная методика расчета параметров управляющих импульсов и алгоритм работы электромагнитных форсунок применимы для различных моделей дизелей при оснащении их автоматической системой распределенного обогащения воздушного заряда активатором. ЭБУ является универсальным для различных типов дизелей, при этом в зависимости от числа, расположения и порядка работы цилиндров изменяется только



программное обеспечение микроконтроллера.

Разработанная автоматическая система распределенного обогащения воздушного заряда обеспечивает точное поддержание заданной дозы активатора во всем диапазоне нагрузочных и скоростных режимов работы дизеля, подачу активатора, согласованную с тактами выпуска свежего воздушного заряда в цилиндры дизеля,

и равномерное распределение активаторно-воздушной смеси по цилиндрам.

Таким образом, результаты исследования свидетельствуют о практической реализации способа распределенного обогащения воздушного заряда на автотракторной технике, что способствует улучшению мощностных, топливно-экономических и экологических показателей дизелей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Review on alcohol fumigation on diesel engine : A viable alternative dual fuel technology for satisfactory engine performance and reduction of environment concerning emission / A. Imran [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 26. P. 739–751. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.070>
2. **Уханов А. П., Рыблов М. В., Уханов Д. А.** Обогащение воздушного заряда тракторных дизелей углеводородными активаторами : монография. Пенза : РИО ПГСХА, 2015. 199 с.
3. **Рыблов М. В., Уханов А. П., Уханов Д. А.** Повышение производительности пахотного агрегата обогащением воздушного заряда тракторного дизеля на режиме перегрузок // *Нива Поволжья*. 2013. № 2. С. 93–99. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-proizvoditelnosti-pahotnogo-agregata-obogascheniem-vozdushnogo-zaryada-traktornogo-dizelya-na-rezhime-peregruzok>
4. Effect of gasoline fumigation on diesel engine performance and emissions / L. J. Ou [et al.] // *Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vol. 130-134. P. 1744–1748. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.130-134.1744>
5. **Yao C., Pan W., Yao A.** Methanol fumigation in compression-ignition engines : A critical review of recent academic and technological developments // *Fuel*. 2017. Vol. 209. P. 713–732. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.08.038>
6. **Qudais M., Haddad O., Qudaisat M.** The effect of alcohol fumigation on diesel engine performance and emissions // *Energy Conversion and Management*. 2000. Vol. 41, Issue 4. P. 389–399. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00099-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00099-0)
7. Experimental studies on fumigation of ethanol in a small capacity Diesel engine / B. S. Chauhan [et al.] // *Energy*. 2011. Vol. 36, Issue 2. P. 1030–1038. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.005>
8. Impact of n-butanol and hydrous ethanol fumigation on the performance and pollutant emissions of an automotive diesel engine / A. F. Lopez [et al.] // *Fuel*. 2015. Vol. 153. P. 483–491. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.03.022>
9. Effect of bioethanol ultrasonic generated aerosols application on diesel engine performances / F. Mariasiu [et al.] // *Thermal science*. 2015. Vol. 19, no. 5. P. 1931–1941. DOI: <https://doi.org/10.2298/TSCI140703108M>
10. **Hansdah D., Murugan S.** Bioethanol fumigation in a DI diesel engine // *Fuel*. 2014. Vol. 130. P. 324–333. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.047>
11. Patent 6679224 US, Int. CI F02B7/06. Method and apparatus for operating a diesel engine under stoichiometric and slightly fuel-rich conditions / Stanglmaier R. H.; Southwest Research Institute; № 09/992373; Filed Nov., 6, 2001; Publ. Jan. 20, 2004. URL: <http://www.freepatentsonline.com/6679224.pdf>
12. Study on cyclic variability of dual fuel combustion in a methanol fumigated diesel engine / Q. Wang [et al.] // *Fuel*. 2016. Vol. 164. P. 99–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.003>
13. Comparison of emissions of a direct injection diesel engine operating on biodiesel with emulsified and fumigated methanol / C. H. Cheng [et al.] // *Fuel*. 2008. Vol. 87, Issues 10-11. P. 1870–1879. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.01.002>

14. Investigation of operating range in a methanol fumigated diesel engine / Q. Wang [et al.] // Fuel. 2015. Vol. 140. P. 164–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.067>

15. **Рыблов М. В., Уханов А. П., Уханов Д. А.** Теоретическое обоснование работы системы двухточечного обогащения воздушного заряда дизеля // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. № 2 (38). С. 185–191. DOI: <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2017-2-185-191>

16. Патент 2330173 РФ, МПК F02M 25/00; F02D 19/00. Устройство для обогащения воздушного заряда / А. П. Уханов, Д. А. Уханов, В. А. Рачкин, М. В. Рыблов; Пенз. гос. с-х. академия. № 2006127884/06; Заявл. 31.07.2006; Оpubл. 27.07.2008; Бюл. № 21. URL: <http://allpatents.ru/patent/2330173.html>

17. Патент на полезную модель 157301 РФ МПК F02D 19/12, F02M 43/00. Система впрыска активатора во впускной трубопровод дизеля / М. В. Рыблов, А. П. Уханов, Д. А. Уханов, С. А. Симаков; Пенз. гос. с-х. академия. № 2015102646; Заявл. 27.01.2015; Оpubл. 27.11.2015; Бюл. № 33.

18. Патент на полезную модель 177583 РФ МПК F02M 43/00, F02D19/08; F02B 48/00. Устройство для дозированной подачи активатора в дизель / А. П. Уханов, Д. А. Уханов, М. В. Рыблов, С. А. Симаков. № 2017122353; Заявл. 26.04.2016; Оpubл. 01.03.2018; Бюл. № 7.

19. **Рыблов М. В., Уханов А. П., Уханов Д. А.** Электронная система распределенного обогащения воздушного заряда тракторного дизеля // Нива Поволжья. 2018. № 1 (46). С. 114–120. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektronnaya-sistema-raspredelennogo-obogascheniya-vozdushnogo-zaryada-traktornogo-dizelya>

Поступила 18.06.2018; принята к публикации 27.07.2018; опубликована онлайн 28.12.2018

Об авторах:

Рыблов Михаил Владимирович, доцент кафедры тракторов, автомобилей и теплоэнергетики, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет» (440014, Россия, г. Пенза, ул. Ботаническая, д. 30), кандидат технических наук, ResearcherID: M-2237-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9750-9887>, mr3273pgsha@mail.ru

Уханов Денис Александрович, профессор кафедры тракторов, автомобилей и теплоэнергетики, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет» (440014, Россия, г. Пенза, ул. Ботаническая, д. 30), доктор технических наук, ResearcherID: M-2694-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9507-893X>, уханов_денис_a@mail.ru

Уханов Александр Петрович, профессор, заведующий кафедрой тракторов, автомобилей и теплоэнергетики, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет» (440014, Россия, г. Пенза, ул. Ботаническая, д. 30), доктор технических наук, ResearcherID: M-2681-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3433-0281>, dispgau@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

М. В. Рыблов – литературный и патентный анализ, проведение теоретических исследований, изготовление опытного образца системы распределенного обогащения воздушного заряда дизеля, подготовка начального варианта текста, перевод аннотации и подписей к рисункам на английский язык; Д. А. Уханов – научное руководство, формулирование основной концепции исследования и выводов, верстка и редактирование текста; А. П. Уханов – общая научная концепция, консультирование по технической части, проведение критического анализа исследования и доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



REFERENCES

1. Imran A., Varman M., Masjuki H. H., Kalam M. A. Review on alcohol fumigation on diesel engine: A viable alternative dual fuel technology for satisfactory engine performance and reduction of environment concerning emission. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013; 26:739–751. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.070>
2. Ukhanov A. P., Ryblov M. V., Ukhanov D. A. The Enrichment of Tractor Diesel Engine Air Charge with Hydrocarbon Activators: A Monograph. Penza: Penza State Agricultural Academy Publ.; 2015. 199 p. (In Russ.)
3. Ryblov M. V., Ukhanov A. P., Ukhanov D. A. Raising productivity of ploughing unit by means of enriching the air charge of tractor diesel in the mode of operation overloads. *Niva Povolzhya* = Volga Region Cornfield. 2013; 2:93–99. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-proizvoditelnosti-pahotnogo-agregata-obogascheniem-vozdushnogo-zaryada-traktornogo-dizelya-narzhime-peregruzok> (In Russ.)
4. Ou L., Wang C., Qian Y., Huang W., Zhu S. W., Sun J. Effect of gasoline fumigation on diesel engine performance and emissions. *Applied Mechanics and Materials*. 2012; 130-134:1744–1748. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.130-134.1744>
5. Yao C., Pan W., Yao A. Methanol fumigation in compression-ignition engines: A critical review of recent academic and technological developments. *Fuel*. 2017; 209:713–732. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.08.038>
6. Qudais M., Haddad O., Qudaisat M. The effect of alcohol fumigation on diesel engine performance and emissions. *Energy Conversion and Management*. 2000; 41(4):389–399. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00099-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00099-0)
7. Chauhan B. S., Kumar N., Pal S. S., Jun Y. D. Experimental studies on fumigation of ethanol in a small capacity diesel engine. *Energy*. 2011; 36(2):1030–1038. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.005>
8. Lopez A. F., Cadrazco M., Agudelo A. F., Corredor L. A., Vélez J. A., Agudelo J. R. Impact of n-butanol and hydrous ethanol fumigation on the performance and pollutant emissions of an automotive diesel engine. *Fuel*. 2015; 153:483–491. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.03.022>
9. Mariasiu F., Burnete N. V., Moldovanu D. Effect of bioethanol ultrasonic generated aerosols application on diesel engine performances. *Thermal Science*. 2015; 19(5):1931–1941. DOI: <https://doi.org/10.2298/TSCI140703108M>
10. Hansdah D., Murugan S. Bioethanol fumigation in a DI diesel engine. *Fuel*. 2014; 130:324–333. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.047>
11. Patent 6679224 US, Int.Cl F02B7/06. Method and apparatus for operating a diesel engine under stoichiometric and slightly fuel-rich conditions / Stanglmaier R. H.; Southwest Research Institute; No. 09/992373; Filed 11/6/2001; Publ. 01/20/2004. Available at: <http://www.freepatentsonline.com/6679224.pdf>
12. Wang Q., Wang B., Yao C., Wu T., Wei H., Dou Z. Study on cyclic variability of dual fuel combustion in a methanol fumigated diesel engine. *Fuel*. 2016; 164:99–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.003>
13. Cheng C. H., Cheung C. S., Chan T. L. Comparison of emissions of a direct injection diesel engine operating on biodiesel with emulsified and fumigated methanol. *Fuel*. 2008; 87(10-11):1870–1879. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.01.002>
14. Wang Q., Wei L., Pan W., Yao C. Investigation of operating range in a methanol fumigated diesel engine. *Fuel*. 2015; 140:164–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.067>
15. Ryblov M. V., Ukhanov A. P., Ukhanov D. A. Theoretical operation justification of the system of two-point enrichment of the diesel air charge. *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Ulyanovsk State Agricultural Academy Bulletin. 2017; 2(38):185–191. DOI: <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2017-2-185-191> (In Russ.)
16. Patent 2330173 of the Russian Federation, IPC F02M 25/00; F02D 19/00. A device for enriching the air charge / Ukhanov A. P., Ukhanov D. A., Rachkin V. A., Ryblov M. V.; Penza State Agricultural

Academy. No. 2006127884/06; Appl. 07/31/2006; Publ. 07/27/2008; Bulletin No. 21. Available at: <http://allpatents.ru/patent/2330173.html> (In Russ.)

17. Patent for useful model 157301 of the Russian Federation IPC F02D 19/12, F02M 43/00. Activator injection system in diesel intake pipe / Ryblov M. V., Ukhanov A. P., Ukhanov D. A., Simakov S. A.; Penza State Agricultural Academy. No. 2015102646; Appl. 01/27/2015; Publ. 11/27/2015; Bulletin No. 33. (In Russ.)

18. Patent for useful model 177583 of the Russian Federation IPC F02M 43/00, F02D19 / 08; F02B 48/00. A device for dosed supply of activator to diesel / Ukhanov A. P., Ukhanov D. A., Ryblov M. V., Simakov S. A.. № 2017122353; Claim 04/26/2016; Publ. 03/01/2018; Bulletin No. 7. (In Russ.)

19. Ryblov M. V., Ukhanov D. A., Ukhanov A. P. The electronic system of the distributed enrichment of air charge in tractor diesel. *Niva Povolzhya = Volga Region Cornfield*. 2018; 1(46):114–120. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektronnaya-sistema-raspredelelnogo-obogascheniya-vozdushnogo-zaryada-traktornogo-dizelya> (In Russ.)

Received 18.06.2018; revised 27.07.2018; published online 28.12.2018

About authors:

Mikhail V. Ryblov, Associate Professor, Chair of Tractors, Automobiles and Thermal Energetics, Penza State Agrarian University (30 Botanicheskaya St., Penza 440014, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: M-2237-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9750-9887>, mr3273pgsha@mail.ru

Denis A. Ukhanov, Professor, Chair of Tractors, Automobiles and Thermal Energetics, Penza State Agrarian University (30 Botanicheskaya St., Penza 440014, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: M-2694-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9507-893X>, uxanov_denis_a@mail.ru

Alexander P. Ukhanov, Professor, Head, Chair of Tractors, Automobiles and Thermal Energetics, Penza State Agrarian University (30 Botanicheskaya St., Penza 440014, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: M-2681-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3433-0281>, dispgau@mail.ru

Contribution of the authors:

M. V. Ryblov – literary and patent analysis, performing of theoretical study, manufacturing of experimental sample of the system for multi-point fumigation of air charge in diesel engine, writing the draft, translation of the annotation and figures into English; D. A. Ukhanov – scientific management, formulating the basic research concept, drawing the conclusions, word processing and editing the text; A. P. Ukhanov – primary scientific concept, consulting in technical branch of the study, critical analysis of research and finalizing the text.

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 62-82:620.1

DOI: 10.15507/0236-2910.028.201804.537-551



Моделирование напряженно-деформированного состояния в ресурсолимитирующем соединении объемного гидропривода

П. А. Ионов*, П. В. Сенин, А. В. Столяров
ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)
*resurs-ime@yandex.ru

Введение. Статья посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния распределительной пары агрегатов объемного гидропривода и поиску путей повышения его долговечности.

Материалы и методы. В процессе исследования были использованы общепринятые положения теорий трения, надежности, упругости, механизмов и машин, математического моделирования. Для моделирования напряженно-деформированного состояния была использована система инженерного анализа ANSYS. В качестве объектов исследования выбраны распределительные пары гидронасосов 313.3.112, ГСТ-112 и Sauer Danfoss 90R075.

Результаты исследования. Получены значения действительных контактных напряжений и длительно действующей эксплуатационной нагрузки в распределительных парах агрегатов объемного гидропривода: для гидронасоса 313.3.112 – 26,93 МПа; для гидронасоса ГСТ-112 – 22,21 МПа; для гидронасоса Sauer Danfoss 90R075 – 27,12 МПа. Установлено, что наибольшим нагрузкам подвержена область, расположенная со стороны нагнетания. Это является причиной одностороннего износа сферических поверхностей, довольно часто встречающегося у снятых с эксплуатации агрегатов. Значения контактных напряжений в соединениях, упрочненных методом электроискровой обработки, в среднем на 1,4–9,4 % ниже, чем в неупрочненных. В процессе электроискровой обработки идет перераспределение напряжений по поверхности, что приводит к снижению эксплуатационной нагрузки в соединениях.

Обсуждение и заключение. Проведенное исследование позволило смоделировать напряженно-деформированное состояние в новых и упрочненных распределительных парах агрегатов объемного гидропривода в эксплуатационных условиях, а также предложить пути повышения его долговечности. Установлено, что для повышения износостойкости ресурсолимитирующего соединения и, как следствие, долговечности агрегатов объемного гидропривода необходимо обеспечить в распределительных парах максимальную удельную нагрузку большую, чем максимальная длительно действующая эксплуатационная нагрузка. Для решения данной задачи предложено создавать покрытия с высокими триботехническими свойствами методом электроискровой обработки.

© Ионов П. А., Сенин П. В., Столяров А. В., 2018



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

Ключевые слова: ресурсолимитирующее соединение, объемный гидропривод, моделирование, метод конечных элементов, несущая способность, эксплуатационная нагрузка, износостойкость, электроискровая обработка

Для цитирования: Ионов П. А., Сенин П. В., Столяров А. В. Моделирование напряженно-деформированного состояния в ресурсолимитирующем соединении объемного гидропривода // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 4. С. 537–551. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.537-551>

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

Modeling of Stress-Strain State in Connection Resource Defines of Volumetric Hydraulic Drive

P. A. Ionov*, P. V. Senin, A. V. Stolyarov

National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

**resurs-ime@yandex.ru*

Introduction. The article explores the stress-strain state of a distribution pair of aggregates of a volumetric hydraulic drive and the search for ways to increase its durability.

Materials and Methods. In the process of studying, the generally accepted principles of the theories of friction, reliability, elasticity, mechanisms and machines, and mathematical modeling were used. To simulate the stress-strain state, an engineering analysis system ANSYS was used. Distribution pairs of hydraulic pumps 313.3.112, GST-112 and Sauer Danfoss 90R075 were chosen as objects of study.

Results. As a result of the study there were obtained values of the real contact stresses and long-term current stress on the distribution of pairs of units of volumetric hydraulic drive: the 313.3.112 hydraulic pump is 26,93 MPa; for GTS-112 water pump is of 22.21 MPa for the Sauer Danfoss 90R075 hydraulic pump is 27,12 MPa. It is revealed that the area located on the discharge side is a subject to the greatest loads. This is the cause of one-sided wear of spherical surfaces, which is quite common in units decommissioned. The values of contact stresses in the joints hardened by the method of electric spark machining are on average 1.4 and 9.4 % lower than in not unhardened. In the process of electric spark machining there is a redistribution of stresses on the surface that leads to a decrease of the operating load in the connections.

Conclusions. The study allowed modelling the stress-strain state in new and hardened distribution pairs of volumetric hydraulic drive units under operating conditions and suggesting ways to increase its durability. It was established that to increase the wear resistance of a resolving compound and the durability of the volumetric hydraulic drive aggregates, it is necessary to ensure that in distribution pairs the maximum bearing capacity is greater than the maximum long-term operating load in these connections. To solve this problem, it is proposed to create coatings with high tribotechnical properties by the method of electric spark machining.

Keywords: resource-limiting compound, volumetric hydraulic drive, modeling, finite element method, bearing capacity, operating load, wear resistance, electrospark machining

For citation: Ionov P. A., Senin P. V., Stolyarov A. V. Modeling of Stress-Strain State in Connection Resource Defines of Volumetric Hydraulic Drive. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(4):537–551. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.537-551>



Acknowledgements: The study was conducted with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (state task, direction: development of competencies) project № 11.3416.2017/4.6 “Development of technologies and tools to improve the durability of parts, assemblies, machines and equipment by creating nano-structured coatings sources of concentrated energy”.

Введение

Развитие, совершенствование и эффективное ведение сельского хозяйства невозможно без использования энергонасыщенной высокопроизводительной техники, которая должна уменьшать долю ручного труда в разнообразных технологических операциях. Анализ конструкций современной сельскохозяйственной техники показал, что на ее надежность наибольшее влияние оказывает объемный гидропривод. В трансмиссии современной техники объемный гидропривод применяется более чем в 35 % случаев, в то же время в доремонтный период эксплуатации на него приходится до 20 % отказов [1].

Основной причиной потери работоспособности объемного гидропривода является низкая износостойкость ресурсолимитирующего соединения агрегатов – распределительной пары [1–2]. Это объясняется высокой интенсивностью изнашивания материалов пары в условиях гидроабразивного износа и низкой несущей способностью соединения.

Применяемые в настоящее время методы и подходы к восстановлению работоспособности объемного гидропривода сводятся в основном к удалению следов износа или замене деталей распределительной пары на новые, т. е. не изменяют физико-механические свойства пары трения. Однако межремонтный ресурс объемного гидро-

привода остается низким [3]. Поэтому актуальной задачей является исследование и поиск путей повышения несущей способности распределительной пары аксиально-поршневых агрегатов объемных гидроприводов в различных режимах эксплуатации.

Известно, что одним из методов формирования покрытия с высокими триботехническими свойствами является электроискровая обработка (ЭИО)¹ [4].

Обзор литературы

В настоящее время повышением долговечности объемного гидропривода активно занимаются заводы-изготовители, отраслевые академические НИИ (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ), научно-исследовательские лаборатории вузов.

Анализ и систематизация целого ряда работ российских (Ф. Х. Бурумкулов, А. В. Пузанов, С. А. Величко, Н. М. Балыков, Д. А. Галин, Н. В. Камчугов, А. М. Земсков) и зарубежных ученых (С. Вегнер, Дж. Бейкер, Дж. Ребель) показали, что единого мнения о механизме отказа объемных гидроприводов нет, а для повышения их долговечности применяются различные подходы²⁻³ [1–6].

Во всем мире проблема повышения долговечности соединений решается улучшением конструкций рабочих поверхностей; созданием новых материалов, обладающих высокими прочностными свойствами; применением компо-

¹ Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) / Ф. Х. Бурумкулов [и др.]. Саранск : Красный Октябрь, 2003. 504 с.

² Там же.

³ Validation of the physical effect implementation in a simulation model for the cylinder block/valve plate contact supported by experimental investigations / S. Wegner [et al.] // 10th International Fluid Power Conference. 2016. No. 1. P. 269–282. URL: http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/19956/F-1_PDF_A_Validation%20of%20the%20physical%20effect%20implementation%20in%20a%20simulation%20model%20for%20the%20cylinder%20block%20valve%20plate%20contact%20supported%20by%20experimental%20investigations.pdf

зитных материалов. Например, детали распределительной пары зарубежных агрегатов объемного гидропривода изготавливают из двухслойных композиционных материалов с мягкой и твердой сторонами⁴. Для создания таких материалов применяют перспективные способы формирования покрытий на основе электронных, фотонных и ионно-плазменных источников энергии⁵.

Создание новой и модернизация существующей техники невозможны без проведения сложных конструктивных расчетов. Все чаще для этого используют метод конечных элементов. За последние несколько десятилетий данный метод зарекомендовал себя как средство моделирования условий эксплуатации изделий, в т. ч. исследования напряженно-деформированного состояния в подвижных и неподвижных соединениях [6–11]. В представленных работах метод конечных элементов был использован в качестве исследовательской базы для моделирования рабочих условий различных машин и поверхностей, работающих под нагрузкой.

С точки зрения изучения пар трения агрегатов методом конечных элементов вызывают интерес следующие исследования [6; 8–13]. В работе Я. А. Даршта и И. Н. Холкина [8] представлена подробная методика расчета гидростатических опор плунжеров аксиально-поршневых агрегатов с результатами модельных и натурных испытаний пар трения при повышенных давлениях (до 40 МПа). Итогом исследований стали значения контактных напряжений по критерию Мизеса в конструкции гидростатической опоры.

Важное значение имеет работа И. Н. Холкина и А. В. Пузанова [9]. Авторами установлено, что температурные напряжения составляют всего 2–5 % от общей величины напряжений, возникающих при контактном взаимо-

действии омываемых рабочей жидкостью пар трения. Т. е. с учетом того, что в современных машинах температура рабочих жидкостей постоянно контролируется и поддерживается в небольших интервалах, при моделировании эксплуатационных режимов гидромашин возможно принимать данный параметр за константу.

Изучению процессов, происходящих в распределительном узле гидроагрегатов, посвящены работы немецких ученых [6; 11], однако здесь исследователи ограничились анализом кинематики жестких тел, моделированием управляющих давлений и изменением геометрии сопрягаемых поверхностей деталей.

В работе А. В. Пузанова [12] проведены исследования гидромеханики распределительного узла аксиально-плунжерного гидроагрегата. Результаты анализа напряженно-деформированного состояния позволили изменить конструктивные параметры сопряженных поверхностей распределительного узла и обеспечить уменьшение деформации.

Аналогичные исследования, проведенные авторами данной статьи ранее, дали картину контактных напряжений в распределительной паре аксиально-поршневого гидронасоса [13]. Результаты исследования коррелируют с данными, полученными А. В. Пузановым.

Обзор проведенных исследований не позволяет определить значения фактической несущей способности, которые возникают в прецизионных парах трения современных гидроагрегатов в эксплуатационных условиях, и предложить пути повышения долговечности объемного гидропривода. Поэтому в научно-исследовательской лаборатории «Технологии и средства создания покрытий с заданными служебными свойствами» Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва было

⁴ Там же.

⁵ Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) / Ф. Х. Бурумкулов [и др.]. Саранск : Красный Октябрь, 2003. 504 с.



смоделировано напряженно-деформированное состояние в распределительной паре агрегатов объемного гидропривода с использованием современных систем инженерного анализа.

Изучение различных источников позволило из всех систем инженерного анализа, использующих метод конечных элементов, выделить оптимальную по всем критериям систему – ANSYS [14–15].

Материалы и методы

В процессе исследований были использованы общепринятые положения теорий трения, надежности, упругости, механизмов и машин, математического моделирования.

Еще И. В. Крагельский установил, что при упругом контакте пар трения интенсивность изнашивания определяется выражением⁶:

$$I = C_1 q_c \left[\frac{K f q_c \left(\frac{E}{(1-\mu) q_c} \right)^{1-\beta}}{C_2 \sigma_T} \right]^{\beta y}, \quad (1)$$

где C_1 , C_2 , K , β – коэффициенты; σ_T – предел текучести материалов; E – приведенный модуль упругости материалов, МПа; q_c – контурное давление, МПа; f – коэффициент трения; t_y – параметр фрикционной усталости.

Из выражения (1) видно, что на интенсивность изнашивания оказывает прямое влияние контурное давление q_c , которое представляет собой не что иное, как нагрузку в соединении. На этот параметр исследователи повлиять не могут, т. к. он зависит от эксплуатационных условий, однако можно повысить способность пары трения выдерживать нагрузку и тем самым обеспечить большую износостойкость соединения.

Известно⁷ [3], что несущую способность пары трения можно определить из выражения:

$$P_{мп} = \frac{H_\mu r}{R_z^2} \left(1 - \frac{2\tau}{\sigma_0} \right) \geq \sigma_{z \max}, \quad (2)$$

где $P_{мп}$ – максимальная удельная нагрузка на пару трения; $\sigma_{z \max}$ – максимальная длительно действующая эксплуатационная нагрузка на пару трения (фактическая нагрузка); H_μ – микротвердость мягкой поверхности; r – радиус закругления неровностей твердой поверхности; τ – прочность на срез адгезионной связи образующихся мостиков сварки; σ_0 – предел текучести деформируемой поверхности; R_z – средняя высота неровностей твердой поверхности, определяемая по десяти точкам.

Напряжения, возникающие на поверхности, зависят от модуля Юнга и согласно теории упругости⁸, определяются из выражения:

$$\sigma = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \times \begin{pmatrix} 1 & \nu/(1-\nu) & 0 \\ \nu/(1-\nu) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\nu)/(2-2\nu) \end{pmatrix} \varepsilon, \quad (3)$$

где E – модуль упругости материала (модуль Юнга), МПа; ν – коэффициент Пуассона; ε – деформация поверхности.

Из выражений (2)–(3) следует, что увеличить несущую способность соединения можно изменением твердости и модуля упругости материалов рабо-

⁶ Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) / Ф. Х. Бурумкулов [и др.]. Саранск : Красный Октябрь, 2003. 504 с.

⁷ Там же.

⁸ **Мейз Дж.** Теория и задачи механики сплошных сред / Пер. с англ. Е. И. Свешникова. М. : Либроком, 2016. 322 с.

чих поверхностей пар трения. Для этого целесообразно применять современные методы формирования покрытий с высокими триботехническими свойствами.

Таким образом, чтобы пара трения обладала лучшей износостойкостью, необходимо обеспечить такую несущую способность соединения, чтобы она была больше, чем максимальная эксплуатационная нагрузка, т. е. $P_{\text{мп}} \geq \sigma_{z \text{ max}}$.

При практической реализации предложенного подхода наибольшие сложности возникают в определении значения $\sigma_{z \text{ max}}$ для различных условий эксплуатации. Максимальная длительно действующая эксплуатационная нагрузка в соединении определялась с помощью системы инженерного анализа ANSYS (лицензия № 624967). Для моделирования напряженно-деформированного состояния выбраны распределительные пары агрегатов объемного гидропривода: гидронасосов 313.3.112 (ОАО «Пневмостроймашина», Россия), ГСТ-112 (ПО «Гидросила», Украина) и Sauer Danfoss 90R075 (Германия).

На рис. 1 показаны созданные геометрические модели и схемы нагружения выбранных соединений. Соединения были подвержены нагружению, имитирующему работу в эксплуатационных условиях: давление в линиях всасывания и нагнетания, частота вращения деталей, крутящий момент на валу гидронасоса при установившихся номинальных режимах работы.

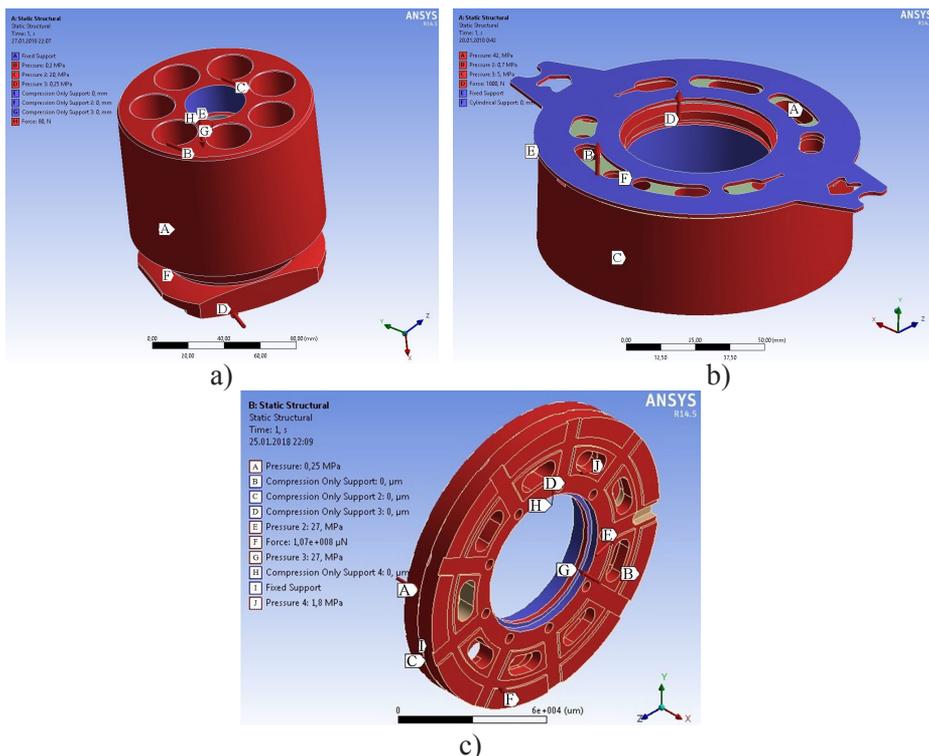
Для дальнейших расчетов были заданы свойства материалов деталей, наложены ограничения, созданы контакты и сымитирована модель поведения:

1. Для соединения «Блок цилиндров – распределитель» гидронасоса 313.3.112 (рис. 1, а): ограничение по перемещению вдоль осей X , Y , Z назначено для распределителя, который зафиксирован в пространстве и лишен всех степеней свободы; ограничение на блок наложено для его фиксации от

радиальных перемещений, поскольку в естественных условиях его перемещения ограничены деталями гидронасоса (шип, поршень, распределитель); поверхности, соответствующие линии нагнетания гидронасоса, нагружены давлением 20 МПа; в линии всасывания максимальное давление 0,2 МПа; давление дренажа 0,25 МПа; поджатие блока цилиндров к распределителю тарельчатыми шайбами заменено на силу в 80 Н;

2. Для соединения «Распределитель – блок цилиндров» гидронасоса Sauer Danfoss 90R075 (рис. 1, б): поверхности, соответствующие линии нагнетания гидронасоса, нагружены давлением 42 МПа; данному давлению соответствуют четыре канала блока. В линии всасывания максимальное значение давления составляет 0,7 МПа, приложено к четырем каналам (еще один канал находится в переходной зоне); поверхности дренажной полости нагружены давлением 5 МПа (это максимальное значение давления дренажа); поджатие распределителя и блока цилиндров обеспечивается пружиной с усилием 1,8 кН, прикладывается по всей площади контакта вдоль оси блока к распределителю; наружная кольцевая поверхность распределителя зафиксирована (контакт с крышкой и двумя штифтами);

3. Для соединения «Стальной – латунный распределители» гидронасоса ГСТ-112 (рис. 1, с): стальной распределитель жестко зафиксирован (контакт с задней крышкой гидронасоса), лишен шести степеней свободы; четыре отверстия в верхней части распределителя соответствуют линии всасывания, здесь приложена нагрузка 1,8 МПа; четыре отверстия в нижней части соответствуют линии нагнетания, приложена нагрузка в 27 МПа; другие поверхности стального распределителя нагружены давлением дренажной полости 0,25 МПа; латунный распределитель жестко связан с блоком цилиндров. В месте контакта торцевых



Р и с. 1. Геометрические модели распределительных пар: а) соединение «Блок цилиндров – распределитель» гидронасоса 313.3.112. Материалы: блок цилиндров – бронза БрО12; распределитель – сталь 38Х2МЮА; А – фиксация блока; В – давление всасывания, МПа; С – давление нагнетания, МПа; D – давление дренажа, МПа; E – контакт с центральным шипом; F – контакт с крышкой; G – контакт с поршнем; H – сила действия тарельчатых шайб, Н; б) соединение «Распределитель – напайка блока цилиндров» гидронасоса Sauer Danfoss 90R075. Материалы: распределитель – сталь инструментальная углеродистая по DIN C85W, аналог по ГОСТ 1435-99 сталь У9; напайка блока цилиндров – бронза оловянистая литейная по DIN GB-CuSn12Pb2Ni; А – давление нагнетания, МПа; В – давление всасывания, МПа; С – давление дренажной полости, МПа; D – усилие пружины, прижимающей распределитель, Н; E – фиксация распределителя; F – контакт с крышкой; в) соединение «Стальной – латунный распределители» гидронасоса ГСТ-112. Материалы: стальной распределитель – сталь Х12Ф1; латунный распределитель – латунь ЛМцСКА-58-2-2-1-1; А – давление в дренажной полости, МПа; В – контакт с блоком; С – контакт с задней крышкой; D – контакт с подшипником; E, G – давление в линии нагнетания, МПа; I – жесткая фиксация стального распределителя; J – давление в линии нагнетания, МПа; F – усилие прижатия распределителей пружиной, Н; H – контакт с кольцом

F i g. 1. The geometric model of the distribution of pairs: a) connection «Cylinder block – distributor» of the 313.3.112 hydraulic pump. Materials: cylinder block – bronze BrO12; distributor – steel 38Kh2MYuA; A – fixation of the cylinder; B – line pressure suction, MPa; C – pressure in the discharge line, MPa; D – drainage pressure, MPa; E – contact with central spike; F – contact with the back cover; G – contact with the piston; H – force from the plate-shaped shim, N; б) connection «Dispenser – solder the cylinder block» of Sauer Danfoss 90R075 hydraulic pump. Materials: distributor – carbon tool steel DIN C85W, analog according to GOST 1435-99 steel U9; solder the cylinder block – tin casting bronze DIN GB-CuSn12Pb2Ni; A – pressure in the discharge line, MPa; B – line pressure suction, MPa; C – drainage pressure, MPa; D – pressure force of the distributor spring, N; E – fixing the distributor; F – contact with rear cover; в) connection «Steel distributor – brass distributor» hydraulic pump GST-112. Materials: steel distributor – steel Kh12F1; brass distributor – brass LMtSKA-58-2-2-1-1; A – drainage pressure, MPa; B – contact with cylinder block; C – contact with the rear cover of the hydraulic pump; D – contact with tapered bearing; E, G – pressure in the discharge line, MPa; I – rigid fixation steel dispenser; J – pressure in the discharge line, MPa; F – contact force valve spring, N; H – ring contact

поверхностей распределителя и блока цилиндров сымитирован жесткий контакт; четыре отверстия верхней части распределителя нагружены давлением 1,8 МПа; для четырех нижних отверстий величина давления равна 27 МПа; остальные поверхности находятся в полости дренажа, к ним приложено давление 0,25 МПа; латунный распределитель при помощи пружины поджат к стальному распределителю с силой 1,726 кН. При расчете данного соединения использованы материалы как новых деталей, так и упрочненных методом электроискровой обработки (латунный распределитель упрочнен методом ЭИО в режимах, обеспечивающих максимальную твердость рабочей поверхности).

Определение значений действительных контактных напряжений проведено по критерию напряжений Мизеса, который основан на теории энергии формоизменения Мизес-Хенки (Mises-Hencky)⁹. В ней утверждается, что пластичный материал повреждается в тех местах, где напряжение становится равным предельному значению:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \leq [\sigma_0] \quad (4).$$

Момент исчерпания несущей способности контактной пары определяется условным пределом текучести σ_0 , при котором появляются первые остаточные деформации.

Закон распределения среднего значения напряжений, соответствующих максимальной длительно действующей эксплуатационной нагрузке, подчиняется нормальному закону с коэффициентом вариации $v \leq 1/3$. Следовательно, верхняя граница максимальной длительно действующей эксплуатационной нагрузки для соединения, отвечающей вероятности $p = 0,95$, находится из выражения:

$$\sigma_{zmax} = \bar{\sigma}_i + su_p,$$

где u_p – квантиль нормального распределения, отвечающий вероятности p ; s – стандартное отклонение давления.

Результаты исследования

В результате моделирования получены значения действительных контактных напряжений и длительно действующей эксплуатационной нагрузки σ_{zmax} в соединениях, перемещения и деформации в элементах, диаграммы напряжений на поверхностях распределительных пар агрегатов объемного гидропривода (табл. 1, рис. 2).

На диаграмме (рис. 2, а–b) отображаются напряжения в соединении «Блок цилиндров – распределитель» гидронасоса 313.3.112. Установлено, что зона *B* наибольших напряжений в блоке возникает на сферической поверхности в основном вокруг отверстий и имеет вид колец; значения напряжений находятся в интервале 31–69 МПа. В распределителе зоны *A* максимальных напряжений находятся в местах начала кольцевых щелей по обеим сторонам. Наибольшим нагрузкам подвержена область, расположенная со стороны нагнетания, что является причиной одностороннего износа сферических поверхностей, довольно часто встречающегося у снятых с эксплуатации агрегатов.

Для распределительной пары гидронасоса ГСТ-112 (рис. 2, с–d) происходит повышение напряжения в зоне, соответствующей нагнетанию. Для стального распределителя напряжения изменяются в диапазоне 20–47 МПа, для латунного распределителя – 40–93 МПа. Максимальные значения напряжений (зоны *A*, *B*) возникают вокруг овальных отверстий – 47 и 93 МПа соответственно. В зоне всасывания напряжения минимальны.

У распределителя гидронасоса Sauer Danfoss 90R075 (рис. 2, e) наибольшие значения в 55–68 МПа воз-

⁹ Там же.



**Значения действительных контактных напряжений
и длительно действующей эксплуатационной нагрузки**
Values of the real contact stresses and long-term current operational load

Распределительная пара / Distribution pair	Материал детали / Part material	Исследуемая поверхность / Tested surface	Среднее значение напряжений, МПа / The average value of stresses, MPa	σ_{zmax} , МПа / σ_{zmax} , MPa
«Блок цилиндров – распределитель» гидронасоса 313.3.112 / «Cylinder block – distributor» of 313.3.112 hydraulic pump	Бронза БрО12 / Bronze BrO12	Поверхность блока цилиндров / The surface of the block of cylinders	18,02	26,93
	Сталь 38Х2МЮА / Steel 38Kh2MYuA	Поверхность распределителя / The surface of the dispenser	15,78	
«Распределитель – напайка блока цилиндров» гидронасоса Sauer Danfoss 90R075 / «Dispenser – solder the block» of Sauer Danfoss 90R075 hydraulic pump	DIN C85W, аналог У9 / DIN C85W, analogue U9	Поверхность распределителя / The surface of the dispenser	18,14	27,12
	Бронза оловянистая DIN GB-CuSn12Pb2Ni / Tin bronze DIN GB-CuSn12Pb2Ni	Поверхность напайки блока цилиндров / The surface of the soldering block	16,39	
«Стальной – латунный распределители» гидронасоса ГСТ-112 / «Steel – brass valves» of GST-112 hydraulic pump	Сталь Х12Ф1 / Steel KH12F1	Поверхность стального распределителя / The surface of the steel dispenser	10,82	22,21
	Латунь ЛМцСКА-58-2-2-1-1 А / Brass LMtsSKA-58-2-2-1-1 А	Поверхность латунного распределителя / Surface of brass dispenser	14,86	

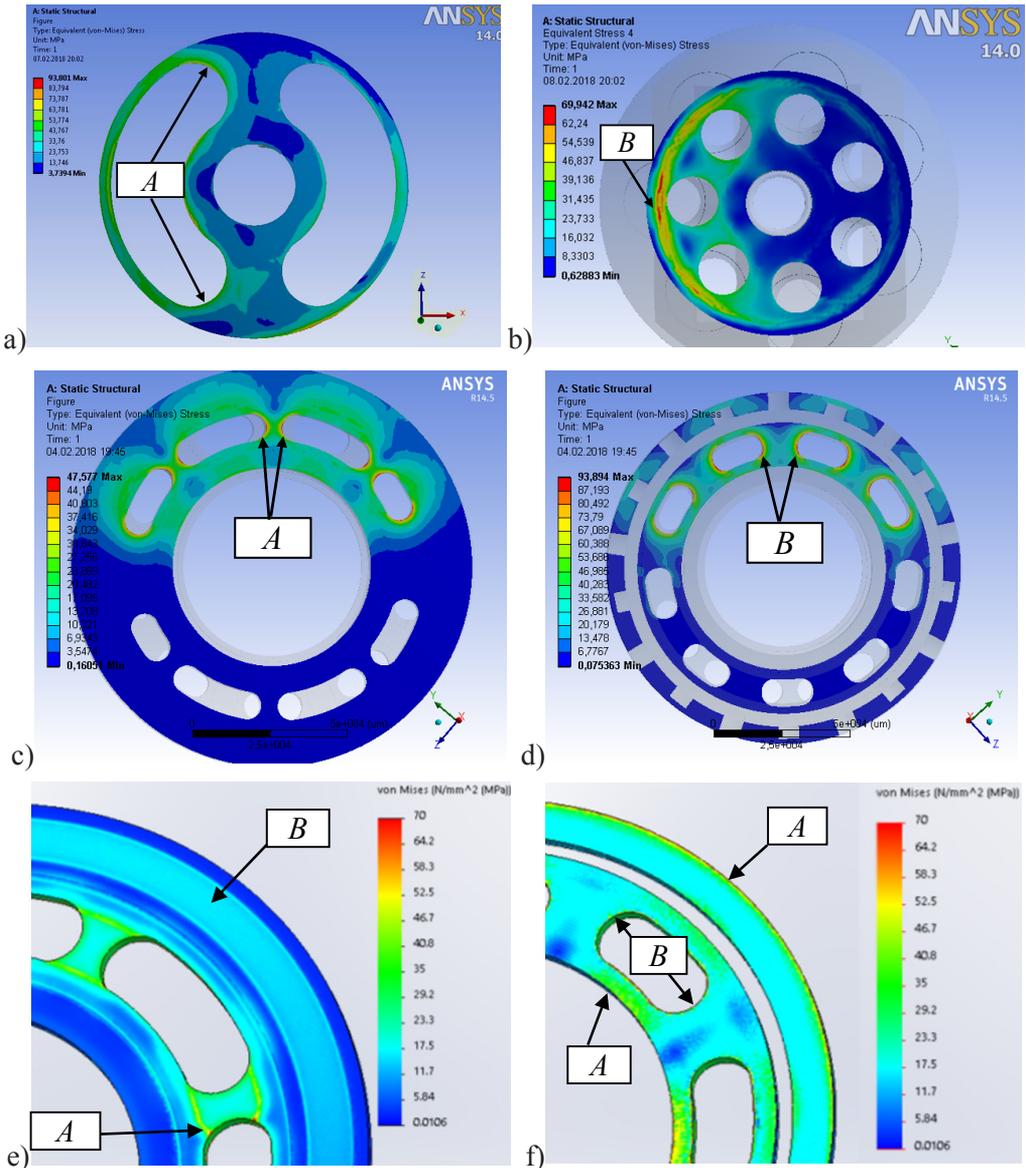
никают на перемычках окон по краям зоны *A*; отчетливо видны напряжения, возникающие в зоне *B* вдоль края распределителя (они имеют вид колец; значения напряжений находятся в диапазоне 17–22 МПа). Следует отметить возникновение кольцевых максимальных напряжений на поверхности напайки блока цилиндров по наружным и внутренним краям (зона *A*) и по внутренним краям вокруг окон (зона *B*). Как результат, на напайке блока цилиндров образуются завалы по краям (рис. 2, f).

Для бывших в эксплуатации агрегатов объемных гидроприводов были

проведены исследования топографии поверхности распределительной пары с помощью профилографа-профилометра английской фирмы «Тэйлор Хобсон» (рис. 3).

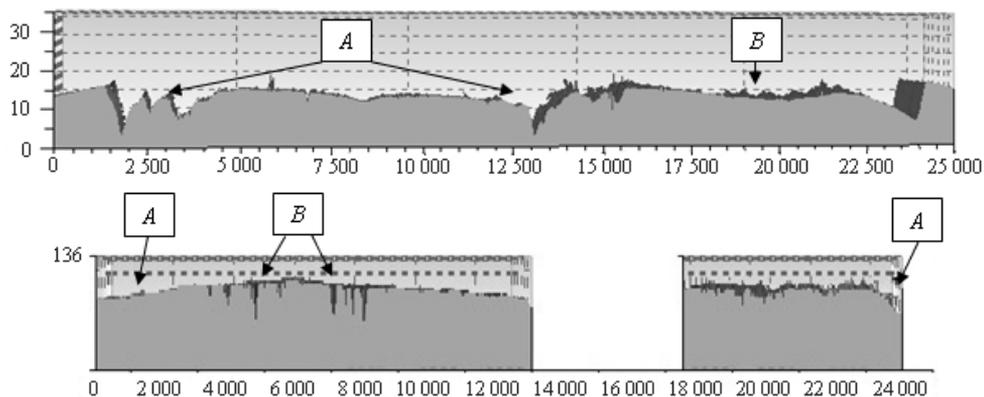
При сравнении профилограмм поверхностей распределителя и блока цилиндров с полученными диаграммами напряжений можно отметить, что области наибольших напряжений соответствуют местам максимального износа; это говорит о достоверности полученных результатов.

При моделировании напряженно-деформированного состояния для соединений с упрочненными поверх-



Р и с. 2. Диаграмма напряжений на поверхностях распределительных пар: распределителя (а) и блока цилиндров (б) гидронасоса 313.3.112; стального распределителя (с) и латунного распределителя (д) гидронасоса ГСТ-112; распределителя (е) и напайки блока цилиндров (ф) гидронасоса Sauer Danfoss 90R075; А, В – зоны с максимальными напряжениями

F i g. 2. Diagram of stresses on the surfaces of distribution pairs: distributor (a) and cylinder block (b) of 313.3.112 hydraulic pump; steel distributor (c) and brass distributor (d) of GST-112 hydraulic pump; distributor (e) and soldering cylinder block (f) of Sauer Danfoss 90R075 hydraulic pump; А, В – zone with maximum stresses



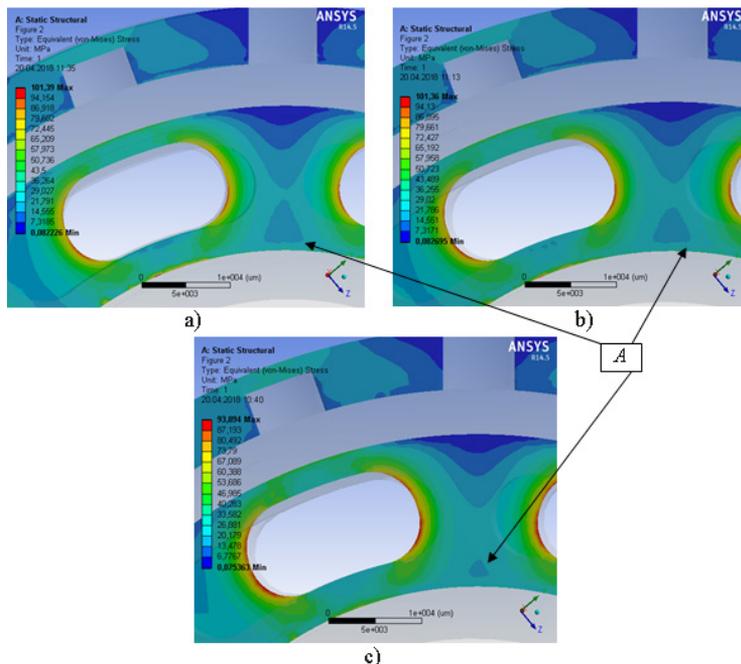
Р и с. 3. Профилотграммы поверхностей деталей гидронасоса Sauer Danfoss 90R075:
а) распределителя, б) напайки блока цилиндров

Fig. 3. The profilograms of surfaces of the parts of Sauer Danfoss 90R075 hydraulic pump:
a) rail, b) soldering of the cylinder block

ностями значения напряжений и эксплуатационной нагрузки изменяются (табл. 2, рис. 4).

Установлено, что средние значения контактных напряжений в соеди-

нениях, упрочненных методом ЭИО, в среднем на 1,4–9,4 % ниже, чем в эталонных. Площади зоны А контактных напряжений на рис. 4, а больше, чем аналогичные площади на рис. 4, б–с.



Р и с. 4. Участки латунных распределителей, упрочненных:
а) молибденом Mo ; б) латунью ЛМцСКА-58-2-2-1-1; в) эталонного

Fig. 4. Areas of hardened brass distributors:
a) molybdenum Mo ; b) brass LMtsSKA-58-2-2-1-1; c) reference

Значения контактных напряжений и эксплуатационной нагрузки в упрочненном методом ЭИО соединении «Стальной – латунный распределитель» гидронасоса ГСТ-112

The values of contact stresses and operating load in the reinforced by ESM connection «Steel-brass distributors» of GST-112 hydraulic pump

Распределительная пара / Distribution pair	Материал детали / Part material	Исследуемая поверхность / Tested surface	Среднее значение напряжений, МПа / The average value of stresses, MPa	σ_{zmax} , МПа / σ_{zmax} , MPa
«Стальной – латунный распределитель» гидронасоса ГСТ-112 / “Steel – brass dispenser” of GST-112 hydraulic pump	Сталь Х12Ф1 / Steel KH12F1	Поверхность стального распределителя (неупрочненная) / Surface of steel dispenser (not hardened)	11,32	20,19
	Латунь ЛМцСКА-58-2-2-1-1 А + ЭИО (Мо) / Brass LMtsSKA-58-2-2-1-1 A + Electrical discharge machining (Mo)	Поверхность латунного распределителя (упрочненная) / Surface of brass dispenser (hardened)	13,51	
	Сталь Х12Ф1 / Steel KH12F1	Поверхность стального распределителя (неупрочненная) / Surface of steel dispenser (not hardened)	11,27	21,43
	Латунь ЛМцСКА -58-2-2-1-1 А + ЭИО (ЛМцСКА-58-2-2-1-1 А) / Brass LMtsSKA-58-2-2-1-1 A + Electrical discharge machining (LMtsSKA-58-2-2-1-1 A)	Поверхность латунного распределителя (упрочненная) / Surface of brass dispenser (hardened)	14,34	

Это приводит к снижению средних напряжений на упрочненной поверхности латунного распределителя. В свою очередь, упрочнение молибденом приводит к серьезному снижению средних напряжений. Максимальные напряжения при упрочнении увеличиваются; для латунных распределителей это увеличение составляет 7 МПа, для стальных – 0,2 МПа.

Полученные результаты подтверждают предположение о том, что в процессе ЭИО происходит перераспределение напряжений по поверхности контактной пары, т. е. площади зон с большими значениями контактных напряжений становятся меньше, что приводит к снижению значений сред-

них контактных напряжений, а следовательно, и эксплуатационной нагрузки в соединениях.

Обсуждение и заключение

Проведенное исследование позволило смоделировать напряженно-деформированное состояние в новых и упрочненных распределительных парах агрегатов объемного гидропривода в эксплуатационных условиях, а также предложить пути повышения его долговечности.

Установлено, что:

1. Для повышения износостойкости ресурсолимитирующего соединения и, как следствие, долговечности агрегатов объемного гидропривода необходимо обеспечить в распределительных



парах максимальную удельную нагрузку (несущую способность) $P_{\text{мп}}$ бóльшую, чем максимальная длительно действующая эксплуатационная нагрузка $\sigma_{z \text{ max}}$:

$P_{\text{мп}} \geq 26,93$ МПа – для гидронасоса 313.3.112;

$P_{\text{мп}} \geq 22,21$ МПа – для гидронасоса ГСТ-112;

$P_{\text{мп}} \geq 27,12$ МПа – для гидронасоса Sauer Danfoss 90R075.

2. В процессе ЭИО происходит снижение средних значений контактных

напряжений и уменьшение максимальной длительно действующей эксплуатационной нагрузки в соединениях.

Полученные результаты являются определяющими при выборе способа технологического воздействия на рабочие поверхности ресурсолимитирующих соединений агрегатов объемного гидропривода. Для решения данной задачи предлагается создавать покрытия с высокими триботехническими свойствами методом ЭИО.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Новая технология ремонта регулируемых аксиально-поршневых гидромашин / П. В. Сенин [и др.] // Сельский механизатор. 2016. № 9. С. 30–33. URL: http://selmech.msk.ru/916.html#_Новая_технология_ремонта
2. Пузанов А. В. Гидромеханический анализ ходовой части аксиально-поршневой гидромашин // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. № 4 (52). С. 161–169. URL: <https://academuspub.com/ru/nauka/article/14363/view>
3. Величко С. А. Ремонт агрегатов машин с восстановлением показателей безотказности и долговечности на уровне нового изделия // Труды ГОСНИТИ. 2013. № 111. С. 19–23. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18956289>
4. Analysis of electric pulsed processes in electrospark treatment of metallic surfaces in a gas medium / V. I. Ivanov [et al.] // Welding International. 2017. № 4. P. 312–319. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1257244>
5. Ivantysynova M., Baker J. Power loss in the lubricating gap between cylinder block and valve plate of swash plate type axial piston machines // International Journal of Fluid Power. 2009. Vol. 10, Issue 2. P. 29–43. DOI: <https://doi.org/10.1080/14399776.2009.10780976>
6. Rebel J., Grätz U. Modellierung der Druckumsteuerung in einer Axialkolbenpumpe // Ölhydraulik und Pneumatik. 2001. Vol. 45, no. 4. P. 240–245. URL: <https://www.tib.eu/en/search/id/tema%3ATEMA20010500668/Modellierung-der-Druckumsteuerung-in-einer-Axialkolbenpumpe/#documentinfo>
7. Дородов П. В., Гусева Н. В. Совершенствование установки для исследования напряженно-деформированного состояния в плоских прозрачных моделях деталей сельскохозяйственной техники // Техника и оборудование для села. 2015. № 4. С. 10–13.
8. Даршт Я. А., Холкин И. Н. Исследование гидростатической опоры аксиально-поршневой насоса // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 5. С. 20–25. URL: <http://www.mashin.ru/files/2012/05-2012.pdf>
9. Холкин И. Н., Пузанов А. В. Моделирование рабочих процессов аксиально-плунжерных гидромашин как часть методики виртуальной разработки и сопровождения изделий // САПР и графика. 2006. № 6. С. 84–88. URL: <https://sapr.ru/article/15934>
10. Анализ математических моделей и методов исследования напряженно-деформированного состояния многослойных конструкций / И. А. Донкова [и др.] // В мире научных открытий. 2015. № 4-1 (64). С. 515–525. URL: <http://journal-s.org/index.php/vmno/article/view/5972>
11. Deeken M. Simulation der Umsteuergeometrie von Schrägscheibeneinheiten mit Hilfe gangiger CAE-Tools // Ölhydraulik und Pneumatik. 2002. Vol. 46, no. 6. P. 374–377. URL: <http://publications.rwth-aachen.de/record/158556>

12. Пузанов А. В. Анализ гидромеханики распределительного узла аксиально-плунжерной гидромашины // Инженерный вестник. 2016. № 2. С. 5–8. URL: <http://engsi.ru/doc/834744.html>
13. Моделирование нагрузок в качающихся узлах регулируемых аксиально-поршневых гидромашин / А. П. Сенин [и др.] // Труды ГОСНИТИ. 2012. Т. 110, № 1. С. 148–153. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_21129849_20638558.pdf
14. Zhang J., Chao Q., Xu B. Analysis of the cylinder block tilting inertia moment and its effect on the performance of high-speed electro-hydrostatic actuator pumps of aircraft // Chinese Journal of Aeronautics. 2017. Vol. 31, Issue 1. P. 169–177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2017.02.010>
15. Klein A., Grätz U., Schindler U. Hydraulikkreislauf, Elektromagnet und 3D-Mechanik in einem Modell // Ölhydraulik und Pneumatik. 2003. Vol. 47, Issue 3. P. 148–152.

Поступила 28.05.2018; принята к публикации 01.08.2018; опубликована онлайн 28.12.2018

Об авторах:

Ионов Павел Александрович, профессор кафедры технического сервиса машин, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), кандидат технических наук, ResearcherID: S-7146-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9794-0071>, resurs-ime@yandex.ru

Сенин Петр Васильевич, заведующий кафедрой технического сервиса машин, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), доктор технических наук, ResearcherID: H-1219-2016, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, senin53@mail.ru

Столяров Алексей Владимирович, доцент кафедры технического сервиса машин, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), кандидат технических наук, ResearcherID: G-8460-2016, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5898-0150>, cabto@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

П. А. Ионов – формирование концепции исследования, анализ и интерпретация результатов процесса моделирования; П. В. Сенин – научное руководство, доработка текста; А. В. Столяров – разработка методики и проведение исследования, подготовка и первичный анализ литературных данных, верстка и редактирование текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Senin P. V., Ionov P. A., Stolyarov A. V., Zemskov A. M., Piyanzov S. V. New repair technology variable displacement axial piston hydraulic machines. *Selskiy mekhanizator* = Rural Machinist. 2016; 9:30–33. Available at: http://selmech.msk.ru/916.html#_Новая_технология_ремонта (In Russ.)
2. Puzanov A. V. Hydro-mechanical analysis of the chassis axial-piston hydraulic machine. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Bryansk State Technical University Bulletin. 2016; 4(52):161–169. Available at: <https://academuspublish.com/ru/nauka/article/14363/view> (In Russ.)
3. Velichko S. A. Repair of aggregates of machines with restoration of indicators of reliability and durability at the level of a new product. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2013; 111:19–23. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18956289> (In Russ.)
4. Ivanov V. I., Solovev S. A., Velichko S. A., Ignatkov D. A. Analysis of electric pulsed processes in electrospark treatment of metallic surfaces in a gas medium. *Welding International*. 2017; 4:312–319. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1257244>
5. Ivantysynova M., Baker J. Power loss in the lubricating gap between cylinder block and valve plate of swash plate type axial piston machines. *International Journal of Fluid Power*. 2009; 10(2):29–43. Available at: <https://doi.org/10.1080/14399776.2009.10780976>
6. Rébel J., Grätz U. Modellierung der Druckumsteuerung in einer Axialkolbenpumpe. *Ölhydraulik und Pneumatik*. 2001; 45(4):240–245. Available at: <https://www.tib.eu/en/search/id/tema%3ATEMA20010500668/Modellierung-der-Druckumsteuerung-in-einer-Axialkolbenpumpe/#documentinfo> (In Ger.)



7. Dorodov P. V., Guseva N. V. Improvement of the installation for investigation of stress-strain state in flat transparent models of parts of agricultural machinery. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela* = Machinery and Equipment for the Village. 2015; 4:10–13. (In Russ.)

8. Darst J. A., Kholkin I. N. The study supports the hydrostatic axial piston pump. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii* = Automation and Modern Technology. 2012; 5:20–25. Available at: <http://www.mashin.ru/files/2012/05-2012.pdf> (In Russ.)

9. Holkin I. N., Puzanov A. V. Modeling of working processes of axial-plunger hydraulic machines as part of the method of virtual development and maintenance of products. *CAD and Graphics*. 2006; 6:84–88. Available at: <https://sapr.ru/article/15934> (In Russ.)

10. Donkova I. A., Gavrilova N. M., Stupnikov A. A., Platonenko Yu. A. Analysis of mathematical models and methods for the study of stress-strain state of multilayered structures. *V mire nauchnykh otkrytiy* = In the World of Scientific Discoveries. 2015; 4-1(64):515–525. Available at: <http://journal-s.org/index.php/vmno/article/view/5972> (In Russ.)

11. Deeken M. Simulation der Umsteuergeometrie von Schrägscheibeneinheiten mit Hilfe gangiger CAE-Tools. *Ölhydraulik und Pneumatik*. 2002; 46(6):374–377. Available at: <http://publications.rwth-aachen.de/record/158556> (In Ger.)

12. Puzanov A. V. The analysis of the hydro-mechanics of the distribution node of the axial-plunger hydraulic machine. *Inzhenernyy vestnik* = Engineering Bulletin. 2016; 2:5–8. Available at: <http://engsi.ru/doc/834744.html> (In Russ.)

13. Senin A. P., Burumkulov F. H., Ionov P. A., Stolyarov A. V. Modeling of the loads in the pumping nodes, variable displacement axial piston hydraulic machines. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2012; 110(1):148–153. Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_21129849_20638558.pdf (In Russ.)

14. Zhang J., Chao Q., Xu B. Analysis of the cylinder block tilting inertia moment and its effect on the performance of high-speed electro-hydrostatic actuator pumps of aircraft. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2017; 31(1):169–177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2017.02.010>

15. Klein A., Grätz U., Schindler U. Hydraulikkreislauf, Elektromagnet und 3D-Mechanik in einem Modell. *Ölhydraulik und Pneumatik*. 2003; 47(3):148–152. (In Ger.)

Received 28.05.2018; revised 01.08.2018; published online 28.12.2018

About authors:

Pavel A. Ionov, Professor, Chair of Technical Service of Machines, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: S-7146-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9794-0071>, resurs-ime@yandex.ru

Petr V. Senin, Head, Chair of Technical Service of Machines, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: H-1219-2016, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, senin53@mail.ru

Aleksey V. Stolyarov, Associate Professor, Chair of Technical Service of Machines, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: G-8460-2016, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5898-0150>, cabto@mail.ru

Contribution of the authors:

P. A. Ionov – formulation of the study concept, analysis and interpretation of the results of the modeling process; P. V. Senin – scientific supervision, revision of the final text; A. V. Stolyarov – development of methodology and conducting of research, initial analysis of literature data, word processing and editing the text.

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



Установка для обработки деталей со сложным профилем рабочей поверхности

В. А. Скрябин

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

(г. Пенза, Россия)

vs_51@list.ru

Введение. В статье приводятся новые конструкторские решения, используемые при проектировании оборудования для финишной обработки деталей со сложным профилем рабочей поверхности. Данные решения позволяют осуществлять планетарное вращение детали при малом межосевом расстоянии оправки с обрабатываемой деталью и шпинделем установки, что способствует повышению качества обработки рабочих поверхностей детали и снижению энергетических затрат.

Материалы и методы. Недостатками ранее применявшихся устройств для финишной обработки деталей сложного профиля являются увеличенное потребление энергии, а также достаточно большое межосевое расстояние между деталью и шпинделем установки, что снижает качество обработки поверхностей и уменьшает номенклатуру деталей по массовым и габаритным характеристикам. В этом случае необходимо применение новых решений по изменению конструкции установки. За счет конструктивных наработок уменьшено межосевое расстояние между деталью и шпинделем установки, что способствует уменьшению вибраций, улучшению качества обработки поверхностей и увеличению номенклатуры изделий.

Результаты исследования. Правильность принятых решений подтверждается проведенными расчетами по снижению сопротивления абразивной среды, воздействующей на поверхности лопаток колеса турбокомпрессора дизеля. Также проведены расчеты детали на прогиб с использованием программы продукта Solid Works 2016. Расчеты показали достаточную надежность установки при обработке деталей средних и крупных размеров по сравнению с базовым вариантом установки, ранее изготовленной Пензенским государственным университетом для АО «Пензадизельмаш».

Обсуждение и заключение. Выполненные расчеты позволили установить, что сокращение межосевого расстояния снижает прогиб и вибрации в процессе финишной обработки деталей, а также позволяет с меньшими энергозатратами стабилизировать качество и производительность процесса обработки поверхностей сложного профиля. Разработана и изготовлена новая конструкция установки, позволяющая обеспечить планетарное вращение детали при малом межосевом расстоянии оправки с деталью и шпинделем устройства.

Ключевые слова: теоретическое исследование, результат теоретического исследования, сложная поверхность, поверхность детали, незакрепленные абразивные частицы, производительность, качественный показатель, проектирование оборудования, автоматизация конструкторского расчета

Для цитирования: Скрябин В. А. Установка для обработки деталей со сложным профилем рабочей поверхности // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 4. С. 552–561. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.552-561>





The Installation for Processing of Parts with a Complex Profile of Working Surface

V. A. Skryabin

Penza State University (Penza, Russia)

vs_51@list.ru

Introduction. The article presents new solutions for designing the equipment for final processing parts with a complex profile of working surface. The said solutions allow a planetary rotation of the part at a small center distance of the mandrel with the workpiece and the spindle of the installation. This solution improves the quality of the working surfaces and reduces energy costs.

Materials and Methods. The disadvantage of modern devices for final processing of complex parts is the increased energy consumption and the large axial distance between the part and spindle. These factors reduce the quality of processing and the part range in terms of weight and dimension characteristics. The application of new solutions to change the design of the installation is relevant. When designing a new installation, the center distance between the part and the spindle was reduced. This contributed to the reduction of vibrations, improving the quality of surface treatment and increasing the product range.

Results. The calculations to reduce the resistance of the abrasive medium affecting on the surface of the diesel engine turbo-compressor wheel blades confirmed the expediency of the solution. The calculations of the part for deflection by using Solid Works 2016 software were carried out. The calculations demonstrated the reliability of the installation when processing parts of medium and large sizes as compared to the basic installation option previously made by Penza State University for Penzadieselmash Company.

Conclusions. The calculations made it possible to find that the reduction of the center distance reduces the deflection of parts and vibration in the process of finishing and allows stabilizing the quality and performance of processing the surfaces of a complex profile with less energy coast. A new design of the installation was developed and manufactured. It contributes to planetary rotation of the part at a small axial distance of the mandrel with the part and the spindle of the device.

Keywords: theoretical study, result of study, complex surface, part surface, loose abrasive particles, performance, quality indicator, equipment design, design calculation automation

For citation: Skryabin V. A. The Installation for Processing of Parts with a Complex Profile of Working Surface. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(4):552–561. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.552-561>

Введение

Финишная абразивная обработка деталей сложной геометрической формы уплотненными абразивными средами является одним из наиболее производительных процессов. Однако использование разработанных ранее методов и оборудования не всегда соответствует потребностям производства в достижении необходимой производительности и качества обработки деталей сложной формы, в частности, цельнолитых колес турбин турбокомпрессоров из труднообрабатываемых материалов.

В статье приводятся решения проблемных вопросов обработки среднегабаритных деталей со сложными рабочими поверхностями второго порядка, в частности, колеса турбины турбокомпрессора дизеля. Получение качественных характеристик поверхностного слоя и обеспечение заданной производительности обработки достаточно просто осуществить путем полирования вышеуказанных поверхностей в среде незакрепленных абразивных зерен, уплотненных сжатым воздухом через специальную гибкую оболочку на специальной установке. Обработ-

ка этих поверхностей на шлифовальной машинке жестким шлифовальным кругом занимает много времени и не может обеспечить полную обработку всех лопаток колеса, т. к. они расположены близко друг к другу, имеют малый угловой шаг и труднодоступны для обработки всей площади сложных поверхностей.

Обзор литературы

На базе Пензенского государственного университета в 1975 г. впервые в мировой практике были созданы и запатентованы методы обработки сложнопрофильных деталей уплотненным абразивом, а также установки для их реализации. Данная технология и оборудование нашли широкое применение во многих промышленных регионах России и других стран. Большой вклад в создание технологии и оборудования для финишной абразивной обработки внесли ученые Пензенского государственного университета: А. Н. Мартынов, В. З. Зверовщиков, А. Е. Зверовщиков, В. А. Скрыбин и др.

А. Н. Мартыновым проведены теоретические и экспериментальные исследования, дано методологическое обоснование нового метода финишной обработки деталей незакрепленным абразивом, уплотненным инерционными силами [1]. Теоретические и экспериментальные исследования В. З. Зверовщикова посвящены вопросам динамики центробежной обработки деталей дискретным шлифовальным материалом, уплотненным инерционными силами [2–3]. В работах А. Е. Зверовщикова исследуется технологическое обеспечение качества поверхностей деталей при многофункциональной центробежно-планетарной объемной обработке [4–5]. Все вышеперечисленные научные работы посвящены финишной обработке сложнопрофильных деталей из различных материалов небольшого размера со следующими параметрами: диаметр – 20–50 мм, длина – 80–100 мм, масса – 0,020–0,050 кг.

Необходимо отметить, что основным недостатком вышеназванных исследований является невозможность обработки сложнопрофильных деталей среднего и крупного типоразмера, а также достаточно сложная кинематика установок. Кроме того, все рассматриваемые установки достаточно энергоемки.

Большая заслуга в систематизации разработанных методов абразивной обработки с указанием их недостатков и создании на этой основе нового метода финишной абразивной обработки деталей со статическим уплотнением сжатым воздухом незакрепленной абразивной среды принадлежит В. А. Скрыбину, разработавшему новый метод обработки сложнопрофильных деталей незакрепленным абразивом, уплотненным сжатым воздухом через эластичную оболочку [6–8].

Недостатком устройств, ранее применявшихся для финишной обработки деталей сложного профиля свободным абразивом, уплотненным давлением сжатого воздуха [1; 9–12], является увеличенное потребление энергии за счет достаточно большого межосевого расстояния между деталью и шпинделем установки. Это способствует повышению уровня вибраций, а также снижению качества обработки поверхностей и номенклатуры деталей по массовым и габаритным характеристикам.

Для решения данной проблемы необходимо внести изменения в конструкцию установки и методику определения рациональных режимов и условий обработки.

Материалы и методы

При использовании новой установки ее жестко закрепляют на столе вертикально- или радиально-сверлильного станка и соединяют со шпинделем.

Новое устройство для финишной обработки сложнопрофильных деталей и деталей с отклонениями от круглости содержит вал с оправкой, смонтированной с эксцентриситетом в корпусе

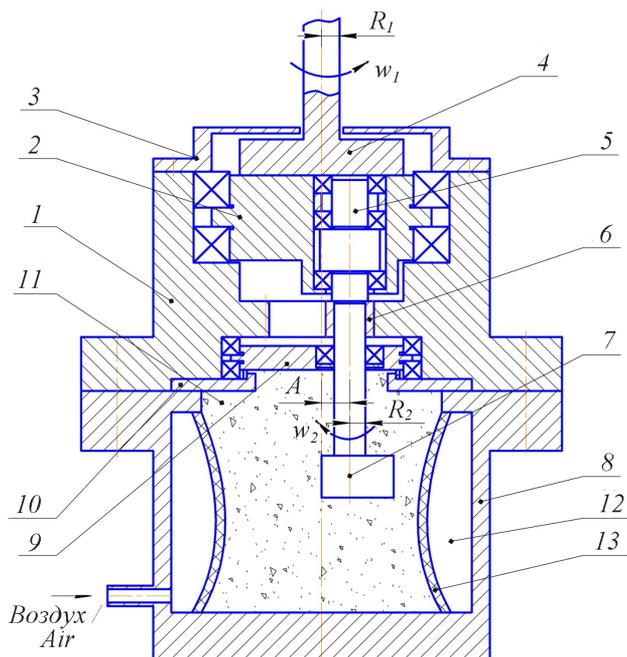


устройства; камеру, заполненную абразивной средой; привод вращения детали, установленный на входном валу; зубчатый венец, выполненный на валу с оправкой и кинематически связанный с зубчатым венцом, образованным на внутренней цилиндрической поверхности крышки устройства. Опорная крышка с валом с оправкой и уплотнительная крышка установлены в подшипниковых опорах.

Устройство позволяет снизить энергетические затраты, увеличить предел максимальной массы обрабатываемой детали, повысить качество поверхности путем уменьшения момента сопротивления абразивной среды, уменьшить вибрацию, а также способствует появлению жесткой связи, обеспечивающей вращение вала с оправкой посредством кинематической связи зубчатого венца вала с оправкой с зубчатым венцом корпуса крышки устройства. Снижение рычага сопротивления и увеличение максимальной массы

детали осуществляется путем сокращения межосевого расстояния меньшего, чем сумма радиусов входного вала и вала с оправкой [13–15].

Установка (рис. 1) состоит из контейнера 8, заполненного абразивной средой 11. В крышке 1, установленной на контейнере устройства, смонтированы опорная крышка 2 и защитная крышка 10 с подшипниковыми опорами. С опорной крышкой 2 жестко связан входной вал 4, передающий крутящий момент от привода станка к опорной крышке и обеспечивающий вращение детали относительно оси устройства. В опорную крышку 2 с эксцентриситетом установлен вал в подшипниках с оправкой 5, служащий для установки детали 7 в абразивную среду 11. На вал с оправкой 5 установлен зубчатый венец 6, который кинематически связан с зубчатым венцом, выполненным на крышке 1 устройства. Данная связь осуществляет вращение обрабатываемой детали 7 относительно собствен-



Р и с. 1. Схема установки

F i g. 1. Installation diagram

ной оси. Крышки 9 и 3 предохраняют внутренние механизмы устройства от воздействия абразива и внешней среды.

Устройство работает следующим образом.

На вал с оправкой 5, который установлен в корпусе крышки устройства, закрепляется деталь 7 (рис. 2). Крышка 1 устанавливается на корпус устройства 8, обеспечивая тем самым погружение детали в абразивную среду. Подача сжатого воздуха под давлением в полость контейнера 12 обеспечивает поджатие эластичными стенками 13 к детали 7 абразивной среды 11, за счет чего равномерно осуществляется контакт абразивных частиц с поверхностью детали. Крутящий момент передается валу 4, вращающемуся с угловой скоростью ω_1 от привода станка, и сообщает вращение опорной крышке 2 с установленной в ней валом с оправкой 5, тем самым обеспечивая вращение обрабатываемой детали 7 относительно оси устройства. Передача крутящего момента относительно оси заготовки осуществляется за счет контакта зубчатого венца 6 на валу с оправкой с зубчатой поверхностью крышки 1 устройства. В данном устройстве деталь с угловой

скоростью ω_2 совершает планетарное движение на малых межосевых расстояниях, обеспечивая при этом равномерный съем металла по всем поверхностям деталей сложного профиля.

Результаты исследования

Межосевое расстояние A между входным валом и валом с оправкой выбирается из условия:

$$A \leq R_1 + R_2, \quad (1)$$

где R_1 – радиус входного вала; R_2 – радиус вала-оправки.

Для обработки деталей на базовой установке с межосевым расстоянием, равным 20 мм, сопротивление абразивной среды F_1 в единицу времени при угловой скорости $\omega = \omega_2 = 5$ рад/с определяем по формуле:

$$F_1 = S \cdot K_c \cdot P \cdot V, \quad (2)$$

где S – величина, пропорциональная поверхности сопротивления; K_c – коэффициент сопротивления абразивной среды; P – плотность обрабатываемой среды; V – линейная скорость движения детали. Поскольку движение заготовки совершается вокруг централь-



Р и с. 2. Колесо турбины турбокомпрессора дизеля
F i g. 2. Turbine wheel of diesel engine turbocharger



ной оси устройства, скорость заготовки определяется по формуле:

$$V = \omega \cdot R, \quad (3)$$

где ω – угловая скорость заготовки; R – радиус окружности вращения с большим межосевым расстоянием.

Сопротивление абразивной среды определяется по следующей зависимости:

$$F_1 = S \cdot K_c \cdot P \cdot \omega \cdot R. \quad (4)$$

При использовании новой конструкции установки для абразивной обработки, обеспечивающей круговое движение на малых межосевых расстояниях, появилась возможность уменьшить межосевое расстояние A до 5 мм. Следовательно, сопротивление абразивной среды при обработке детали [9;10] будет определяться по следующей формуле:

$$F_1 = 0,25 \cdot S \cdot K_c \cdot P \cdot \omega \cdot R. \quad (5)$$

Сопротивление абразивной среды при обработке детали на базовой установке определяется по следующей зависимости [11–15]:

$$F_2 = S \cdot K_c \cdot P \cdot \omega \cdot R. \quad (6)$$

Отношение сопротивлений абразивной среде при обработке деталей на новой и базовой установках определяется как:

$$\frac{F_1}{F_2} = 0,25, \quad (7)$$

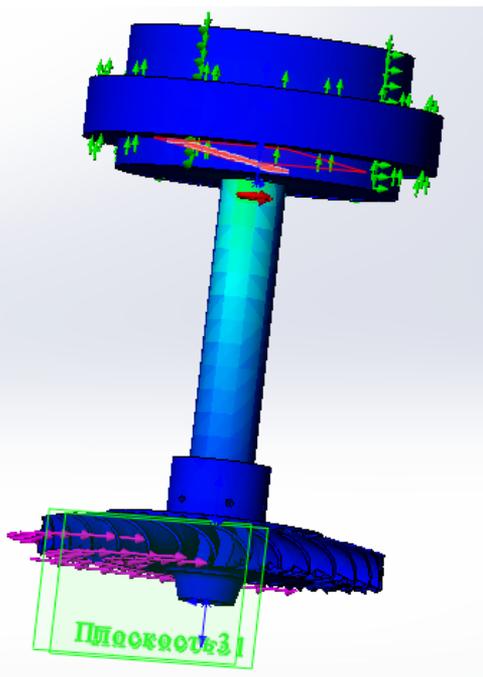
т. е. отношение радиусов к центру вращения; следовательно, сопротивление абразивной среды, оказываемое на обрабатываемую деталь в новой установке по сравнению с установкой с большим межосевым расстоянием, вычисляется по формуле:

$$F_1 = \frac{F_2}{\frac{R_2}{R_1}}, \quad (8)$$

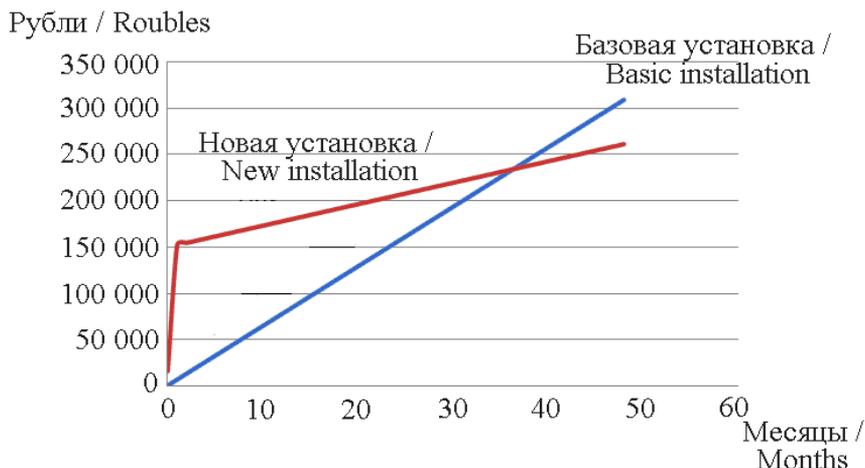
где R_2 – радиус вращения с межосевым расстоянием большим, чем сумма радиусов валов; R_1 – радиус вращения с межосевым расстоянием меньшим, чем сумма радиусов двух валов.

При различных межосевых расстояниях на новой и базовой установках при обработке деталей сложного профиля незакрепленной мелкодисперсной абразивной средой на новой конструкции установки (рис. 1) сопротивление абразивной среды снижается в $\frac{20}{5} = 4$ раза.

Рассчитан также прогиб оправки при абразивной обработке на новой установке с использованием программы Solid Works 2016. При симуляции в программном продукте исследования нагрузок на оправку и деталь, обрабатываемую в устройстве (рис. 3), давление абразивной среды составило 0,2 МПа.



Р и с. 3. Результаты исследования деформаций в конструкции
F i g. 3. Results of study of deformations in structure



Р и с. 4. Сравнение затрат при использовании базовой и новой установок в течение 48 месяцев
 F i g. 4. Comparison of costs for basic and new installations during 48-months period

Поскольку радиус вращения детали при ее обработке на базовой установке в 4 раза больше, чем в новой, для работы новой установки, согласно результатам экспериментальных исследований, требуется мощность двигателя в 4 раза меньше, чем в установке с увеличенным межосевым расстоянием A . Экономия средств S при работе на данной установке (рис. 4) в течение 1 ч составляет

$$S = (N_{\phi 2} - N_{\phi 1}) \cdot a, \quad (9)$$

где a – стоимость 1 кВт; $N_{\phi 2}$ – фактическая мощность двигателя для устройства с межосевым расстоянием большим, чем сумма радиусов валов; $N_{\phi 1}$ – фактическая мощность двигателя для устройства с межосевым расстоянием меньшим, чем сумма радиусов валов.

Подставив значения в формулу (8), получим:

$$S = (8 - 2) \cdot 3.53 = 21,18 \text{ руб.}$$

Экономия в год S_r при двусменном графике составляет

$$S_r = 21,18 \cdot 3\,968 = 84\,042,24 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости новой конструкции установки – 38 месяцев.

Обсуждение и заключение

1. Установлено, что при обработке сложнопрофильных деталей типа колес турбин турбокомпрессора наиболее эффективным способом является камерная обработка уплотненными мелкодисперсными абразивными средами с применением оборудования, состоящего из рабочей камеры и установленной в ней эластичной оболочки, с помощью которой давлением сжатого воздуха обеспечивается поджатие обрабатываемой среды к поверхности детали.

2. Предложена новая конструкция установки, позволяющая обеспечить планетарное вращение детали при малом межосевом расстоянии оправки с деталью и шпинделем устройства, что повышает качество обработки и уменьшает энергетические затраты.

3. Изучен характер воздействия абразивной среды на поверхность обрабатываемой детали, что дает возмож-



ность определить режимные параметры обработки.

4. Экспериментально установлено, что обработка поверхностей сложной формы колес турбин из труднообрабатываемых литейных сплавов марки ЖСЗДК с твердостью 40–45 HRC и исходной шероховатостью поверх-

ности $R_a = 3,2$ мкм на новой конструкции установки дает возможность уменьшить шероховатость обработанной поверхности с $R_a = 3,2$ – $2,5$ мкм до $R_a = 0,80$ – $0,63$ мкм. При этом на 8–10% повышается микротвердость поверхностного слоя на глубине 30–50 мкм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Мартынов А. Н.** Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненным инерционными силами : моногр. Саратов : Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 1981. 212 с.
2. **Зверовщиков В. З.** Динамика центробежной обработки деталей дискретным шлифовальным материалом : моногр. Пенза : Изд-во ПГУ, 2005. 200 с.
3. **Зверовщиков В. З., Зверовщиков А. Е.** Динамические характеристики уплотненной массы рабочей загрузки при объемной центробежной обработке деталей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2007. № 1. С. 140–150. URL: https://izvuz_tn.pnzgu.ru/files/izvuz_tn.pnzgu.ru/15107.pdf
4. **Зверовщиков А. Е.** Расширение технологических возможностей объемной центробежно-планетарной обработки // Научные технологии в машиностроении. 2013. № 7. С. 17–23. URL: http://www.mashin.ru/eshop/journals/naukomkie_tehnologii_v_mashinostroenii/2013/27
5. **Зверовщиков А. Е.** Многофункциональная центробежно-планетарная обработка : моногр. М. : Инфра-М, 2016. 176 с.
6. А. с. 1579740 СССР, МКИ В24В 31/08. Способ абразивной обработки деталей / А. Н. Мартынов, В. А. Скрябин, В. М. Федосеев. Опубл. 23.07.90, Бюл. № 27.
7. **Скрябин В. А.** Особенности обработки сложнопрофильных деталей уплотненными мелкодисперсными абразивными средами // Вестник Мордовского университета. 2015. Т. 25, № 4. С. 72–89. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.025.201504.072>
8. А. с. 1805012 СССР, МКИ В 24 В 31/06. Способ камерной обработки свободным абразивом / А. Н. Мартынов, В. З. Зверовщиков, Е. З. Зверовщиков. Опубл. 30.03.93, Бюл. № 12.
9. **Скрябин В. А., Пшеничный О. Ф.** Моделирование процесса микрорезания при обработке деталей уплотненным слоем незакрепленного абразива // Машиностроение : респ. межвед. сб. Минск : Вышэйшая школа, 1988. Вып. 13. С. 33–37.
10. **Скрябин В. А.** Основы процесса субмикрорезания при обработке деталей незакрепленным абразивом : моногр. Пенза : Изд-во ПВАИУ, 1992. 120 с.
11. **Скрябин В. А.** Производительность процесса обработки деталей статически уплотненным слоем абразивного микропорошка // Известия вузов (Сер. «Машиностроение»). 1994. № 4-6. С. 128–130.
12. **Скрябин В. А., Схиртладзе А. Г.** Технологическое обеспечение качества обработки сложнопрофильных деталей уплотненными мелкодисперсными средами : моногр. Старый Оскол : Тонкие наукоемкие технологии, 2015. 240 с.
13. **Скрябин В. А., Схиртладзе А. Г., Рыбаков Ю. В.** Новый метод финишной обработки деталей свободными мелкодисперсными средами // Технология металлов. 2003. № 2. С. 16–17.
14. **Скрябин В. А., Свечникова Г. И.** Экспериментальные исследования производительности финишной абразивной обработки деталей с различным профилем // Машиностроитель. 2011. № 4. С. 18–22. URL: <https://rucont.ru/efd/473243>

15. Патент 1803308 (РФ), МКИ: В24В 31/104. Способ обработки деталей / В. А. Скрябин // Опубл. 23.03.93, Бюл. № 11.

Поступила 20.09.2017; принята к публикации 02.04.2018; опубликована онлайн 28.12.2018

Об авторе:

Скрябин Владимир Александрович, профессор кафедры технологии машиностроения, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» (440000, Россия, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), доктор технических наук, ResearcherID: R-2385-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7156-9198>, vs_51@list.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Martynov A. N. [*Fundamentals of the Method of Treating Details with a Free Abrasive Compacted by Inertial Forces: A Monograph*]. Saratov: Saratov University Publ., 1981. 212 p. (In Russ.)
2. Zverovschikov V. Z. [*Dynamics of Centrifugal Processing of Parts of Discrete Grinding Material: A Monograph*]. Penza: Penza State University Publ., 2005. 200 p. (In Russ.)
3. Zverovschikov V. Z., Zverovschikov A. E. [Dynamic characteristics of the compacted mass of the working load at a high volume centrifugal processing of parts]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskiye nauki* = Higher Education Institutions Bulletin. Volga Region. Technical Sciences. 2007; 1:140–150. Available at: https://izvuz_tn.pnzgu.ru/files/izvuz_tn.pnzgu.ru/15107.pdf (In Russ.)
4. Zverovschikov A. E. Expansion of technological capabilities of three-dimensional centrifugal planetary processing. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2013; 7:17–23. Available at: http://www.mashin.ru/eshop/journals/naukoemkie_tekhnologii_v_mashinostroenii/2013/27 (In Russ.)
5. Zverovschikov A. E. *Multifunctional Centrifugal Planetary Processing: A Monograph*. Moscow: Infra-M; 2016. 176 p. (In Russ.)
6. Certificate of Authorship No. 1579740 of the USSR, MКИ В24В 31/08. Method of abrasive treatment of details / Martynov A. N., Skryabin V. A., Fedoseev V. M. Publ. 23.07.90. Bulletin No. 27. (In Russ.)
7. Skryabin V. A. The features of the treatment of figurine details by close-settled fine abrasive media. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2015; 25(4):72–89. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.025.201504.072> (In Russ.)
8. Certificate of Authorship 1805012 of the USSR, MКИ 5 В24 31/06. Chamber method of processing free abrasive / Martynov A. N., Zverovschikov V. Z., Zverovschikov E. Z. (USSR). Publ. 30.03.93. Bulletin No. 12. (In Russ.)
9. Skryabin V. A., Pshenichnyy O. F. [The design of the microcutting process in treating details by a close-settled layer of unsupported abrasive]. In: *Engineering: Proceedings*. Minsk: Vysheyshaya Shkola Publ.; 1988; 13:33–37. (In Russ.)
10. Skryabin V. A. [*Bases of Process of Submicrometre at Treatment of Details an Unsupported Abrasive: A Monograph*]. Penza: PVAIU Publ.; 1992. 120 p. (In Russ.)
11. Skryabin V. A. [Productivity of the treatment of details by statically close-settled layer of abrasive flour grain]. *Izvestiya vuzov: Mashinostroeniye* = Higher Education Institutions Bulletin: Engineering. 1994; 4-6:128–130. (In Russ.)
12. Skryabin V. A., Skhirtladze A. G. *Technological Providing of Quality of Treatment of Figurine Details Close-Settled Fine Environment: A monograph*. Staryy Oskol: Thin Knowledge-Based Technologies Publ.; 2015. 240 p. (In Russ.)



13. Skryabin V. A., Skhirtladze A. G., Rybakov Yu. V. A new method of finishing parts with free fine media. *Tekhnologiya metallov* = Metal Technology. 2003; 2:16–17. (In Russ.)

14. Skryabin V. A., Svechnikova G. I. The experimental studies of the finish abrasive treatment of parts with different profiles. *Mashinostroitel* = Mechanician. 2011; 4:18–22. Available at: <https://rucont.ru/efd/473243> (In Russ.)

15. Patent 1803308 (Russian Federation), MKI: B24B 31/104. Method of processing of details / Skryabin V. A. Publ. 23.03.93. Bulletin № 11. (In Russ.)

Received 20.09.2017; revised 02.04.2018; published online 28.12.2018

About author:

Vladimir A. Skryabin, Professor, Mechanical Engineering Chair, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440000, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: R-2385-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7156-9198>, vs_51@list.ru

The author has read and approved the final version of the paper.



Ресурс подвижных уплотнительных соединений с кольцами круглого сечения

В. В. Кузнецов

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

imesrv@mail.ru

Введение. В настоящее время проблема надежности уплотнительных соединений гидроприводов остается нерешенной, однако современный уровень развития инструментов компьютерного моделирования позволяет эффективно решать задачи в области определения их долговечности за счет замены трудоемких экспериментов высокопроизводительными вычислениями. В данной статье представлены результаты апробации авторской методики, реализующей численные подходы по определению ресурса уплотнительных соединений на базе уплотнителя круглого сечения гидроусилителя руля тракторов семейства МТЗ.

Материалы и методы. Определение ресурса подвижных уплотнительных соединений выполнено на основе авторской методики, в рамках которой в программе ANSYS реализуется серия циклов ускоренного нагружения, моделирующая реальные условия эксплуатации. Разработанные модели в комплексе учитывают процессы изнашивания, релаксации и гидродинамического воздействия, развивающиеся в уплотнительном соединении.

Результаты исследования. Применение инструментов конечно-элементного моделирования позволило определить изменение напряженно-деформированного состояния уплотнителя гидроусилителя руля тракторов семейства МТЗ в процессе эксплуатации. Выявлен механизм восстановления герметичности соединения на основе эффекта самоуплотнения. Сравнение форм сечений, полученных в результате численного и микрометражного исследований, подтверждает эффективность предложенной методики и адекватность полученных результатов. Анализ полученных графиков показывает, что при нормальных условиях эксплуатации ресурс уплотнительного соединения «цилиндр – поршень» и «шток – крышка» составляет 2 и 1,12 года соответственно, а при увеличении температуры и давления гидравлической жидкости экспоненциально убывает.

Обсуждение и заключение. Результаты работы показывают высокую эффективность авторской методики и могут быть использованы в исследованиях по определению ресурса и критериев потери герметичности уплотнительных соединений. Графики зависимости ресурса уплотнительных соединений от температуры и гидравлического давления позволяют компаниям, специализирующимся на создании и ремонте гидроприводов, разработать графики планово-предупредительных мероприятий по их обслуживанию с учетом комплекса эксплуатационных факторов.

Ключевые слова: уплотнитель, уплотнитель круглого сечения, гидропривод, надежность, ресурс, срок службы, износ, релаксация, ANSYS, конечно-элементный анализ

Благодарности: Исследование проведено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Республики Мордовия в рамках проекта «Получение и исследование новых композиционных полимерных материалов, содержащих тонкодисперсные и наноразмерные модификаторы, для элементов трибосопряжений машин» (грант №18-48-130007а_р).

© Кузнецов В. В., 2018



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



Для цитирования: Кузнецов В. В. Ресурс подвижных уплотнительных соединений с кольцами круглого сечения // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 4. С. 562–582. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.562-582>

The Resource of Movable Sealing Joints with the O-Ring Seal

V. V. Kuznetsov

National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

imesrv@mail.ru

Introduction. The problem of reliability of hydraulic drives sealing joints remains unsolved. However, the current level of computer modeling tools development allows us to solve effectively the problems of their longevity by replacing laborious experiments with high-performance computing. This paper presents the results of the approbation of the author's methodology for realizing computational approaches to determining the life of sealing joints on the basis of circular cross-section seal of hydraulic booster for MTZ (Minsk Tractor Works) tractors.

Materials and Methods. The determination of mobile sealing joints resource is based on the author's methodology, which used ANSYS for realizing a series of accelerated loading cycles that simulates real operating conditions. The developed models consider the processes of wearing, relaxation and hydrodynamic effects acting in a sealing joint.

Results. The use of the finite element modeling tools made it possible to determine the change in the stress-strain state of the power steering tightener in MTZ tractors during operation. The mechanism of joint tightness restoration on the basis of self-packing effect is revealed. The comparison of the forms of sections, obtained as a result of numerical and micrometer studies, confirms the effectiveness of the proposed methodology and the adequacy of the results obtained. The analysis of the obtained graphs shows that under normal operating conditions, the life of the sealing joint "cylinder – piston" and "rod – cover" is 2 and 1.12 years respectively, and as the temperature and pressure of the hydraulic fluid increase, decreases exponentially.

Conclusions. The results of the study show the high efficiency of the author's methodology. This technique can be used in researches to determine the resource and criteria for the leak-tightness of sealing joints. The graphs of the dependence of the sealing joints life on temperature and hydraulic pressure allow companies, specializing in the creation and repair of hydraulic drives, to develop schedules of preventive measures for their maintenance considering a complex of operational factors.

Keywords: seal, O-ring, hydraulic drive, reliability, life, service life, wear, relaxation, ANSYS, finite element analysis

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Republic of Mordovia in the framework of the project "Obtaining and research of new composite polymeric materials containing finely dispersed and nanosized modifiers for machine tribo-conjugation elements" (Grant No. 18-48-130007a_p).

For citation: Kuznetsov V. V. The Resource of Movable Sealing Joints with the O-Ring Seal. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(4):562–582. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.562-582>

Введение

В последние несколько лет усилия ведущих производителей гидроприводов направлены на повышение энергоэффективности, в том числе за

счет совершенствования конструкции и систем управления, применения новых материалов и улучшения условий фрикционного взаимодействия. Тем не менее проблема надежности по-

движных уплотнительных соединений (ПУС) гидроприводов остается нерешенной [1–2].

Результаты исследований показывают, что увеличение ресурса уплотнительных соединений (УС) достигается за счет применения уплотнителей манжетного или комбинированного типа, а также использования материалов с повышенной износостойкостью и низкой скоростью накопления пластических деформаций [3–8]. Однако высокая стоимость новых материалов, необходимость привлечения квалифицированного персонала, а в ряде случаев – сложность обслуживания ограничивают применение новых решений, поэтому ПУС с кольцами круглого сечения (ГОСТ 18829-73¹) и в настоящее время применяются в гидроприводах.

Одной из главных причин отказа от колец круглого сечения в ПУС является отсутствие эффективной универсальной методики численного или экспериментального определения их ресурса. Реализация экспериментальных подходов ограничивается их высокой трудоемкостью и отсутствием данных об изменении напряженно-деформированного состояния (НДС) уплотнителя в процессе эксплуатации, а численных – использованием допущений, не позволяющих достаточно точно прогнозировать ресурс ПУС.

Ранее была предложена авторская методика определения ресурса ПУС на базе колец круглого сечения², в которой устранены основные недостатки, свойственные численным методам определения ресурса. Основной целью данной статьи является определение ресурса ПУС цилиндра гидроусилителя руля (ГУР) тракторов семейства МТЗ в рамках апробации данной методики.

Обзор литературы

Анализ ряда научных работ последних лет показывает, что в области повышения надежности уплотнительных соединений идет активный поиск новых решений. В частности, рассматриваются новые перспективные конструкции М-, V- и U-образных манжет силовых гидроцилиндров, отличающиеся увеличенным ресурсом, конструктивной простотой, удобством монтажа и малым весом [3; 5].

Результаты экспериментального определения долговечности нового полимерного композиционного материала на основе политетрафторэтилена для уплотнительных устройств возвратнопоступательного движения приведены О. А. Мамаевым и соавт. [4]. Показано, что после полугодовой выдержки в условиях повышенной температуры и объемного сжатия показатели механических и триботехнических свойств материала ухудшаются не более чем на 10 %.

Р. Флитни [6] выполнена большая работа по анализу и систематизации результатов теоретических и экспериментальных исследований, направленных на выявление механизмов потери работоспособности уплотнителей и создание рекомендаций по выбору материалов и конструктивных решений при проектировании уплотнительных узлов. Однако ученым практически не рассмотрены вопросы численного определения ресурса уплотнительных узлов.

С применением численных и экспериментальных методов авторами другой работы [7] определено влияние профиля сечения уплотнения, относительной скорости скольжения, давления гидравлической жидкости и ше-

¹ Кольца резиновые уплотнительные круглого сечения для гидравлических и пневматических устройств. Технические условия : ГОСТ 18829-73. С Изменениями № 1, 2, 3, 4. Введ. 1975-01-01. М. : Изд-во стандартов, 1990. 29 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-18829-73>

² Кузнецов В. В. Методика определения ресурса подвижных уплотнительных соединений гидравлических и пневматических устройств // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : междуз. сб. науч. тр. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2017. С. 556–567.



роховатости тел на объем утечек, силу трения и износ уплотнителя соединения возвратно-поступательного типа. Показано, что результаты численных и теоретических исследований хорошо согласуются, а U-образный уплотнитель обладает лучшими эксплуатационными показателями, чем уплотнитель прямоугольного сечения.

Другими исследователями [8] представлены результаты исследования механизмов потери работоспособности уплотнителя комбинированного типа оригинальной конструкции. На основе конечно-элементного анализа и экспериментальной апробации его результатов показано, что комбинированный уплотнитель обеспечивает герметичность соединения пары вращения в течение 10 ч при давлении окружающей среды менее 30 МПа.

Современные инструменты конечно-элементного (КЭ) моделирования позволяют получить адекватное решение ряда прикладных задач в области определения НДС элементов УС и их надежности³ [9–18]. Так, в результате КЭ-анализа в ANSYS определены влияние гидравлического давления на НДС уплотнителя поршня гидропривода самолета, причины и критерии его отказа [1].

В программе ANSYS учеными разработана модель уплотнителя, которая показывает, что напряжения, деформации, давления и сила трения увеличиваются с ростом давления гидравлической жидкости (далее – жидкости), степени сжатия уплотнителя и уменьшением ширины канавки. Особо отмечено, что оптимальная степень сжатия уплотнителя зависит от варианта его монтажа и что существуют ограничения по минимальной ширине канавки [9].

Другими исследователями оценено влияние изменения вязкоупругих свойств материала уплотнителя на эффективность работы УС [10]. На основе моделирования в MAPDL авторами показано, что увеличение диаметра поперечного сечения и степени сжатия уплотнителя, времени релаксации релаксатора вязкоупругой модели и внутреннего давления приводит к увеличению контактного давления и повышению эффективности работы УС при дальнейших изменениях зазора.

В рамках КЭ-анализа [11] определены деформации, напряжения, критерии и механизмы потери работоспособности уплотнения при старте ракетносителя; показано, что степень сжатия уплотнителя и величина зазора в УС определяют уровень максимальных контактных напряжений, а ширина и форма дна канавки – уровень максимальных напряжений сдвига.

В большинстве работ [1; 9–11] КЭ-моделирование является инструментом оценки НДС элементов УС только в начальный момент времени, не учитывая влияние процессов изнашивания. С развитием инструментов моделирования процессов изнашивания и трения появилось множество исследований в области трибологии⁴ [19–20]. Так, на примере моделирования процессов изнашивания и ползучести материала прямоугольного параллелепипеда с волнистостью на верхней грани, контактирующей с абсолютно жесткой неизнашиваемой поверхностью, показана эффективность и адекватность разработанных в ANSYS моделей⁵.

Аналогичные подходы использованы компанией Emerson Climate Technology (США) при прогнозировании износа политетрафторэтиленового уплотне-

³ **Aksenov A., Iliine K.** Influence of interaction between oil and rubber on valve stem seal oil leakage // 2006 ABAQUS Users' Conference. P. 1–16. URL: https://fv-tech.com/images/articles/2015/Influence_of_Interaction_Between_Oil_and_Rubber_on_Valve_Stem_Seal_Oil_Leakage.pdf

⁴ **Thompson J., Thompson M. K.** A proposal for the calculation of wear mechanisms of wear // 2006 International ANSYS Users Conference & Exhibition. Conference Paper. 2006. P. 75–89. URL: https://www.researchgate.net/publication/242270357_A_Proposal_for_the_Calculation_of_Wear

⁵ Там же.

ния валов [20]. Авторами этой работы предложен алгоритм моделирования в ANSYS износа уплотнителя с перестройкой КЭ-сетки, учитывающий изменение контактного давления в УС, а также показаны изменения профиля и градиента давлений на поверхности уплотнителя.

Исследования влияния процессов изнашивания⁶ [19–20] показывают достаточно адекватные результаты, однако моделирование длительного функционирования УС без учета релаксационных процессов является грубым допущением и требует отдельного обоснования.

Ряд работ последних лет [19; 21–25] посвящен проблемам долговечности УС. Так, на основе модели Прони и принципа температурно-временной суперпозиции учеными спрогнозировано время безотказной работы УС топливных элементов электромобилей [21].

Другими исследователями [19] в программе ABAQUS разработана КЭ-модель уплотнителя цилиндра актуатора шасси самолета, учитывающая процессы его изнашивания. На основе модели сохранения работоспособности данного УС определены объем изношенной части уплотнителя и его долговечность.

Системный подход, учитывающий условия эксплуатации и механизм разрушения материала при оценке долговечности УС гидроцилиндров, реализован китайскими учеными [23]. Авторами определено изменение параметров модели материала Муни – Ривлина уплотнителя в процессе эксплуатации и предложен критерий надежности УС, учитывающий уровни предельных напряжений в уплотнителе и контактных давлений. Результаты данной работы показывают, что расчетное значение срока службы

УС (1 год) совпадает с экспериментально полученным.

Теоретическому исследованию влияния процессов старения материала уплотнителя при различных температурах на его срок службы посвящена работа [24]. Ее авторами спрогнозирован срок службы уплотнений при различных температурах и дана оценка адекватности полученных результатов.

Анализ литературных источников в области надежности УС позволяет сделать вывод, что численное решение находит только ряд частных задач⁷ [19; 21–24], причем с существенными допущениями. Несмотря на наличие высокоэффективных инструментов моделирования, позволяющих в комплексе описать процессы трения, релаксации напряжений и изнашивания в ПУС, прогнозирование его ресурса, как правило, осуществляется на основе малоэффективных и устаревших экспериментальных подходов.

Настоящее исследование основано на результатах работы⁸, в рамках которой предложена авторская методика численного определения ресурса ПУС, построенная на концепции замены непрерывного режима нагружения в процессе эксплуатации множеством циклов ускоренного. Отличительной особенностью настоящего исследования является моделирование накопления пластических деформаций и изнашивания элементов в рамках каждого цикла, включающего стадии реализации износа подвижного контртела (ПК), нагружения уплотнителя при прямом и обратном ходе ПК.

Материалы и методы

Моделирование стадий цикла реализовано в виде отдельных шагов решения в ANSYS (MAPDL). Процессы

⁶ Там же.

⁷ FSA Technical Committee. Extend mechanical seal life // Pumps & Systems. January 2014. P. 62–63. URL: <http://www.fluidsealing.com/sealingsense/Jan14.pdf>

⁸ Кузнецов В. В. Методика определения ресурса подвижных уплотнительных соединений гидравлических и пневматических устройств // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : межвуз. сб. науч. тр. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2017. С. 556–567.



трения и изнашивания уплотнителя описаны на основе экспериментальных зависимостей [25] с помощью программируемых пользователем функций (UPFs).

Износ в k -ом узле КЭ-сетки уплотнителя за цикл

$$dh_k = f(k_w, dt, v_k, T, P_k), \quad (1)$$

где d_t – длительность цикла, лет; v_k – скорость скольжения в k -ом узле, мм/с; T – температура, °С; P_k – контактное давление в k -ом узле, Па; k_w – коэффициент ускорения процессов изнашивания уплотнителя, мм/год,

$$k_w = S_f N_{\text{ц}} / (n_{\text{ц}} t_{\text{пр}}),$$

где S_f – путь трения за один цикл срабатывания ПУС, мм; $N_{\text{ц}}$ – количество циклов срабатывания ПУС за время $t_{\text{ц}}$, ед.; $n_{\text{ц}}$ – количество циклов, ед.; $t_{\text{пр}}$ – действительное время циклов срабатывания ПУС, лет.

С учетом результатов, полученных автором⁹, описание поведения материала уплотнителя осуществляется с помощью модели гиперупругого материала Гента, позволяющей, в отличие от наиболее часто используемых моделей (Муни – Ривлина, Огдена и др.), реализовать до 300 % деформаций. Ускорение процессов накопления пластических деформаций уплотнителем обеспечено введением в обобщенную модель Максвелла¹⁰ коэффициента k_G :

$$G(t) = G_0 \left[\alpha_{G\infty} + \sum_{i=1}^{n_G} \alpha_i \exp(-k_G t / \tau_i) \right], \quad (2)$$

где G_0 – начальное значение модуля сдвига при температуре T_i , МПа; α_i , τ_i –

относительный модуль и время релаксации i -ого релаксатора; n_G – количество релаксаторов; t – действительное время, лет.

Учитывая зависимость скорости накопления пластических деформаций от температуры и особенности температурных режимов эксплуатации и простоя ПУС, в модель введено понятие фиктивного времени цикла:

$$t_{\text{фц}} = (t_p + t_{\text{пр}}) / n_{\text{ц}}, \quad (3)$$

где t_p – общее время работы ПУС при температуре T_i , лет; $t_{\text{пр}}$ – общее время простоя ПУС, приведенное к температуре T_i , лет.

Общее время работы ПУС при температуре T_i :

$$t_p = t_{\text{см}} n_{\text{см}} n_{\text{д}} / t_{\text{г}}, \quad (4)$$

где $t_{\text{см}}$ – количество часов в смене, ч; $n_{\text{см}}$ – количество смен в сутках; $n_{\text{д}}$ – количество рабочих дней в году; $t_{\text{г}}$ – годовой фонд времени, ч.

Общее время простоя ПУС, приведенное к температуре T_i :

$$t_{\text{пр}} = \exp \left[E / R(T_i + 273.15) \right] \times \exp \left[-E / R(T_0 + 273.15) \right] t_i, \quad (5)$$

где E – энергия активации изменения времени релаксации, Дж/моль; t_i – общее время простоя ПУС при температуре простоя $T_0 = 20$ °С.

Действительное (реальное) время цикла $t_{\text{дц}}$ определяется по формуле:

$$t_{\text{дц}} = t_{\text{мч}} / n_{\text{ц}} \quad \text{или} \quad t_{\text{дц}} = t_{\text{л}} / n_{\text{ц}}, \quad (6)$$

где $t_{\text{мч}}$, $t_{\text{л}}$ – действительное время работы ПУС в моточасах и годах.

⁹ Кузнецов В. В. Гиперупругие модели полимерных материалов // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. Саранск : Типография «Рузаевский печатник», 2016. С. 275–281. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26276059>

¹⁰ Кузнецов В. В. Методика определения ресурса подвижных уплотнительных соединений гидравлических и пневматических устройств // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : межвуз. сб. науч. тр. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2017. С. 556–567.

Расчетная модель реализована в двухмерной осесимметричной постановке, на сечение уплотнителя нанесена сетка из 1260 КЭ типа PLANE182. Для компенсации искажений КЭ-сетки уплотнителя в процессе изнашивания применена нелинейная адаптация сетки (Mesh Nonlinear Adaptivity).

С учетом упруго-прочностных свойств деталей ПУС выбран Rigid-To-Flexible класс контакта. Контактное взаимодействие уплотнителя описано с помощью контактных пар типа Surface-To-Surface. На поверхность уплотнителя нанесены контактные элементы CONTA171 с типом поведения Standard, а на остальные – целевые TARGE169.

Моделирование гидродинамического воздействия на ПУС выполнено на основе команды SFE. Однако данный механизм приложения давления не позволяет корректно описать градиенты давлений в зазорах, изменяющихся вследствие износа деталей ПУС, поэтому герметичность соединения определялась отдельно в связанной постановке в программе ANSYS Workbench¹¹. Она предполагает отдельное решение задач течения жидкости в зазорах ПУС в ANSYS Fluent и приложения градиента давления к деталям ПУС в ANSYS Mechanical. Связывание физических полей осуществляется трансферами перемещений КЭ-сетки уплотнителя в ANSYS Fluent и обновленного градиента давлений в ANSYS Mechanical с сохранением сходимости при пошаговом нагружении. Для обеспечения корректного импорта данных между MAPDL и ANSYS Workbench реализованы стадии демонтажа и монтажа уплотнителя в узле.

Применение технологий высокопроизводительных распределенных вычислений, многократное сокращение количества циклов при сохранении необходимой точности результатов позволило значительно сократить сроки проведения исследований.

Результаты исследования

С учетом результатов микрометражных исследований деталей уплотнительных узлов гидроцилиндра ГУР¹² для односменного режима нагружения приняты следующие показатели: $S_f = 136$ мм, $N_{ц} = 320$ тыс. циклов, $t_{рц} = 2$ года. Геометрические параметры ПУС¹³, а также физико-механические и триботехнические характеристики материала уплотнителя¹⁴ [26] приняты в соответствии с работами В. И. Борисова и соавторов.

В нормальных условиях рассматриваемые ПУС эксплуатируются при температуре $T = 50$ °С и давлении $P = 10$ МПа, однако для определения степени влияния основных эксплуатационных факторов на их ресурс исследование выполнено при температурах 20–75 °С и давлениях жидкости 4–16 МПа. Предварительный анализ результатов показывает, что НДС деталей ПУС «цилиндр – поршень» («Ц – П») и «шток – крышка» («Ш – К») отличаются только скоростью и диапазонами изменения значений соответствующих величин при схожих механизмах распределения, поэтому в настоящей работе рассматриваются в основном только ПУС «Ц – П».

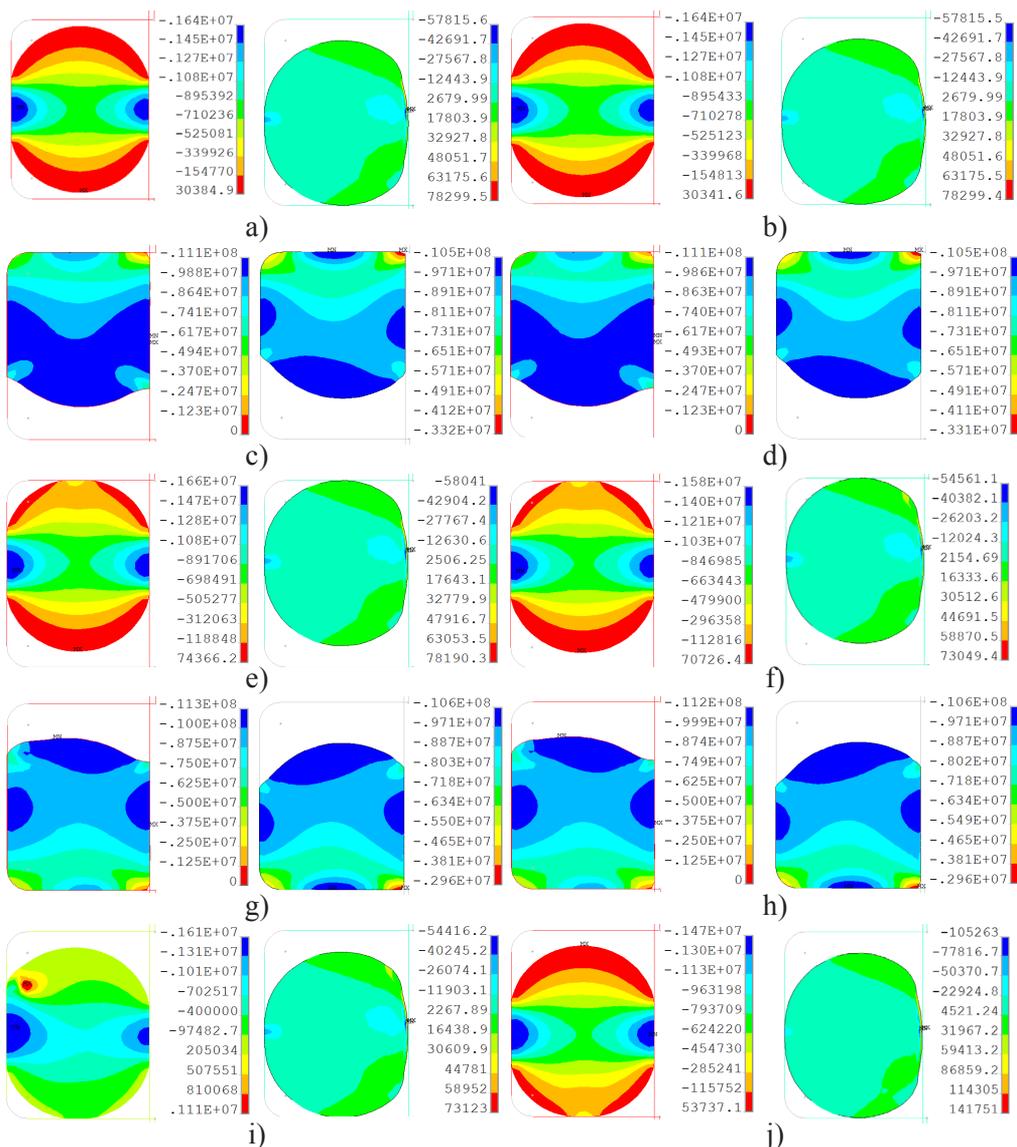
Изучение картин НДС уплотнителя (рис. 1–2) ПУС «Ц – П» по стадиям циклов показывает, что максимумы напряжений (11,1 МПа) и относитель-

¹¹ Там же.

¹² Комплексное исследование состояния подвижных уплотнительных соединений гидроцилиндра ГУР трактора МТЗ-80/82 / В. И. Борисов [и др.] // XXXVII Огаревские чтения : мат-лы науч. конф. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2009. С. 3–6. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24270465>

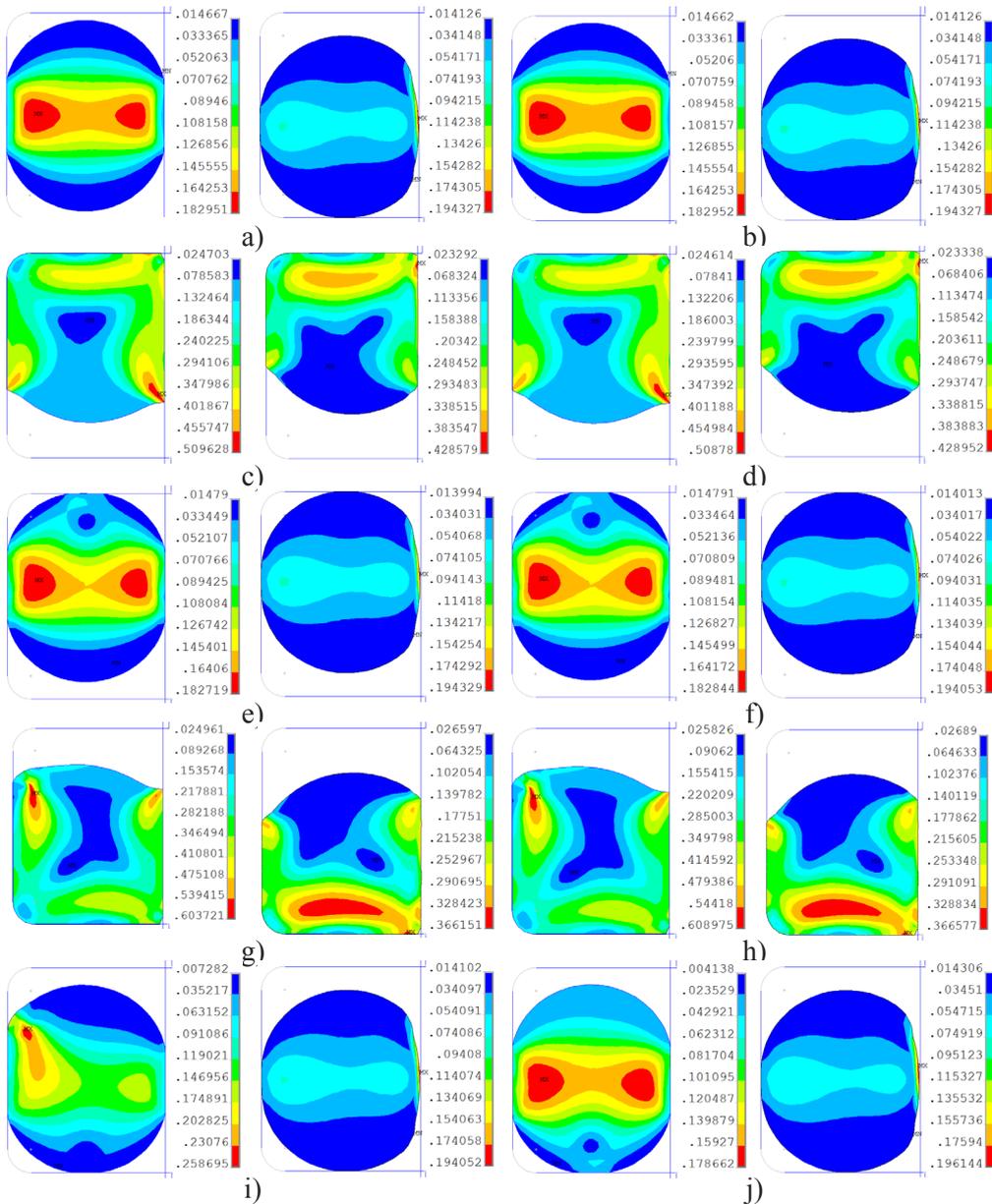
¹³ Там же.

¹⁴ Исследование физико-механических характеристик полимерных материалов при длительном статическом нагружении / В. И. Борисов [и др.] // Энергоэффективность технологий и средств механизации в АПК : мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. Саранск : ППО-Движение, 2011. С. 134–145. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23959490>



Р и с. 1. Напряжения σ_x в сечении уплотнителя по стадиям 1-го ($t = 0,04$ года, слева) и 50-го ($t = 2,0$ года, справа) циклов нагружения уплотнительного соединения «цилиндр – поршень»: а) уплотнитель после предыдущего цикла (монтажа); б) износ цилиндра; в) приложение прямого давления; д) прямой ход поршня; е) сброс давления; ф) релаксация; г) приложение обратного давления; д) обратный ход; и) сброс давления; ж) релаксация

F i g. 1. Stresses σ_x in the seal section for the stages of the 1st ($t = 0.04$ years, on the left) and the 50th ($t = 2.0$ years, on the right) loading cycles of the sealing joint “cylinder – piston”: а) seal after previous cycle (installation); б) wear of the cylinder; в) application of direct pressure; д) straight stroke of the piston; е) pressure relief; ф) relaxation; г) application of back pressure; д) reverse motion; и) pressure relief; ж) relaxation



Р и с. 2. Относительные деформации $\varepsilon_{\text{уп}}$ в сечении уплотнителя по стадиям 1-го ($t = 0,04$ года, слева) и 50-го ($t = 2,0$ года, справа) циклов нагружения уплотнительного соединения «цилиндр – поршень»: а) уплотнитель после предыдущего цикла (монтажа); б) износ цилиндра; с) приложение прямого давления; д) прямой ход поршня; е) сброс давления; ф) релаксация; г) приложение обратного давления; h) обратный ход; и) сброс давления; j) релаксация

Fig. 2. Relative deformations of the $\varepsilon_{\text{уп}}$ in the seal section in the stages of the 1st ($t = 0.04$ years, on the left) and 50th ($t = 2.0$ years, on the right) loading cycles of the “cylinder – piston” seal: а) seal after the previous cycle (installation); б) wear of the cylinder; с) application of direct pressure; д) straight stroke of the piston; е) pressure relief; ф) relaxation; г) back pressure application; h) reverse motion; и) pressure relief; j) relaxation



ных деформаций (60,3 %) наблюдаются в области зазора при приложении давления жидкости. Уровень максимальных напряжений практически не зависит от износа уплотнителя и ПК, направления приложения давления и номера цикла, т. к. в основном обусловлен величиной давления жидкости.

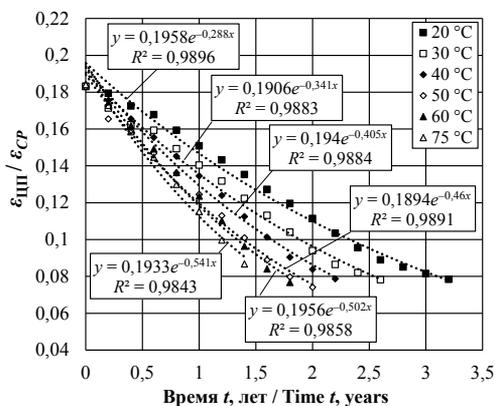
Серия тестов на герметичность показала, что при нормальных условиях полная герметичность ПУС «Ц – П» сохраняется в течение 50 циклов (2 года), а ПУС «Ш – К» – 62 циклов (2,48 года).

По окончании каждого цикла максимальные значения упругих деформаций (рис. 2) наблюдаются в центральном сечении уплотнителя. Их величина в соединении «Ц – П» («Ш – К») достигает 18,3 % (19,3 %) при монтаже и лишь 7,5 % (7,5 %) – после 50 циклов. При приложении давления уровень максимальных упругих деформаций в соединении «Ц – П» («Ш – К») временно увеличивается до 51,0 % (50,9 %) на 1 цикле и до 42,9 % (47,5 %) – к моменту потери герметичности. Как и в случае с картиной распределения нормальных напряжений, максималь-

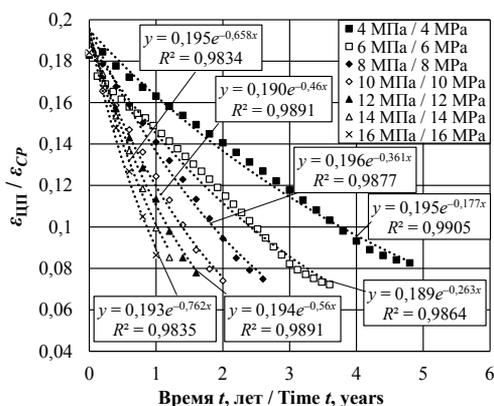
ные значения упругих деформаций в уплотнителе после 50 циклов наблюдаются в его поверхностных слоях, поэтому не могут оказывать определяющего влияния на герметичность ПУС.

Графики на рис. 3–4 показывают, что в течение 3–5 лет эксплуатации наблюдается многократное снижение максимальных напряжений и упругих деформаций, а рост температуры и давления значительно ускоряет его темпы. С другой стороны, напряжения уменьшаются до практически нулевых асимптотических значений, при которых герметичность ПУС восстанавливается еще некоторое время.

Сравнение результатов контактного взаимодействия после монтажа и окончания первого цикла (рис. 5) показывает падение максимальных контактных давлений в ПУС на 8,5 %. Учитывая, что на одном цикле реализуется сверхмалый износ цилиндра, сопоставление контактных давлений на соответствующих стадиях (рис. 5 а–б) не позволяет выявить существенное влияние процессов изнашивания. Однако согласно



а)

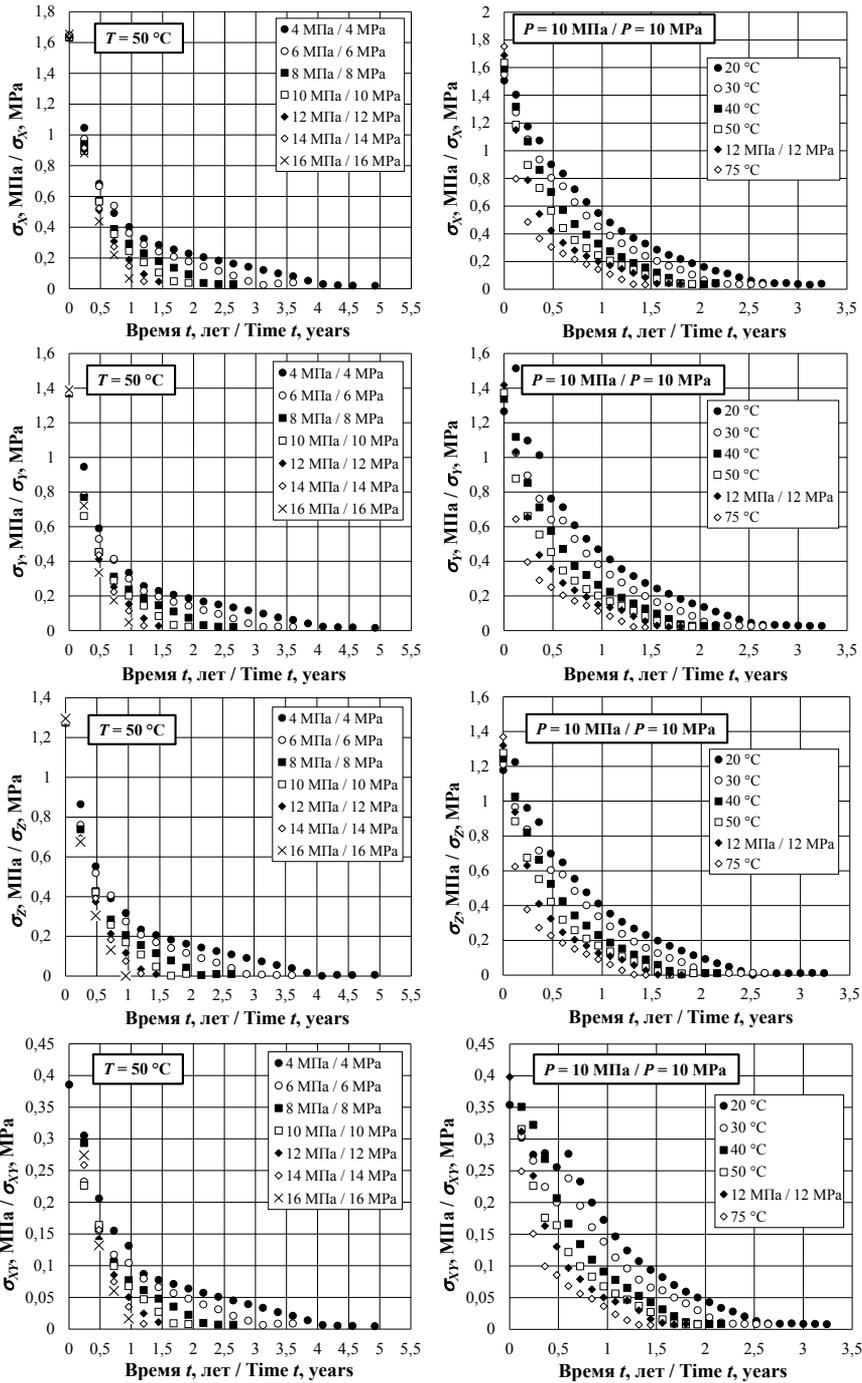


б)

Р и с. 3. Изменение максимальных относительных деформаций $\varepsilon_{шп}$ в уплотнителе соединения «цилиндр – поршень» во времени t при варьировании температуры (а) и давления жидкости (б)

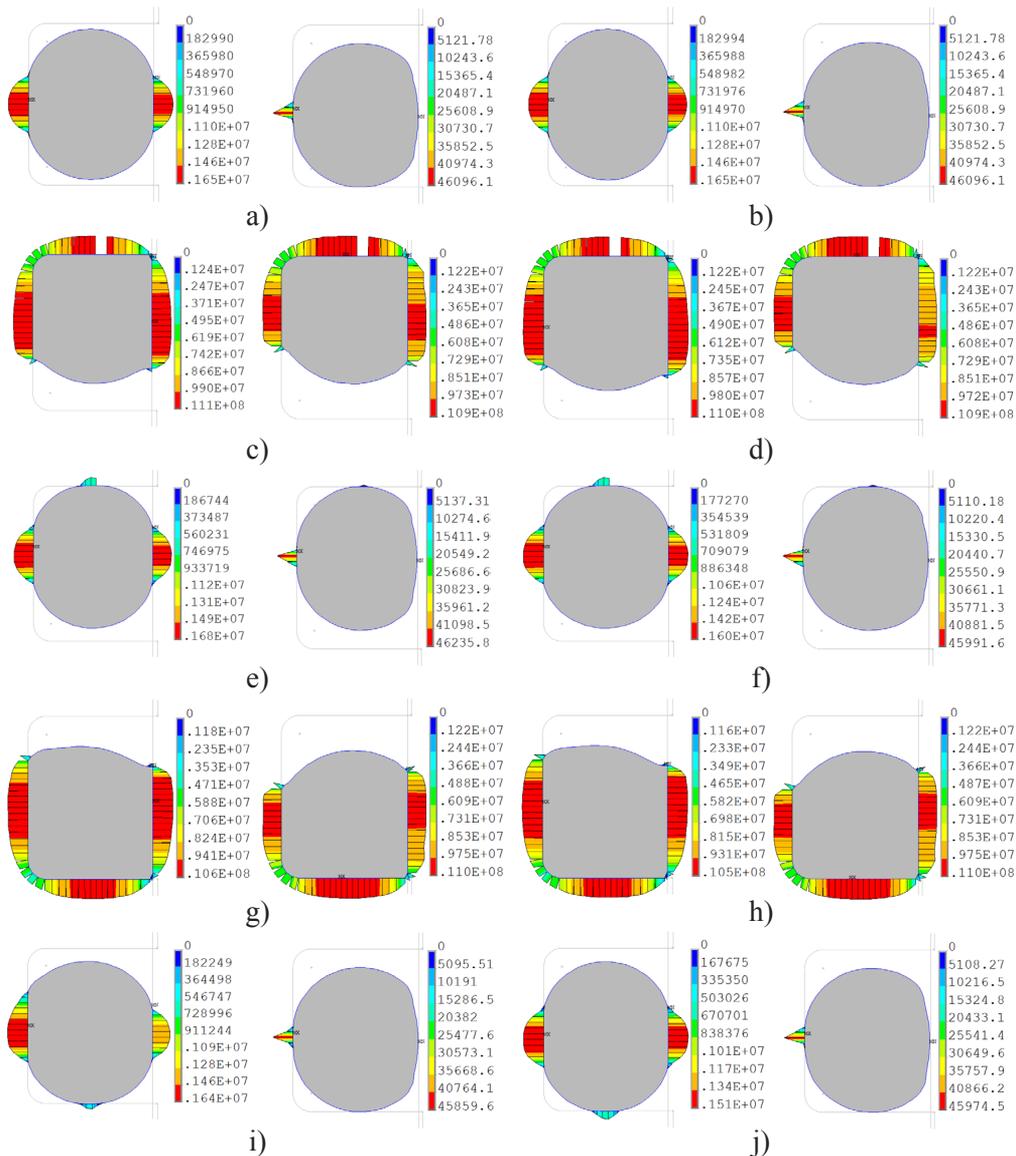
Fig. 3. Change in the maximum relative deformations of the $\varepsilon_{шп}$ in the “cylinder – piston” seal in time t as the temperature (a) and the liquid pressure (b) vary

¹⁵ Комплексное исследование состояния подвижных уплотнительных соединений гидроцилиндра ГУР трактора МТЗ-80/82 / В. И. Борисов [и др.] // XXXVII Огаревские чтения : мат-лы науч. конф. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2009. С. 3–6. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24270465>



Р и с. 4. Изменение максимальных напряжений σ_x , σ_y , σ_z и σ_{xy} в сечении уплотнителя соединения «цилиндр – поршень» в процессе эксплуатации

Fig. 4. Change of the maximum stresses σ_x , σ_y , σ_z and σ_{xy} in "cylinder – piston" seal section during operation



Р и с. 5. Контактные давления в парах трения «цилиндр – уплотнитель» и «поршень – уплотнитель» по стадиям 1-го ($t = 0,04$ года, слева) и 50-го ($t = 2,0$ года, справа) циклов нагружения ПУС «цилиндр – поршень»: а) уплотнитель после предыдущего цикла (монтажа); б) износ цилиндра; в) приложение прямого давления; д) прямой ход поршня; е) сброс давления; ф) релаксация; г) приложение обратного давления; г) обратный ход; и) сброс давления; ж) релаксация

F i g. 5. Contact pressures in friction pairs “cylinder – seal” and “piston – sealer” in stages of 1st ($t = 0.04$ years, on the left) and 50th ($t = 2.0$ years, on the right) loading cycles “cylinder – piston”: а) seal after the previous cycle (installation); б) wear of the cylinder; в) application of direct pressure; д) straight stroke of the piston; е) pressure relief; ф) relaxation; г) back pressure application; г) reverse motion; и) pressure relief; ж) relaxation

работе В. И. Борисова и соавторов¹⁵, предельный износ цилиндра ГУР тракторов семейства МТЗ с диаметром $\varnothing 90^{+0,054}$ мм достигает 142 мкм, а штока с диаметром $\varnothing 30_{-0,034}^{-0,025}$ мм – лишь 5 мкм, поэтому допущение о его отсутствии некорректно.

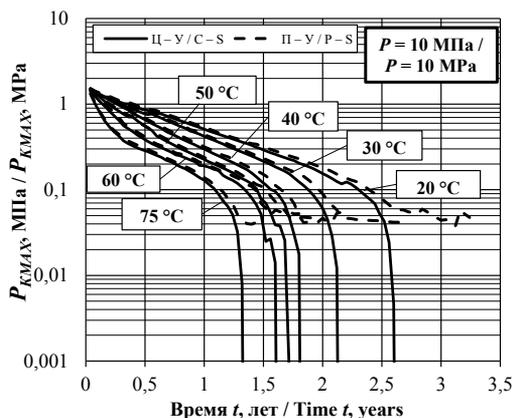
Анализ картин распределения контактных давлений в рассматриваемых ПУС позволяет сделать вывод, что максимальные значения обеспечиваются на стадиях приложения давления жидкости, а их величина соответствует уровню приложенного давления, что подтверждает адекватность решения контактной задачи. Так, в частности, при приложении давления в нормальных условиях эксплуатации на всех контактных площадках ПУС «Ц – П» давления достигают 10,6–11,1 МПа (рис. 5 с, h), что в 6,7 раза выше значений, созданных при монтаже.

Согласно исследованию В. Н. Бугриенко, В. Н. Корнеева и В. В. Капустиной, полная герметичность ПУС обеспечивается при контактных давле-

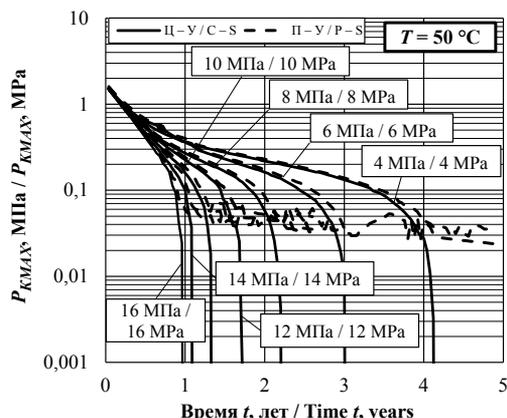
ниях не менее 0,25 МПа¹⁶; однако серия тестов показывает, что она может восстанавливаться при приложении давления жидкости, даже если на других стадиях образуется зазор в соединении «У – ПК». Данный механизм обеспечения герметичности известен как эффект самоуплотнения и проиллюстрирован на рис. 5. Несмотря на образование зазора в соединениях «У – ПК», в соединениях «У – ДК» сохранялись контактные давления на уровне 46,0 (56,7) кПа ПУС «Ц – П» («Ш – К») вплоть до момента потери герметичности, поэтому особый интерес представляет только изменение давлений в соединении «У – ПК».

В результате обработки серии графиков распределения контактных давлений с учетом эффекта самоуплотнения построены графики изменения максимальных контактных давлений в процессе эксплуатации (рис. 6), позволяющие сделать следующие выводы:

1. Увеличение температуры или давления жидкости ускоряет темпы падения контактных давлений в ПУС.



a)



b)

Р и с. 6. Изменение максимальных контактных давлений P_{KMAX} в парах «цилиндр – уплотнитель» (Ц – У) и «поршень – уплотнитель» (П – У) соединения «цилиндр – поршень» в процессе эксплуатации при различных температурах (а) и давлениях жидкости (б)

Fig. 6. Change in the maximum contact pressures P_{KMAX} in pairs “cylinder – seal” (C – S) and “piston – seal” (P – S) of the cylinder–piston joint during operation at different temperatures (a) and pressure of the liquid (b)

¹⁶ Бугриенко В. Н., Корнеев В. Н., Капустина В. В. Долговечность гидроагрегатов навесных систем и рулевых управлений тракторов : обзор. М. : ЦНИИТЭИ, 1973. 63 с.



2. При нормальных условиях эксплуатации контактные давления в соединении «У – ПК» исчезают через 1,72 года в ПУС «Ц – П» и через 2,04 года – в ПУС «Ш – К».

3. В соединении «У – ДК» сохраняются максимальные контактные давления на уровне 10–60 кПа вплоть до полной потери герметичности ПУС.

4. Увеличение температуры эксплуатации с 20 до 75 °С ускоряет падение контактных давлений в соединении «У – ПК» в среднем в 2,0 раза, а увеличение давления жидкости с 4 до 16 МПа – в среднем в 4,4 раза.

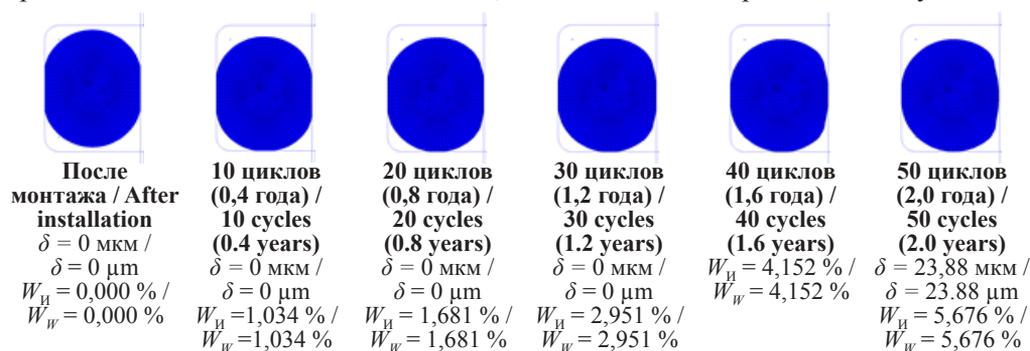
Полученные картины изменения форм сечения уплотнителя (рис. 7) позволяют сделать вывод о наличии на поверхности контакта с ПК следов износа. Учитывая, что путь трения уплотнителя о дно канавки несущественно мал по сравнению с соединением «У – ПК»,

в данной области наблюдается только формоизменение вследствие накопления пластических деформаций.

Однотипные формы сечений (рис. 7) и микрометричных исследований¹⁷ (рис. 8), подтверждающие адекватность результатов и корректность принятых допущений.

Согласно рис. 9, при нормальных условиях эксплуатации работоспособность ПУС «Ц – П» и «Ш – К» нарушается, если объемный износ уплотнителей достигает 5,68 % и 6,16 % соответственно.

Влияние температуры и давления жидкости на уровень предельно допустимого объемного износа уплотнителя можно оценить с помощью графиков на рис. 10. Из них следует, что при увеличении давления жидкости в диапазоне 4–16 МПа предельно допустимый



Р и с. 7. Изменение формы сечения уплотнителя соединения «цилиндр – поршень» в процессе эксплуатации: δ – зазор в соединении «цилиндр – уплотнитель», мкм; $W_{\text{и}}$ – объемный износ уплотнителя, %

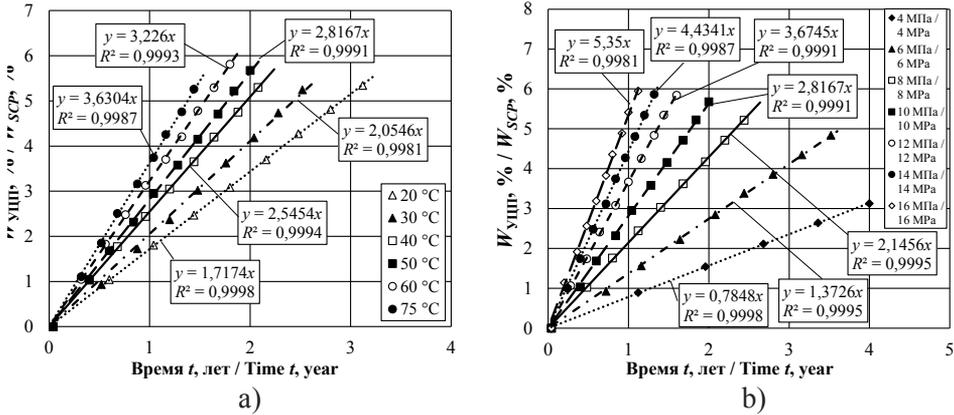
F i g. 7. Changing the shape of the seal section of “cylinder – piston” joint during operation: δ – gap in the “cylinder – seal” joint, μm ; $W_{\text{и}}$ – volumetric wear of the seal, %



Р и с. 8. Характерные формы сечения уплотнителя соединения «цилиндр – поршень», полученные в результате микрометричных исследований

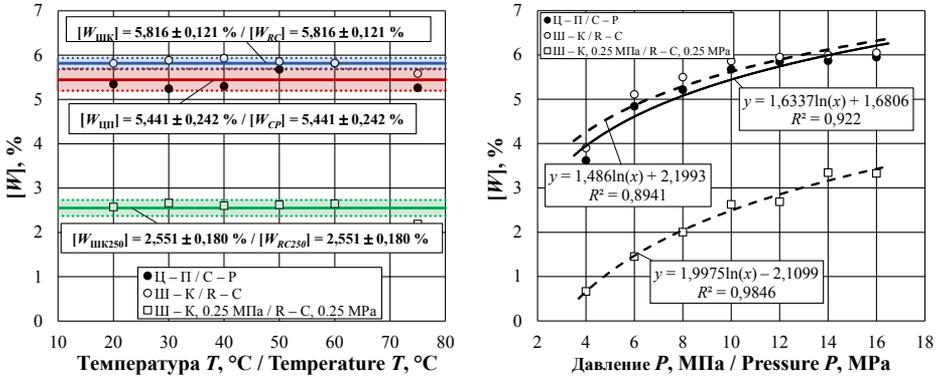
F i g. 8. Typical shapes of seal section in «cylinder – piston» joint, obtained as a result of micrometric studies

¹⁷ Комплексное исследование состояния подвижных уплотнительных соединений гидроцилиндра ГУР трактора МТЗ-80/82 / В. И. Борисов [и др.] // XXXVII Огаревские чтения : мат-лы науч. конф. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2009. С. 3–6. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24270465>



Р и с. 9. Изменение объемного износа уплотнителя $W_{ущп}$ соединения «цилиндр – поршень» в процессе эксплуатации при различных температурах (а) и давлениях жидкости (б)

F i g. 9. Changing the seal volumetric wear $W_{срп}$ of the “cylinder – piston” joint during operation at different temperatures (a) and liquid pressures (b)



Р и с. 10. Зависимости предельного объемного износа $[W]$ уплотнителей соединений «цилиндр – поршень» и «шток – крышка» от температуры (а) и давления жидкости (б): Ц – П и Ш – К – данные, учитывающие эффект самоуплотнения в соединениях «цилиндр – поршень» и «шток – крышка» соответственно; Ш – К, 0,25 МПа – данные полной герметичности соединения «шток – крышка» (при $P_{KMAX} = 0,25$ МПа)

F i g. 10. Dependence of the maximum volume wear $[W]$ of the seal of the “cylinder – piston” and “rod – cover” joints on temperature (a) and liquid pressure (b): C – P and R – C – data that consider the effect of self-sealing in the “cylinder – piston” and “rod – cover” joints, respectively; R – C, 0.25 MPa – data of full joint tightness “rod – cover” (with $P_{KMAX} = 0.25$ MPa)

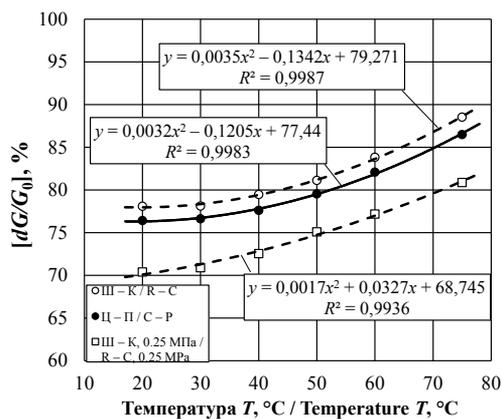
объемный износ уплотнителя увеличивается в среднем на 59,7 % при оценке герметичности с учетом эффекта самоуплотнения и в 5,0 раз – при сохранении полной герметичности в ПУС «Ш – К».

Об уровне накопления пластических деформаций можно судить по величине падения модуля сдвига (рис. 11) в форме

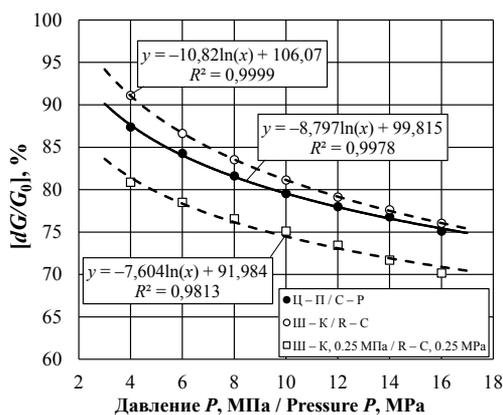
$$[dG] = (G_0 - [G]) / G_0 \cdot 100\%, \quad (7)$$

где G_0 – начальный модуль сдвига, МПа; $[G]$ – модуль сдвига в момент окончания ресурса ПУС, МПа.

Согласно рис. 11 а, рост температуры эксплуатации с 20 до 75 °C ускоряет падение модуля сдвига материала уплотнителя в среднем на 14,1 %, что обусловлено ускорением процессов ре-



a)



b)

Р и с. 11. Зависимости падения модуля сдвига $[dG/G_0]$ материала уплотнителя от температуры (а) и давления жидкости (б): Ц – П и Ш – К – данные, учитывающие эффект самоуплотнения в соединениях «цилиндр – поршень» и «шток – крышка» соответственно; Ш – К, 0.25 МПа – данные, соответствующие полной герметичности соединения «шток – крышка» (при $P_{\text{KMAX}} = 0,25 \text{ МПа}$)

Fig. 11. Dependences of material shear module $[dG/G_0]$ on the temperature (a) and the fluid pressure (b): C – P and R – C – data that consider the effect of self-sealing in the “cylinder – piston” and “rod – cover” joints, respectively; R – C, 0.25 MPa – data of full joint tightness “rod – cover” (with $P_{\text{KMAX}} = 0.25 \text{ MPa}$)

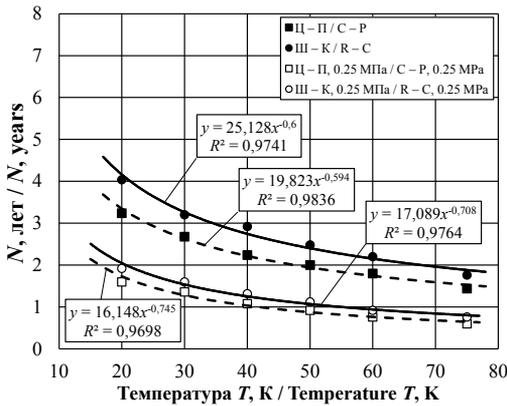
лаксации, а следовательно, и процесс накопления пластических деформаций.

При варьировании давления жидкости развитие релаксационных процессов в уплотнителе определяется только температурой на основе (2), а ресурс ПУС с увеличением давления жидкости уменьшается, поэтому зависимости, представленные на рис. 11 б, носят логарифмический характер.

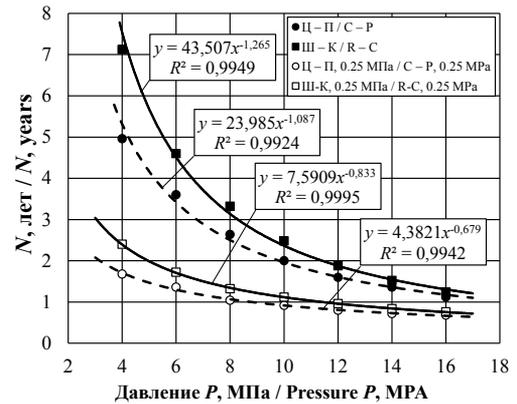
Графики зависимости ресурса от температуры и давления жидкости (рис. 12) показывают, что в нормальных условиях эксплуатации ресурс ПУС «Ц – П» составляет 0,92 года при сохранении полной герметичности соединения и 2,0 года – при оценке герметичности с учетом эффекта самоуплотнения; ресурс ПУС «Ш – К» составляет 1,12 и 2,48 года соответственно. Однако реализация эффекта самоуплотнения в ПУС «Ш – К» сопровождается выбросом жидкости в окружающую

среду, поэтому при определении его ресурса необходимо использовать условия сохранения полной герметичности [31].

Анализ рисунка 12 показывает, что все представленные зависимости хорошо описываются степенными функциями, что позволяет прогнозировать ресурс рассматриваемых ПУС в принятых диапазонах варьирования температуры и давления жидкости. Из рис. 12 б видно, что снижение давления жидкости с 16 до 4 МПа позволит увеличить ресурс ПУС «Ц – П» в 4,43 раза, а ПУС «Ш – К» – в 3,16 раза. С другой стороны, уменьшение температуры (рис. 12 а) с 75 до 20° С позволит увеличить ресурс ПУС «Ц – П» в 3,25 раза и в 2,53 раза – ресурс ПУС «Ш – К». Таким образом, варьирование давления жидкости в диапазоне 4–16 МПа оказывает большее влияние на ресурс, чем изменение температуры в диапазоне от 20–75° С.



а)



б)

Р и с. 12. Зависимости ресурса N уплотнительных соединений «цилиндр – поршень» и «шток – крышка» от температуры (а) и давления (б): Ц – П и Ш – К – данные, учитывающие эффект самоуплотнения в соединениях «цилиндр – поршень» и «шток – крышка» соответственно;

Ц – П, 0,25 МПа и Ш – К, 0,25 МПа – данные, соответствующие полной герметичности соединений «цилиндр – поршень» и «шток – крышка» (при $P_{KMAX} = 0,25$ МПа) соответственно

Fig. 12. Dependence of “cylinder – piston” and “rod – cover” sealing joints life N on the temperature (a) and pressure (b): C – P and R – C – data that consider the effect of self-sealing in the “cylinder – piston” and “rod – cover” joints respectively; C – P, 0,25 МПа and R – C, 0,25 МПа – data of full joint tightness “cylinder – piston” and “rod – cover” (with $P_{KMAX} = 0,25$ МПа) respectively

Обсуждение и заключение

Анализ представленных результатов показывает, что авторская методика¹⁸ позволяет получить адекватную оценку долговечности ПУС.

К основным результатам работы можно отнести: картины изменения контактных давлений в соединениях «У – ПК» в процессе эксплуатации (рис. 6); описание механизмов протекания процессов изнашивания уплотнителей ПУС (рис. 9); зависимости, определяющие влияние температуры и давления жидкости на скорость развития процессов изнашивания и накопления пластических деформаций уплотнителем (рис. 10–11) и ресурс ПУС (рис. 12).

Одним из аспектов, требующих более детального исследования, является сокращение ресурса ПУС вследствие выдавливания уплотнителя в зазор; од-

нако, с учетом сложности решаемых задач и предположения о наличии защитных колец, в рамках настоящего исследования принято допущение о его отсутствии, что значительно упростило вычислительную процедуру.

Другим аспектом рассматриваемой проблемы является влияние периодичности замены уплотнителя на ресурс ПУС. При его рассмотрении в рамках современных подходов к стратегии проведения ремонтно-обслуживающих воздействий по состоянию объекта необходимо исходить из принципа обеспечения ресурса ПУС на уровне ресурса агрегата, поэтому периодичность замены уплотнителя и восстановления размеров контртел ПУС должна совпадать с периодичностью проведения капитального ремонта. С учетом этого полученные результаты позволяют сделать вывод, что ресурс рассматриваемых уплотни-

¹⁸ Кузнецов В. В. Методика определения ресурса подвижных уплотнительных соединений гидравлических и пневматических устройств // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : межвуз. сб. науч. тр. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2017. С. 556–567.



тельных узлов меньше необходимо в 1,5 раза у ПУС «Ц – П» и более чем в 4 раза – у ПУС «Ш – К». Данный вывод носит частный характер и не ограничивает применение ПУС данного типа в рамках других конструкций, т. к. уплотнительные соединения на базе колец круглого сечения обладают множеством неоспоримых преимуществ и могут быть реализованы в ряде конст-

рукций, не предъявляющих столь высоких требований к условиям эксплуатации.

Полученные в данной статье результаты позволяют сделать вывод о высокой эффективности авторской методики¹⁹ и перспективности разработки на ее основе универсальной методики определения ресурса ПУС, в том числе с комбинированным уплотнителем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Sealing mechanism and failure analysis of actuator reciprocating seal / Y. Zhang [et al.] // Proceedings of the 2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Hefei, 2016. P. 2190–2195. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2016.7603952>
2. **Свиньяков Д. С., Толстухин Г. Н.** Прогнозирование надежности работы уплотнений гидроцилиндров // Электронный научный журнал. 2016. № 9 (12). С. 149–153. URL: <http://co2b.ru/docs/enj.2016.09.pdf>
3. **Burenin V. V.** New seals for the moving joint of hydraulic power cylinders // Russian Engineering Research. 2011. Т. 31, № 10. С. 1036–1038. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X11100042>
4. Durability of a polymer composite material and service life of packing elements of contact movable sealing devices / O. A. Mamaev [et al.] // Journal of Friction and Wear. 2008. Vol. 29, Issue 2. P. 127–132. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366608020086>
5. **Буренин В. В.** Новые конструкции уплотнений для подвижных соединений силовых гидроцилиндров объемного гидропривода строительных машин и механизмов // Механизация строительства. 2012. № 1. С. 10–14. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17265461>
6. **Flitney R.** Seals and sealing handbook : 6th edition. Butterworth–Heinemann, 2014. 633 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2012-0-03302-9>
7. Study of effect of seal profile on tribological characteristics of reciprocating hydraulic seals / S. Bhaumik [et al.] // Tribology in Industry. 2015. Vol. 37, No. 2. P. 264–274. URL: <http://www.tribology.rs/journals/2015/2015-2/15.pdf>
8. Sealing performances research on PTFE rotating seal under deep-sea environment / X. Cao [et al.] // The Open Mechanical Engineering Journal. 2015. Vol. 9. P. 475–482. DOI: <https://doi.org/10.2174/1874155X01509010475>
9. **Wang C.-S., Qin Y., An Q.** Finite element analysis for the rubber O-ring in a mechanical seal // Journal of East China University of Science and Technology. 2013. Vol. 39, Issue 6. P. 761–767. DOI: <https://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.2013.06.012>
10. **Lu T., Wang W., Chen L.** A study of the performance of an O-ring seal with viscoelasticity // Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition). 2014. Issue 6. P. 93–97. URL: http://caod.oriprobe.com/articles/45360381/A_study_of_the_performance_of_an_O_ring_seal_with_viscoelasticity.htm
11. Investigation of design parameters and failure criteria of o-ring seal structure / D. Hu [et al.] // ASME Turbo Expo 2005 : Power for Land, Sea, and Air. Vol. 4. P. 405–412. DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2005-68434>
12. **Yang B., Salant R. F.** A numerical model of a reciprocating rod seal with a secondary lip // Tribology Transactions. 2008. Vol. 51, Issue 2. P. 119–127. DOI: <https://doi.org/10.1080/10402000701691746>

¹⁹ Там же.

13. **Stupkiewicz S., Marciszyn A.** Elastohydrodynamic lubrication and finite configuration changes in reciprocating elastomeric seals // Tribology International. 2009. Vol. 42, Issue 5. P. 615–627. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.08.008>
14. **Aissaoui H., Diany M., Azouz J.** Numerical simulation of radial and axial compressed elastomeric O-ring relaxation / Global Journal of Researches in Engineering. Mechanical and Mechanics Engineering. 2012. Vol. 12, Issue 4. P. 1–5. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/5770/527f9483aa521f25d5979612387b20d8a954.pdf>
15. **Niu S.** Sealing performance analysis of rubber O-ring in static seal based on FEM // International Journal of Engineering and Advanced Research Technology. 2015. Vol. 1, Issue 2. P. 32–34. URL: https://www.ijeart.com/download_data/IJEART01118.pdf
16. **Diany M., Aissaoui H.** Finite element analysis for short term O-ring relaxation // Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. 2011. Vol. 5, № 6. P. 478–482. URL: <http://jjmie.hu.edu.jo/files/v5n6/JJMIE%20-91-10.pdf>
17. **Zhang G. L., Zeng Z. B.** Simulation of sealing performance of elastomeric O-ring gasket including metal skeleton // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 556-562. P. 615–619. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.556-562.615>
18. Fluid-solid interaction model for hydraulic reciprocating O-ring seals / C. Liao [et al.] // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2013. Vol. 26, Issue 1. P. 85–94. DOI: <https://doi.org/10.3901/CJME.2013.01.085>
19. Element analysis and wear longevity calculation of an O-ring in the actuator cylinder of a certain aircraft landing gear / Y. Yang [et al.] // 2017 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Harbin). 2017. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/PHM.2017.8079282>
20. **Wang Z.** Predicting wear in radial seals // ANSYS Advantage. 2008. Vol. 2, Issue 1. P. 27. URL: <https://www.ansys.com/-/media/ansys/corporate/resourcelibrary/article/aa-v2-i1-full-version.pdf>
21. Service life estimation of liquid silicone rubber seals in polymer electrolyte membrane fuel cell environment / T. Cui [et al.] // Journal of Power Sources. 2011. Vol. 196, Issue 3. P. 1216–1221. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.08.075>
22. **Lehr D., Furlan W.** Seal life prediction and design reliability in downhole tools // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. SPE, 2017. DOI: <https://doi.org/10.2118/187133-MS>
23. Time-variant reliability analysis for rubber O-ring seal considering both material degradation and random load / B. Liao [et al.] // Materials. 2017. Vol. 10, Issue 10. P. 1211. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma10101211>
24. **Lijesh K., Muzakkir S.** Service life estimation of rubber seals // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11, № 2. P. 980–986. URL: <https://docslide.net/documents/service-life-estimation-of-rubber-seals-life-estimation-of-rubber-seals-lijesh-kp.html>
25. **Борисов В. И., Кузнецов В. В., Водяков В. Н.** Трибологические свойства полимерных материалов уплотнителей для гидроцилиндров // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 2. С. 40–43. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17895402>

Поступила 12.09.2018; принята к публикации 19.10.2018; опубликована онлайн 28.12.2018

Об авторе:

Кузнецов Вячеслав Викторович, доцент кафедры механизации переработки сельскохозяйственной продукции ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), кандидат технических наук, ResearcherID: N-7719-2016, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0401-0391>, imesrv@mail.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.



REFERENCES

1. Zhang Y., Shi J., Wang S., Zhang C., Tomovic M. M. Sealing mechanism and failure analysis of actuator reciprocating seal. In: *2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. Hefei: IEEE; 2016. P. 2190–2195. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2016.7603952>
2. Svinyakov D. S., Tolstukhin G. N. Forecasting the reliability of seals of hydraulic cylinders. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal* = Electronic Scientific Journal. 2016; 9(12):149–153. Available at: <http://co2b.ru/docs/enj.2016.09.pdf> (In Russ.)
3. Burenin V. V. New seals for the moving joint of hydraulic power cylinders. *Russian Engineering Research*. 2011; 31(10):1036–1038. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X11100042>
4. Mamaev O., Mashkov Yu., Kosarenko R., Pivovarov V. Durability of a polymer composite material and service life of packing elements of contact movable sealing devices. *Journal of Friction and Wear*. 2008; 29(2):127–132. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366608020086>
5. Burenin V. V. New designs of seals for movable connections of power hydraulic cylinders of the volume hydraulic drive of construction machines and mechanisms. *Mekhanizatsiya stroitelstva* = Mechanization of Construction. 2012; 1:10–14. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17265461>
6. Flitney R. *Seals and Sealing Handbook : 6th Ed.* Butterworth–Heinemann; 2014. 633 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2012-0-03302-9>
7. Bhaumik S., Kumaraswamy A., Guruprasad S., Bhandari P. Study of effect of seal profile on tribological characteristics of reciprocating hydraulic seals. *Tribology in Industry*. 2015; 37(2):264–274. Available at: <http://www.tribology.rs/journals/2015/2015-2/15.pdf>
8. Cao X., Zhang C., Zou B., Li L. Sealing performances research on PTFE rotating seal under deep-sea environment. *The Open Mechanical Engineering Journal*. 2015; 9:475–482. DOI: <https://doi.org/10.2174/1874155X01509010475>
9. Wang C., Qin Y., An Q. Finite element analysis for the rubber O-ring in a mechanical seal. *Journal of East China University of Science and Technology*. 2013; 39(6):761–767. DOI: <https://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.2013.06.012>
10. Lu T., Wang W., Chen L. A study of the performance of an O-ring seal with viscoelasticity. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition)*. 2014; 6:93–97. Available at: http://caod.oriprobe.com/articles/45360381/A_study_of_the_performance_of_an_O_ring_seal_with_viscoelasticity.htm
11. Hu D., Wang R., Ren Q., Hong J. Investigation of design parameters and failure criteria of O-ring seal structure. In: *ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. 2005; 4:405–412. DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2005-68434>
12. Yang B., Salant R. F. A numerical model of a reciprocating rod seal with a secondary lip. *Tribology Transactions*. 2008; 51(2):119–127. DOI: <https://doi.org/10.1080/10402000701691746>
13. Stupkiewicz S., Marcinişzyn A. Elastohydrodynamic lubrication and finite configuration changes in reciprocating elastomeric seals. *Tribology International*. 2009; 42(5):615–627. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.08.008>
14. Aissaoui H., Diany M., Azouz J. Numerical simulation of radial and axial compressed elastomeric o-ring relaxation. *Global Journal of Researches in Engineering Mechanical and Mechanics Engineering*. 2012; 12(4):1–5. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/5770/527f9483aa521f25d5979612387b20d8a954.pdf>
15. Niu S. Sealing performance analysis of rubber O-ring in static seal based on FEM. *International Journal of Engineering and Advanced Research Technology*. 2015; 1(2):32–34. Available at: https://www.ijeart.com/download_data/IJEART01118.pdf
16. Diany M., Aissaoui H. Finite element analysis for short term O-ring relaxation. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*. 2011; 5(6):478–482. Available at: <http://jjmie.hu.edu.jo/files/v5n6/JJMIE%20-91-10.pdf>

17. Zhang G., Zeng Z. Simulation of sealing performance of elastomeric O-ring gasket including metal skeleton. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 556-562:615–619. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.556-562.615>
18. Liao C., Huang W., Wang Y., Suo S., Liu Y. Fluid-solid interaction model for hydraulic reciprocating O-ring seals. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2013; 26(1):85–94. DOI: <https://doi.org/10.3901/CJME.2013.01.085>
19. Yang Y., Tengyue H., Chenhui Z., Zhi B., Lihua M. Element analysis and wear longevity calculation of an O-ring in the actuator cylinder of a certain aircraft landing gear. In: *2017 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Harbin)*. Harbin: IEEE, 2017. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/PHM.2017.8079282>
20. Wang Z. Predicting wear in radial seals. *ANSYS Advantage*. 2008; 2(1):27. Available at: <https://www.ansys.com/-/media/ansys/corporate/resourcelibrary/article/aa-v2-i1-full-version.pdf>
21. Cui T., Lin C.-W., Chien C. H., Chao Y. J., Van Zee J. W. Service life estimation of liquid silicone rubber seals in polymer electrolyte membrane fuel cell environment. *Journal of Power Sources*. 2011; 196(3):1216–1221. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.08.075>
22. Lehr D., Furlan W. Seal life prediction and design reliability in downhole tools. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. SPE; 2017. DOI: <https://doi.org/10.2118/187133-MS>
23. Liao B., Sun B., Yan M., Ren Y., Zhang W., Zhou K. Time-variant reliability analysis for rubber O-ring seal considering both material degradation and random load. *Materials*. 2017; 10(10):1211. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma10101211>
24. Lijesh K., Muzakkir S. Service life estimation of rubber seals. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016; 11(2):980–986. Available at: <https://docslide.net/documents/service-life-estimation-of-rubber-seals-life-estimation-of-rubber-seals-lijesh-kp.html>
25. Borisov V. I., Kuznetsov V. V., Vodyakov V. N. Tribological properties of hydraulic cylinders' sealings polymer materials. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machines. 2012; 2:40–43. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17895402> (In Russ.)

Received 12.09.2018; revised 19.10.2018; published online 28.12.2018

Vyacheslav V. Kuznetsov, Associate Professor, Chair of Mechanization of Processing of Agricultural Products, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: N-7719-2016, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0401-0391>, imesrv@mail.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 620.1.05:621.892

DOI: 10.15507/0236-2910.028.201804.583-602



Оценка влияния ультразвуковой обработки моторного масла на износ пар трения при длительных износных испытаниях

А. А. Симдянкин^{1*}, А. М. Давыдкин², М. Н. Слюсарев¹,
А. М. Земсков²

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

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

*seun2006@mail.ru

Введение. В настоящее время отсутствует комплексная информация о влиянии параметров ультразвука на свойства обрабатываемых смазочных масел и износные характеристики пар трения. Статья посвящена исследованию изменений физических характеристик масла при его обработке ультразвуком и оценке их влияния на износ пары трения «ролик – колодка» при длительных испытаниях. Актуальность исследования состоит в том, что простым способом воздействия на смазочное масло ультразвуковыми колебаниями с оптимальной частотой и мощностью может быть достигнуто уменьшение износа сопряжений механизмов и машин.

Материалы и методы. Для оценки изменения коэффициента поверхностного натяжения моторного масла при обработке ультразвуком были использованы генератор с переменными параметрами сигнала, весы рычажные, бюретка, термометр спиртовой. Длительные триботехнические испытания проведены на машине трения 2070 СМТ-1М по схеме «ролик – колодка». Масса данных образцов после длительных испытаний определялась взвешиванием на аналитических весах фирмы Sartorius с точностью измерения 0,00001 г. Использовался также профилограф-профилометр фирмы Taylor Hobson.

Результаты исследования. Определены оптимальная частота и мощность ультразвука при обработке смазочного масла. Уменьшение коэффициента поверхностного натяжения масла составило более 5 %. При длительных износных испытаниях было зафиксировано снижение показателя фактора износа на 28 %.

Обсуждение и заключение. Эффект повышения износостойкости пар трения при воздействии на масло ультразвуком связан со снижением коэффициента его поверхностного натяжения, что позволяет маслу с наименьшими усилиями распределяться по поверхностям, образуя пленку достаточной толщины, повышающую несущую способность трущихся поверхностей. Практическая значимость работы обусловлена простотой реализации устройства для ультразвуковой обработки смазочных ма-

© Симдянкин А. А., Давыдкин А. М., Слюсарев М. Н., Земсков А. М., 2018



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

сел непосредственно в системе смазки оборудования. Перспективы предлагаемого решения состоят в повышении долговечности оборудования и машин при использовании рекомендуемых смазочных масел с оптимизацией параметров и режимов устройства согласно конкретным требованиям, условиям и стандартам.

Ключевые слова: износ, коэффициент поверхностного натяжения, моторное масло, триботехническое испытание, ультразвук

Для цитирования: Оценка влияния ультразвуковой обработки моторного масла на износ пар трения при длительных износных испытаниях / А. А. Симдянкин [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 4. С. 583–602. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.583-602>

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

Evaluation of the Influence of Motor Oil Ultrasonic Processing on the Wear of Friction Pairs during Long-Term Wearing Tests

A. A. Simdiankin^{1*}, A. M. Davydkin², M. N. Slyusarev¹,
A. M. Zemskov²

¹ Ryazan State Agrotechnological University (Ryazan, Russia)

² National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

*seun2006@mail.ru

Introduction. The influence of ultrasound parameters on the properties of processed lubricating oils and wear characteristics of friction pairs is a relevant problem in agricultural engineering. The paper presents a simple method for influencing on the lubricating oil by ultrasonic vibrations of the optimum frequency and power that results in reducing the wear of the interfaces of mechanisms and machines. The authors study the change in the physical characteristics of the oil during its ultrasound treatment and the assessment of their effect on the wear of a friction pair during long-term tests.

Materials and Methods. We used a generator with variable signal parameters, a lever scale, a burette and an alcohol thermometer to assess the change in coefficient of surface tension of engine oil during sonication. Long-term tribotechnical tests were carried out on 2070 CMT-1M friction machine according to the “roller – pad” scheme. The mass of these samples after long-term tests was weighed by Sartorius company analytical scales with a measurement accuracy of 0.00001 g. A profilograph-profilometer of Taylor Hobson Company was also used.

Results. As a result of the research, the optimum frequency and power of ultrasound were revealed for lubricating oil processing. The decrease in the surface tension coefficient of oil was more than 5 %. With prolonged wear tests, the wear factor was reduced by 28 %.

Conclusions. The effect of increasing the wear resistance of friction pairs when exposed to ultrasound oil is associated with a decrease in its surface tension coefficient, which allows the oil to be distributed with minimal effort over the surfaces with forming a film of sufficient thickness, which increases the bearing capacity of rubbing surfaces.

Keywords: wear, surface tension coefficient, motor oil, tribotechnical test, ultrasound

For citation: Simdiankin A. A., Davydkin A. M., Slyusarev M. N., Zemskov A. M. Evaluation of the Influence of Motor Oil Ultrasonic Processing on the Wear of Friction Pairs during Long-Term Wearing Tests. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(4):583–602. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.583-602>



Acknowledgments: The study was conducted with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (state task, direction: development of competencies) project no. 11.3416.2017/4.6 “Development of technologies and tools to improve the durability of parts, assemblies, machines and equipment by creating nano-structured coatings sources of concentrated energy”.

Введение

Даже в простейших механизмах и машинах на всем протяжении их существования использовались пары трения, от состояния которых зависели основные эксплуатационные характеристики этих механизмов и машин. Пары трения современных двигателей работают, как правило, в условиях высоких температур, граничной смазки, вибраций и пр., что и определяет их недостаточно высокий ресурс. Работы по повышению износостойкости деталей и узлов различных механизмов проводятся в основном в направлениях совершенствования материалов, из которых они изготавливаются; формирования поверхностей трения, соответствующих конкретным условиям работы трибосопряжения; улучшения характеристик смазочных масел, в которых работают пары трения, и др.

Однако существуют и дополнительные резервы повышения износостойкости пар трения: это использование неомогенных поверхностей пар трения и воздействие на смазочные материалы ультразвуковым излучением. Следует отметить, что до сих пор работы, выполненные в этом направлении, представляют собой лишь разрозненные данные.

Проблема состоит в том, что каждая смазочная композиция разрабатывается, как правило, для конкретной пары трения либо типовых пар трения и позволяет создать некоторые общие условия трения для различных пар, не предполагая их «улучшение». До настоящего момента практически отсутствуют работы, которые описывали бы изменение некоторых физико-механических характеристик масел, например, таких основополагающих для процесса изнашивания, как коэффи-

циент поверхностного натяжения при воздействии на них ультразвуком различной частоты и мощности.

Поэтому была сформулирована следующая цель исследования: оценить результаты воздействия ультразвука различной частоты и мощности на коэффициент поверхностного натяжения смазочного масла и определить его влияние на фактор износа.

Выполненное авторами исследование изменений физико-механических характеристик моторного масла вследствие его обработки ультразвуком и оценка их влияния на износ пары трения «ролик – колодка» при длительных испытаниях представляет интерес для специалистов, занимающихся разработкой, сервисным обслуживанием и эксплуатацией двигателей, компрессоров и другой техники, в которой имеются пары трения.

Обзор литературы

Большой интерес для специалистов в области триботехники представляют вопросы исследования поверхностей трения теоретическими и экспериментальными методами; применения антифрикционных материалов, в частности, теоретические обоснования методик расчета адгезионных и триботехнических характеристик трения металлов и рекомендации по их применению для выбора оптимальных пар трения [1]; ретроспективный обзор результатов исследований свойств антифрикционных материалов и рекомендации по их применению в машиностроении [2].

С точки зрения повышения эффективности работы пар трения интересными для специалистов являются исследование влияния типа консистентной смазки на коэффициент трения и степень изнашивания контактной пары, а также выбор оптимальной

смазки [3] и анализ структур антифрикционных покрытий с добавками твердых смазок, полученных различными методами напыления [4].

Надежность работы и износостойкость узлов машин и механизмов определяются проведением мероприятий, выбранных с учетом условий их эксплуатации. Исследованию факторов, влияющих на надежность работы спецтехники в условиях Арктики, и разработке мероприятий по ее повышению посвящена работа И. Н. Кравченко и соавт. [5]. Практический интерес представляют исследования влияния условий смазки на толщину масляного слоя в шатунных подшипниках дизельного двигателя [6] и влияния режимов долива моторного масла в систему смазки на эффективность эксплуатации судовых дизелей¹.

Классическое направление в повышении эффективности работы пар трения связано с изменением их конструкции, при этом конструктивные и материаловедческие методы снижения вибрации и шума в трансмиссиях и тормозах машин приведены в работе В. П. Сергиенко и С. Н. Бухарова [7]. Также представляют интерес патенты по созданию триботехнической композиции для металлических узлов трения [8] и способу формирования безыносных пар трения [9]. Следует отметить, что изменение конструкции узлов трения может существенно повысить стоимость их изготовления.

Широко известны методы повышения износостойкости, основанные на внесении в смазочные масла таких присадок, как, например, пакет присадок, содержащий полиалкенилсукцинимид, фенат кальция, диалкилдифитофосфат цинка [10]; металлоплакирующая многофункциональная композиция [11]; маслорастворимая композиция, содержащая соль металла органической кис-

лоты, ароматический амин и полимер сукцинимид [12]; композиции смазочных масел, содержащие титан [13]. Однако эффективность действия присадок заканчивается спустя сравнительно небольшой период времени.

Работы С. В. Барина, Б. П. Загородских и А. А. Симдянкина [14–15] посвящены попыткам создания ювенильной поверхности на протяжении всего периода работы пары трения. Однако в связи с кризисом в машиностроительной области в целом такие технологии не отработаны в производстве в полной мере.

В некоторых работах приводятся результаты исследований влияния ультразвука на моторное масло в ходе триботехнических испытаний [16], виброакустических испытаний образцов трибосопряжения на износостойкость [17] и изучения влияния ультразвуковых колебаний на эффективность технологических смазок [18]. Однако в указанных работах не приводятся данные по оценке изменения основных физико-механических характеристик моторного масла.

Кроме того, практически все исследователи сосредотачиваются на последствиях применения тех или иных методов воздействия на пару трения, не описывая причину происходящих изменений.

В данной статье предложен сравнительно простой и недорогой способ воздействия на смазочное масло, позволяющий существенно повысить износные характеристики пар трения; кроме того, выявлены причины возникновения эффекта.

Материалы и методы

Для определения коэффициента поверхностного натяжения и температуры моторного масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40 применялись бюретка с краном (диаметр капилляра 1,1 мм); штатив для

¹ **Соколова И. В.** Влияние режимов долива моторного масла в систему смазки на эффективность эксплуатации судовых дизелей : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Владивосток, 2009. 160 с. URL: <http://msun.ru/upload/dis/ref20.pdf>



бюретки; стакан мерный; весы ВР-100; термометр спиртовой; генератор с регулировкой частоты (в диапазоне 4,5–17 кГц) и мощности (0–25 Вт), выход которого соединен с высокочастотным динамиком Т251.4 и осциллографом С1-94 (рис. 1). Все эксперименты проводились с трехкратной повторностью. Температура во время проведения эксперимента составляла 25 °С.

Последовательность проведения эксперимента по измерению температуры масла:

1) в емкость с установленным в ней динамиком наливалось моторное масло (5 мм над излучателем);

2) термометром замерялась температура масла;

3) на генераторе устанавливались максимальная мощность (25 Вт) и частота излучения (17 кГц);

4) проводились замеры температуры масла в диапазоне времени 30–240 с.

Определение коэффициента поверхностного натяжения моторного масла производилось сталагмометрическим методом (методом счета капель) до и после обработки масла в следующей последовательности:

1) определялся коэффициент поверхностного натяжения моторного масла до обработки;

2) в емкость с установленным в ней динамиком наливалось моторное масло (5 мм над излучателем);

3) включался генератор на мощности 10 Вт и частотах излучения 10, 12, 15 и 17 кГц, при этом на каждой частоте обрабатывалась новая партия масла;

4) забор масла из емкости осуществлялся шприцем непосредственно над излучателем (динамиком);

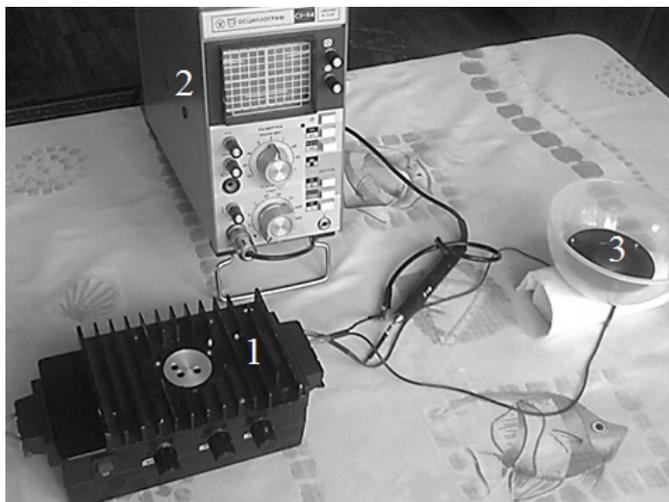
5) определялся коэффициент поверхностного натяжения моторного масла после его обработки на мощности генератора 10 Вт и частотах излучения 10, 12, 15 и 17 кГц;

6) пункты 2–5 повторялись для мощности генератора 25 Вт.

Проведение триботехнических испытаний осуществлялось на модернизированной машине для испытания материалов на трение и износ 2070 СМТ-1М по схеме «ролик – колодка».

Технические характеристики машины СМТ-1М:

1) частота вращения вала нижнего образца – 75–1500 мин⁻¹;



Р и с. 1. Установка для ультразвуковой обработки моторного масла в сборе: 1 – генератор; 2 – осциллограф; 3 – емкость с установленным в ней динамиком (излучателем)

F i g. 1. The installation for ultrasonic processing of engine oil: 1 – generator; 2 – oscilloscope; 3 – capacity with installed speaker (emitter)

2) погрешность измерения частоты вращения вала нижнего образца – 3 %;

3) пределы измерения момента трения пары – 1–20 Н·м;

4) погрешность измерителя момента трения (в режиме статистического нагружения) – 1 %;

5) пределы измерения усилий на образцы – 0,2–5 кН;

6) погрешность измерителя усилия – 1 %;

7) пределы измерения температуры вблизи зоны контакта образцов – 20–155 °С;

8) погрешность измерения температуры – 1,5 %.

Модернизация машины СМТ-1, проведенная в Институте механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», заключается в установке электронного блока оперативного сбора и аналого-цифрового преобразования данных от датчиков измерения частоты вращения вала нижнего образца, усилия, момента трения и температуры. Данный блок является коммутатором для подключения СМТ-1 к персональному ком-

пьютеру (ПК). Установленное на ПК программное обеспечение позволило оперативно анализировать информацию в режиме реального времени.

Триботехнические испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 23.224-86² (экспресс-испытания по методу группы «А»). Сущность экспресс-испытаний – определение соотношения интенсивностей изнашивания исследуемых поверхностей, испытываемого при заранее определенных условиях (оптимальной нагрузке). Испытания проводились в три этапа:

1) предварительная притирка пар трения при минимальной нагрузке;

2) приработочные испытания;

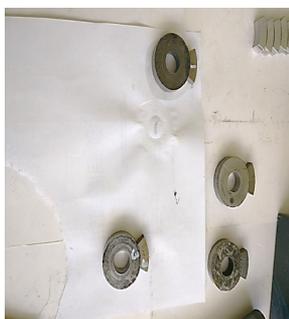
3) длительные испытания для определения износа образцов.

Материал образцов пар трения (ролик – колодка):

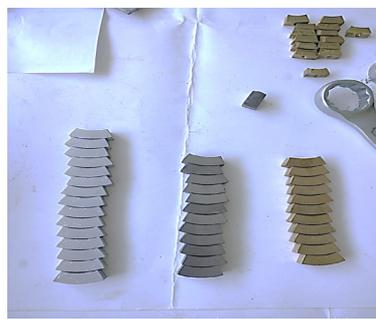
1) ролик – сталь инструментальная легированная штамповая Х12Ф1 ГОСТ 5950-2000³;

2) колодка – чугун серый СЧ-21 ГОСТ 1412-85⁴.

Вид изготовленных образцов представлен на рис. 2.



a)



b)

Р и с. 2. Образцы для триботехнических испытаний: ролики (а) и колодки (б)

F i g. 2. Samples for tribotechnical tests: rollers (a) and pads (b)

² Обеспечение износостойкости изделий. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей : ГОСТ 23.224-86. введ. 1987-01-01. Переизд. // Механические испытания. Обеспечение износостойкости изделий : Сб. стандартов. М. : Стандартиформ, 2005. С. 120-139. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-23-224-86>

³ Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали. Общие технические условия : ГОСТ 5950-2000. Введ. 2002-01-01. Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2000. 35 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200013016>

⁴ Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки : ГОСТ 1412-85. Введ. 1987-01-01. Переизд. М. : ИПК Изд-во стандартов, 2004. 5 с. URL: <http://stroysvoimirukami.ru/gost-1412-85>



В качестве смазочного материала при испытаниях использовалось синтетическое моторное масло «ZIC X7 Diesel» 10W-40. Был установлен режим разовой подачи смазки в картер испытательной камеры для обеспечения граничной смазки.

Общий вид испытательной камеры (в открытом состоянии), блока управления ультразвуковыми колебаниями и излучателя ультразвука приведен на рис. 3. Высокочастотный излучатель типа Т251.4 расположен непосредственно в испытательной камере машины трения и погружен в масло.

Притирка пар трения была проведена при частоте вращения ролика 300 мин^{-1} , нагрузка на колодку – $0,1 \text{ МПа}$, длительность испытаний – не менее $0,5 \text{ ч}$.

Длительные износные испытания проводились в соответствии с документом РД 10.1003-2009. Износные испытания пар трения были проведены при заданной частоте вращения ролика ($n = 380 \text{ мин}^{-1}$) и оптимальной нагрузке $P_{\text{оп}}$, полученной по результатам прира-

боточных испытаний. Продолжительность износных испытаний – 8 ч .

Длительные испытания пар трения проводились:

1) с маслом, не обработанным ультразвуком;

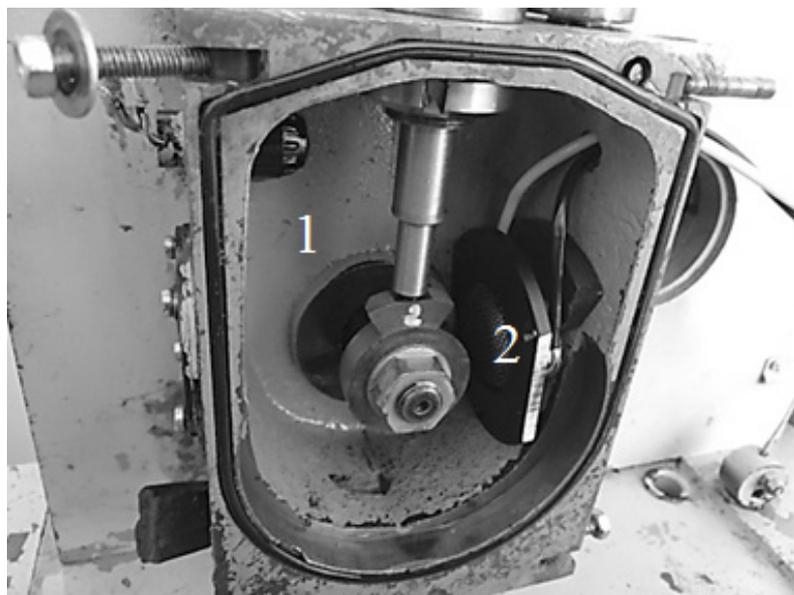
2) при обработке масла ультразвуком частотой 17 кГц и мощностью 25 Вт .

После длительных испытаний подвижные и неподвижные образцы промывались в ультразвуковой ванне и взвешивались после сушки на аналитических весах фирмы «Sartorius» с точностью измерения $0,00001 \text{ г}$. Данные о массах образцов до и после испытаний заносились в протокол испытаний.

Интенсивность изнашивания подвижных и неподвижных образцов пар трения определялась по формуле:

$$I = \frac{W}{N \cdot l}, \quad (1)$$

где W – линейный износ образца, м; l – линейный размер поверхности трения сопряженного образца в направлении скольжения, м; N – число циклов,



Р и с. 3. Установка излучателя в испытательной камере: 1 – испытательная камера; 2 – излучатель

F i g. 3. The installation of radiator in test chamber: 1 – test chamber; 2 – emitter

за каждый из которых поверхности трения проходят путь l .

Линейный износ образца W определяется по формуле:

$$W = \frac{\Delta G}{\gamma \cdot F_c}, \quad (2)$$

где ΔG – изменение массы образца при испытании, кг; γ – плотность материала, кг/м³; F_c – контурная площадь контакта образцов, м².

Интенсивность изнашивания пары в целом определялась как сумма интенсивностей изнашивания элементов пары (ролика и колодки).

Сравнительная оценка интенсивности изнашивания проводилась по показателю фактора износа:

$$\Phi = \frac{I_{\Sigma}}{P_{\text{оп}}}, \quad (3)$$

где I_{Σ} – сумма интенсивностей изнашивания элементов пары; $P_{\text{оп}}$ – оптимальная нагрузка, МПа.

Результаты исследования

Результаты измерения температуры масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40, обработанного ультразвуком частотой 17 кГц при максимальной мощности генератора (25 Вт) в течении 30–240 с, приведены в табл. 1.

Анализ результатов показал, что при проведении экспериментов по оценке коэффициента поверхностного натяжения σ не следует превышать время обработки масла в 90–100 с, поскольку дальнейшее воздействие способствует повышению температуры масла, что приведет к снижению коэффициента поверхностного натяжения.

Результаты обработки синтетического масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40 ультразвуком различной частоты при мощности генератора 10 Вт приведены в табл. 2, а при мощности 25 Вт – в табл. 3.

Анализ средних значений $\sigma_{\text{ср}}$ при мощности генератора 10 Вт на раз-

личных частотах воздействующего на масло ультразвукового излучения показал, что разброс значений вне зависимости от частоты ультразвука не превышает 0,1 мН/м. Это позволяет сделать вывод, что при обработке синтетического масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40 ультразвуком при мощности излучателя 10 Вт коэффициент поверхностного натяжения масла практически не изменяется.

Анализ средних значений $\sigma_{\text{ср}}$ при мощности генератора 25 Вт на различных частотах воздействующего на масло ультразвукового излучения показал, что с ростом частоты до максимально возможной наблюдается существенное падение коэффициента поверхностного натяжения, что может оказать значительное влияние на процесс трения сопряженных деталей.

Длительные износные испытания как без обработки моторного масла, так и с его обработкой ультразвуком на частоте 17 кГц и мощности 25 Вт (в режимах максимального падения коэффициента поверхностного натяжения) проводились в течение 8 ч. Число циклов при испытаниях без обработки смазки – 144 487, число циклов при испытаниях с обработкой смазки ультразвуком – 144 493.

Результаты взвешивания образцов пар трения до и после длительных испытаний приведены в табл. 4.

Анализ данных таблицы позволяет сделать вывод о высокой эффективности обработки моторного масла ультразвуком частотой 17 кГц при мощности генератора 25 Вт: средняя масса образцов, изнашиваемых в необработанном масле, относительно средней массы образцов, подвергавшихся изнашиванию в обработанном ультразвуком масле, меньше на 10,14 % для роликов и на 18,94 % – для колодок.

Показатели износостойкости, оцененные по результатам длительных износных испытаний образцов, приведены в табл. 5.



Результаты измерения температуры масла
Oil temperature measurement results

Время обработки, с / Processing time, s	Температура масла до обработки, °С / Oil temperature before processing, °С	Температура масла после обработки, °С / Oil temperature after processing, °С
30	25	25
60		25
90		25
120		26
180		27
240		29

Значения коэффициента поверхностного натяжения при мощности генератора 10 Вт
The values of the surface tension coefficient at a generator power of 10 W

Частота обработки, кГц / Pro- cessing fre- quency, kHz	Время об- работки, с / Processing time, s	№ экспе- римента / Experiment no.	Метод счета капель / Method of counting drops				Отклонение от исход- ного, % / Deviation from the initial, %
			Масса 50 капель M , г / Weight of 50 drops M , g	Масса 1 капли m , г / Weight of 1 drop m , g	σ , мН/м / σ , mN/m	σ_{cp} , мН/м / σ_{cp} , mN/m	
17	90	1	0,89	0,0178	33,83	33,84	-0,26
		2	0,88	0,0176	33,46		
		3	0,90	0,0180	34,21		
15		1	0,88	0,0176	33,46	33,96	0,09
		2	0,90	0,0180	34,21		
		3	0,90	0,0180	34,21		
12		1	0,89	0,0178	33,83	33,83	-0,29
		2	0,89	0,0178	33,83		
		3	0,89	0,0178	33,83		
10	1	0,91	0,0182	34,60	33,96	0,09	
	2	0,90	0,0180	34,21			
	3	0,87	0,0174	33,07			
0	0	1	0,89	0,0178	33,83	33,93	-
		2	0,89	0,0178	33,83		
		3	0,90	0,0180	34,21		

Таблица 3
Table 3

 Значения коэффициента поверхностного натяжения при мощности генератора 25 Вт
 The values of the surface tension coefficient at a generator power of 25 W

Частота обработки, кГц / Processing frequency, kHz	Время обработки, с / Processing time, s	№ эксперимента / Experiment no.	Метод счета капель / Method of counting drops				Отклонение от исходного, % / Deviation from the initial, %
			Масса 50 капель М, г / Weight of 50 drops M, g	Масса 1 капли m, г / Weight of 1 drop m, g	σ , мН/м / σ , mN/m	$\sigma_{\text{сп}}$, мН/м / $\sigma_{\text{сп}}$, mN/m	
17		1	0,85	0,0170	32,31	32,31	-4,77
		2	0,85	0,0170	32,31		
		3	0,85	0,0170	32,31		
15	90	1	0,85	0,0170	32,31	32,43	-1,47
		2	0,85	0,0170	32,31		
		3	0,86	0,0172	32,69		
12		1	0,90	0,0180	34,21	34,07	0,04
		2	0,90	0,0180	34,21		
		3	0,89	0,0176	33,79		
10		1	0,91	0,0182	34,60	33,84	-0,26
		2	0,88	0,0176	33,46		
		3	0,88	0,0176	33,46		
0	0	1	0,89	0,0178	33,83	33,93	-
		2	0,89	0,0178	33,83		
		3	0,90	0,0180	34,21		



Результаты взвешивания колодок и роликов до и после испытаний
Results of weighing pads and rollers before and after testing

Частота обработки, кГц / Processing frequency, kHz	Образец / Sample	Масса образцов до испытаний, г / Weight of samples before testing, g		Масса образцов после испытаний, г / Weight of samples after testing, g		Отклонение относительно исходной массы, 10 ⁻³ г / Deviation from the reference mass, 10 ⁻³ g	Отклонение относительно необработанного масла, % / Deviation relative to untreated oil, %
		Каждого из трех / Each of the three	Средняя / Mean	Каждого из трех / Each of the three	Средняя / Mean		
–	Ролик / Roller	79,00608 79,00607 79,00603	79,00606	79,00450 79,00465 79,00460	79,00458	1,48	–
	Колодка / Pad	10,52148 10,52145 10,52148	10,52147	10,52014 10,52020 10,52012	10,52015	1,32	–
17	Ролик / Roller	80,06558 80,06555 80,06551	80,06555	80,06418 80,06422 80,06426	80,06422	1,33	–10,14
	Колодка / Pad	10,62956 10,62958 10,62954	10,62956	10,62853 10,62848 10,62846	10,62849	1,07	–18,94

Оценка показателей износостойкости
Evaluation of wear resistance

Образец / Sample	Износ, г / Depreciation, g	Нагрузка P _{он} , МПа / Load P _{он} , МПа	Частота ультразвуковой обработки, кГц / Frequency of ultrasonic processing, kHz	Показатели износостойкости / Wear resistance indexes			
				I _П	I _Н	I _Σ	Φ
Ролик / Roller	0,00148	5,3	–	1,232·10 ⁻¹¹	0,53·10 ⁻⁹	0,542·10 ⁻⁹	1,023·10 ⁻¹⁰
Колодка / Pad	0,00132						
Ролик / Roller	0,00133	6,0	17,0	1,107·10 ⁻¹¹	0,43·10 ⁻⁹	0,441·10 ⁻⁹	0,735·10 ⁻¹⁰
Колодка / Pad	0,00107						

Сравнительный анализ показателей износостойкости, полученных в результате длительных износных испытаний образцов, позволяет сделать вывод, что фактор износа при обработке смазки ультразвуком с частотой 17 кГц уменьшился на 28 %.

Фотографии поверхностей пар трения после длительных износных испытаний представлены на рис. 4–5. Анализ состояния поверхностей показывает отсутствие следов «задиоров» и на колодке, и на ролике при обработке моторного масла ультразвуком, что сви-



a)



b)

Р и с. 4. Ролик после испытаний: а) без обработки масла ультразвуком; б) с обработкой масла ультразвуком частотой 17 кГц

F i g. 4. The roller after the test: a) without oil processing by ultrasound; b) with oil processing by ultrasound at frequency of 17 kHz.



a)



b)

Р и с. 5. Колодка после испытаний: а) без обработки масла ультразвуком; б) с обработкой масла ультразвуком частотой 17 кГц

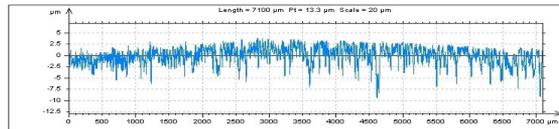
F i g. 5. The pad after the test: a) without processing by ultrasound; b) with oil processing by ultrasound at frequency of 17 kHz



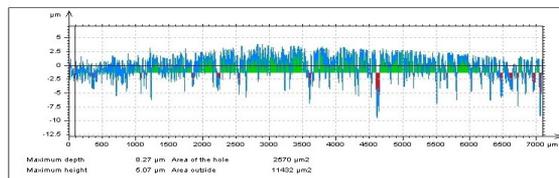
детельствует о протекании процесса изнашивания при постоянном присутствии слоя смазки между ними.

Рабочие поверхности образцов до и после длительных триботехнических испытаний подвергались профилографированию с целью исследования из-

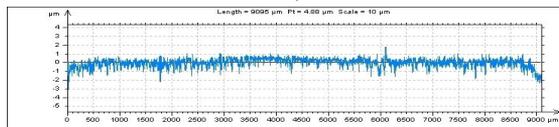
менения параметров шероховатости и определения площади износа в процессе испытаний. На рис. 6–7 представлены профилограммы рабочих поверхностей подготовленных образцов для длительных триботехнических испытаний.



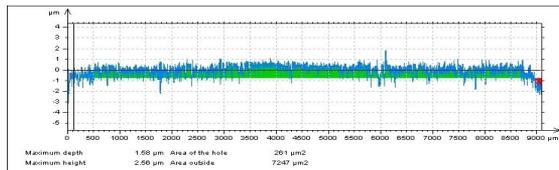
ISO 4287		
Amplitude parameters - Primary profile		
Pp	3.82 μm	
Pv	9.52 μm	
Pz	13.3 μm	
Pt	13.3 μm	
Pa	1.58 μm	
Amplitude parameters - Roughness profile		
Rp	2.85 μm	Gaussian filter, 0.8 μm
Rv	6.75 μm	Gaussian filter, 0.8 μm
Rz	9.6 μm	Gaussian filter, 0.8 μm
Rt	12.7 μm	Gaussian filter, 0.8 μm
Ra	1.38 μm	Gaussian filter, 0.8 μm
Other 2D Parameters		
Primary profile parameters		
Pmax	12.3 μm	
Roughness profile parameters		
Rmax	12.4 μm	Gaussian filter, 0.8 μm



a)

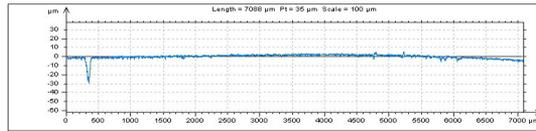


ISO 4287		
Amplitude parameters - Primary profile		
Pp	1.79 μm	
Pv	3.09 μm	
Pz	4.88 μm	
Pt	4.88 μm	
Pa	0.373 μm	
Amplitude parameters - Roughness profile		
Rp	0.991 μm	Gaussian filter, 0.8 μm
Rv	1.52 μm	Gaussian filter, 0.8 μm
Rz	2.51 μm	Gaussian filter, 0.8 μm
Rt	3.87 μm	Gaussian filter, 0.8 μm
Ra	0.278 μm	Gaussian filter, 0.8 μm
Other 2D Parameters		
Primary profile parameters		
Pmax	4.89 μm	
Roughness profile parameters		
Rmax	3.41 μm	Gaussian filter, 0.8 μm

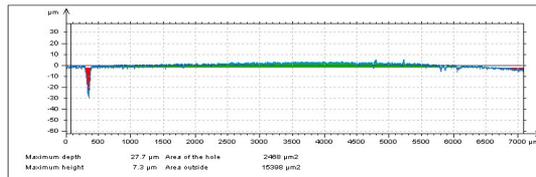


b)

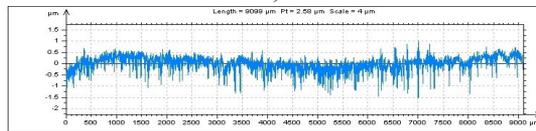
Р и с. 6. Профилограммы рабочих поверхностей: колодки (а) и ролика (b), подготовленных к испытаниям на износостойкость без обработки масла
 Fig. 6. Profilogram of working surfaces: pad (a) and roller (b) prepared for testing for wear resistance without oil processing



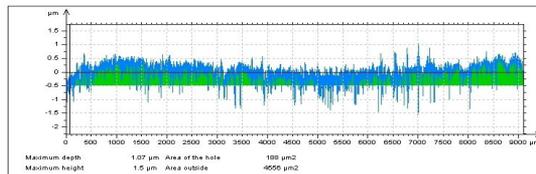
ISO 4287	
Amplitude parameters - Primary profile	
Pp	5.47 μm
Pv	23.5 μm
Pz	35 μm
Pt	35 μm
Pa	1.69 μm
Amplitude parameters - Roughness profile	
Rp	2.35 μm Gaussian filter, 0.8 μm
Rv	3.28 μm Gaussian filter, 0.8 μm
Rz	5.63 μm Gaussian filter, 0.8 μm
Rt	9.1 μm Gaussian filter, 0.8 μm
Ra	0.605 μm Gaussian filter, 0.8 μm
Other 2D Parameters	
Primary profile parameters	
Pmax	35 μm
Roughness profile parameters	
Rmax	9.1 μm Gaussian filter, 0.8 μm



a)



ISO 4287	
Amplitude parameters - Primary profile	
Pp	1.02 μm
Pv	1.55 μm
Pz	2.58 μm
Pt	2.58 μm
Pa	0.243 μm
Amplitude parameters - Roughness profile	
Rp	0.622 μm Gaussian filter, 0.8 μm
Rv	1.16 μm Gaussian filter, 0.8 μm
Rz	1.78 μm Gaussian filter, 0.8 μm
Rt	2.56 μm Gaussian filter, 0.8 μm
Ra	0.181 μm Gaussian filter, 0.8 μm
Other 2D Parameters	
Primary profile parameters	
Pmax	2.58 μm
Roughness profile parameters	
Rmax	2.56 μm Gaussian filter, 0.8 μm



b)

Р и с. 7. Профилограммы рабочих поверхностей: колодки (а) и ролика (б), подготовленных к испытаниям на износостойкость с обработкой масла ультразвуком

F i g. 7. Profilograms of working surfaces: pad (a) and roller (b) prepared for wear resistance tests with ultrasonic oil treatment

Анализ профилограмм на рис. 6–7 показал, что нерегулярная шероховатость рабочих поверхностей образцов соответствует установленным требованиям и составляет $R_a = 1,38$ для колодки и $R_a = 0,28$ для ролика, подготовленных

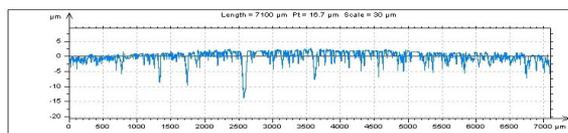
к длительным износным испытаниям без обработки масла ультразвуком (рис. 6), для подготовленных к испытаниям с обработкой масла ультразвуком – $R_a = 0,61$ и $R_a = 0,181$ (рис. 7) соответственно.



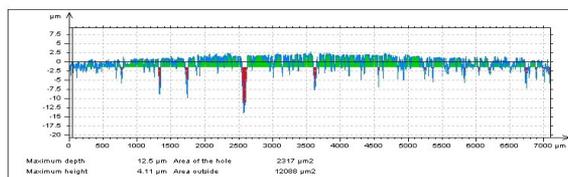
На рис. 8–9 представлены профилограммы рабочих поверхностей образцов после испытаний на износостойкость без обработки и при обработке масла на частоте 17 кГц.

Сравнивая профилограммы до и после длительных износных испытаний, можно сделать вывод о том, что наблюдается снижение значения параметра

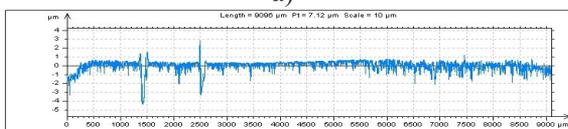
шероховатости R_a для колодок без обработки и с обработкой ультразвуком на 8,7 % и 14,4 % соответственно. Для роликов, испытанных в масле без обработки ультразвуком, прослеживается возрастание данного параметра на 15,4 % и снижение на 2,2 % – для роликов при испытаниях в масле, обрабатываемом ультразвуком.



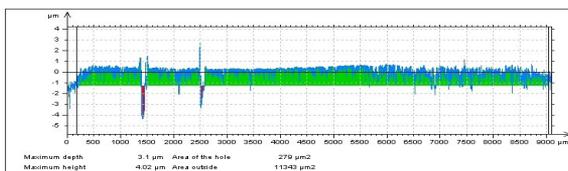
ISO 4287	
Amplitude parameters - Primary profile	
P_p	2.74 μm
P_v	13.9 μm
P_z	16.7 μm
P_a	1.42 μm
Amplitude parameters - Roughness profile	
R_p	2 μm Gaussian filter, 0.8 mm
R_v	7.69 μm Gaussian filter, 0.8 mm
R_a	1.26 μm Gaussian filter, 0.8 mm
Other 2D Parameters	
Primary profile parameters	
P_{max}	16.7 μm
Roughness profile parameters	
R_{max}	15.6 μm Gaussian filter, 0.8 mm



a)



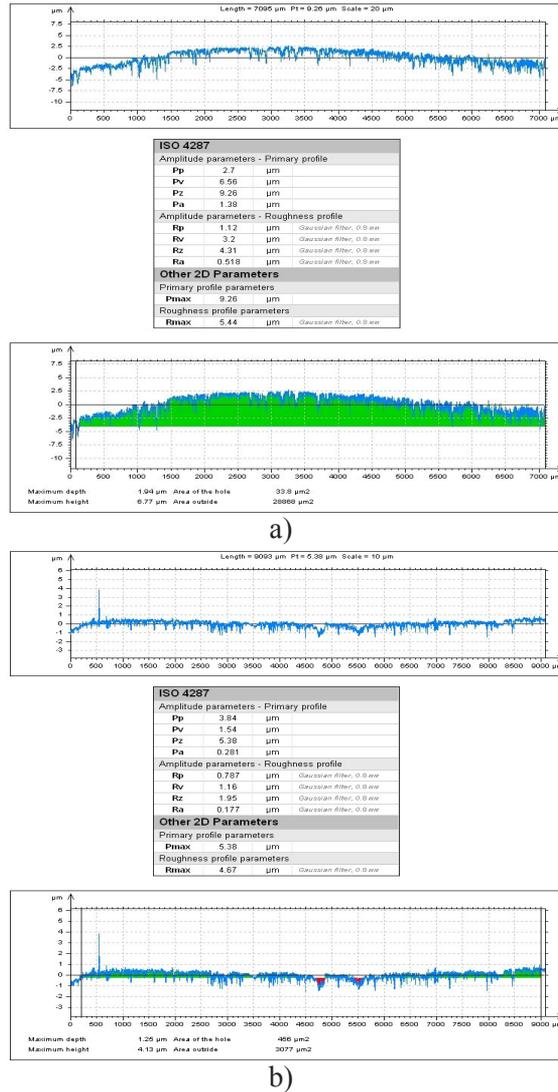
ISO 4287	
Amplitude parameters - Primary profile	
P_p	2.6 μm
P_v	4.32 μm
P_z	7.12 μm
P_a	0.414 μm
Amplitude parameters - Roughness profile	
R_p	0.973 μm Gaussian filter, 0.8 mm
R_v	1.91 μm Gaussian filter, 0.8 mm
R_z	2.89 μm Gaussian filter, 0.8 mm
R_a	0.223 μm Gaussian filter, 0.8 mm
Other 2D Parameters	
Primary profile parameters	
P_{max}	7.12 μm
Roughness profile parameters	
R_{max}	6.06 μm Gaussian filter, 0.8 mm



b)

Р и с. 8. Профилограммы рабочих поверхностей: колодки (а) и ролика (б) после испытаний без обработки масла ультразвуком

F i g. 8. Profilograms of working surfaces: pad (a) and roller (b) after tests without oil processing by ultrasound



Р и с. 9. Профилграммы рабочих поверхностей: колодки (а) и ролика (б) после испытаний на износостойкость с обработкой масла ультразвуком
 Fig. 9. Profilograms of working surfaces: pad (a) and roller (b) after tests for wear resistance with oil processing by ultrasound

Параметр R_{max} повышается для всех пар трения, испытанных на износостойкость без обработки ультразвуком: для колодки повышение составляет 1,26, для ролика – 1,45 раза. Для пар трения, испытанных на износостойкость с обработкой масла ультразвуком, R_{max} для колодки снижается в 1,67 раза, для ролика – повышается в 2,1 раза.

Изменения параметров шероховатости при триботехнических испытаниях связаны со сложными процессами износа, а также влиянием физико-механических свойств испытываемых материалов и внешними воздействиями. При испытаниях материалов, имеющих разную микротвердость, происходит внедрение микронеровностей



более твердого материала в мягкий, что и приводит к изменению параметров шероховатости пар трения.

Данный процесс формирует на рабочих поверхностях испытанных образцов равновесную шероховатость при воздействии образцов друг на друга.

Существенную роль в процессе формирования шероховатости поверхности играет роль нагрузка $P_{оп}$, которая на необработанном масле имеет величину 5,3 МПа, а обработанном – 6 МПа.

Обсуждение и заключение

Эффект повышения износостойкости пар трения при воздействии на масло ультразвуковыми колебаниями связан со снижением коэффициента его поверхностного натяжения, который позволяет маслу с наименьшими усилиями распределяться по поверхностям пар трения, образуя, тем не менее, пленку достаточной толщины, позволяющую повышать несущую способность трущихся поверхностей. При этом следует подчеркнуть, что кавитационные процессы, происходящие в моторном масле, могли принимать непосредственное участие в формировании поверхностей трения ролика и колодки, поскольку источник излучения (динамик) находился в плоскости их работы.

С другой стороны, как показали более ранние исследования, расположение источника ультразвука в плоскости, перпендикулярной паре трения, приводит к аналогичным результатам. К тому же высокая вязкость масла не позволяет реализовываться кавитационным процессам на расстоянии, превышающем 3–5 мм от источника колебаний.

Практическая значимость работы состоит в простоте и дешевизне реализации устройства для ультразвуковой обработки смазочных масел, позволяющего существенно снизить коэффициент и силу трения в паре трения и в результате уменьшить износ на 28 %.

Перспективы дальнейших исследований состоят в оценке влияния режимов работы и параметров устройства для ультразвуковой обработки на различные составы масел и их композиции (включая высоковязкие), а также оптимизации этих параметров и режимов под конкретные условия работы пар трения, технические требования на оборудование и стандарты.

Результаты исследования могут быть применены в области трибологии и триботехники, а также при разработке и обслуживании техники, имеющей различные системы смазки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Мамонова М. В., Прудников В. В., Прудникова И. А.** Физика поверхности. Теоретические модели и экспериментальные методы. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2011. 406 с. URL: <http://avidreaders.ru/read-book/fizika-poverhnosti-teoreticheskie-modeli-i-eksperimentalnye.html>

2. **Семенов А. П.** Антифрикционные материалы: опыт применения и перспективы // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2007. № 12. С. 21–36. URL: http://www.mashin.ru/files/t_1207.pdf

3. **Балякин В. Б., Ганин И. А., Лаврин А. В.** Исследование влияния типа консистентной смазки на коэффициент трения и степень изнашивания контактной пары коррозионностойкая сталь – фторопласт // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 1. С. 72–76. URL: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2016/2016_1_72_76.pdf

4. **Тунник А. Ю.** Структурные особенности антифрикционных покрытий с добавками твердых смазок, полученных различными методами напыления // Вісник Приазовського державного технічного університету. Технічні науки. 2012. № 25. С. 163–170. URL: http://journals.uran.ua/vestnik-ptgu_tech/article/view/29382

5. Обоснование факторов, оказывающих влияние на надежность специальной техники в особых условиях эксплуатации / И. Н. Кравченко [и др.] // Фундаментальные исследования. 2014. № 3-2. С. 262–266. URL: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=33620>

6. **Денисов А. С., Данилов И. К.** Влияние условий смазки на толщину масляного слоя в шатунных подшипниках дизельного двигателя // Вестник СГТУ. 2005. № 1 (6). С. 74–80. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/vliyanie-usloviy-smazki-na-tolschinu-maslyanogo-sloya-v-shatunnyh-podshipnikah-dizelnogo-dvigatelya>

7. **Сергиенко В. П., Бухаров С. Н.** Вибрация и шум в нестационарных процессах трения. Минск : Беларуская навука. 2012. 346 с. URL: <http://avidreaders.ru/read-book/vibraciya-i-shum-v-nestacionarnyh-processah.html>

8. Патент № 2527243 Российская Федерация. Триботехническая композиция для металлических узлов трения / Е. М. Ежунев, И. В. Захаров; заявл. 25.02.2013, опубл. 27.08.2014. Бюл. № 24. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/252/2527243.html>

9. Патент № 2428597 Российская Федерация. Способ формирования безызносных пар трения и устройство для его осуществления / Ю. А. Семенов, А. С. Таранов; заявл. 09.04.2010, опубл. 10.09.2011. Бюл. № 25. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2428597>

10. Патент № 2267521 Российская Федерация. Присадка к смазочным материалам, пакет присадок к моторным маслам, моторное масло / А. Н. Чурзин и др.; заявл. 06.08.2004, опубл. 10.01.2006. Бюл. № 1. URL: <http://bd.patent.su/2267000-2267999/pat/servlet/servlet6c28.html>

11. Патент № 2398010 Российская Федерация. Металлоплакирующая многофункциональная композиция для моторных, трансмиссионных и промышленных масел / В. Г. Бабель, Д. Н. Гаркунов; заявл. 06.03.2009, опубл. 27.08.2010. Бюл. № 24. URL: <http://bd.patent.su/2398000-2398999/pat/servlet/servlet51c0.html>

12. Патент № 2277579 RU. Металлсодержащая маслорастворимая композиция для смазочных материалов / В. Г. Бабель и др.; заявл. 26.05.2005, опубл. 10.06.2006. Бюл. № 16. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2277579>

13. Патент № 2449006 RU. Композиции смазочных масел, содержащие титан / Г. Х. Гинтер; заявл. 05.12.2007, опубл. 27.04.2012. Бюл. № 12. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/244/2449006.html>

14. **Баринов С. В., Загородских Б. П., Симдянкин А. А.** Повышение износостойкости деталей их слоением // Трение и износ. 2001. Т. 22, № 6. С. 703–706. URL: http://nasb.gov.by/rus/publications/trenie/tre22_6.php#top

15. **Баринов С. В., Загородских Б. П., Симдянкин А. А.** Исследование износостойкости деталей с неоднородной поверхностью трения // Трение и износ. 2003. Т. 24, № 5. С. 568–572. URL: http://nasb.gov.by/rus/publications/trenie/tre24_5.php

16. Обработка смазочного масла ультразвуком при проведении триботехнических испытаний / А. А. Симдянкин [и др.] // Трение и износ. 2017. Т. 38, № 4. С. 311–315. DOI: <https://doi.org/10.3106/S1068366617040134>

17. **Ефремов Л. В., Баева Л. С., Тикалов А. В.** Виброакустические испытания образцов трибосопрежения на износостойкость // Вестник АГТУ (Сер. «Морская техника и технология»). 2017. № 2. С. 69–79. DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2017-2-69-76>

18. Исследование влияния ультразвуковых колебаний на эффективность технологических смазок / Б. С. Каргин [и др.] // Вісник Приазовського державного технічного університету. Технічні науки. 2015. № 30-1. С. 136–140. URL: http://journals.urau.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/51695

Поступила 11.07.2018; принята к публикации 15.08.2018; опубликована онлайн 28.12.2018

Об авторах:

Симдянкин Аркадий Анатольевич, профессор кафедры технической эксплуатации транспорта, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет им. П. А. Костычева» (390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: I-9948-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9761-6183>, seun2006@mail.ru

Давыдкин Александр Михайлович, доцент кафедры технического сервиса машин, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), кандидат технических наук, ResearcherID: S-8297-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2984-2362>, aldavydkin@yandex.ru



Слюсарев Михаил Николаевич, аспирант кафедры технической эксплуатации транспорта, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет им. П. А. Костычева» (390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ResearcherID: T-1008-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0665-4473>, slesar87@post.ru

Земсков Александр Михайлович, старший преподаватель кафедры технического сервиса машин, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), кандидат технических наук, ResearcherID: S-7748-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1489-6077>, ZAM503@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. А. Симдянкин – научное руководство, формирование концепции исследования, анализ данных, доработка текста; А. М. Давыдкин – разработка методики исследования, контроль проведения опытных работ; М. Н. Слюсарев – проведение экспериментальных исследований, подготовка и первичный анализ литературных данных; А. М. Земсков – интерпретация данных износных испытаний, верстка и редактирование текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Mamonova M. V., Prudnikov V. V., Prudnikova I. A. *Surface Physics. Theoretical Models and Experimental Methods*. Moscow: Fizmatlit; 2011. 406 p. Available at: <http://avidreaders.ru/read-book/fizika-poverhnosti-teoreticheskie-modeli-i-eksperimentalnye.html> (In Russ.)
2. Semenov A. P. Antifriction materials: experience of application and prospects. *Treniye i smazka v mashinakh i mekhanizмах* = Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms. 2007; 12:21–36. Available at: http://www.mashin.ru/files/t_1207.pdf (In Russ.)
3. Balyakin V. B., Ganin I. A., Lavrin A. V. Investigation of the influence of the type of grease on the coefficient of friction and the degree of wear of the contact pair corrosion-resistant steel-fluoroplast. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* = Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2016; 18(1):72–76. Available at: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2016/2016_1_72_76.pdf (In Russ.)
4. Tunik A. Yu. Structural features of antifriction coatings with additives of solid lubricants obtained by various methods of spraying. *Visnik Priazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Tekhnichni nauki* = Priazovskiy State Technical University Bulletin. Engineering. 2012; 25:163–170. Available at: http://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/29382 (In Russ.)
5. Kravchenko I. N., Gaidar S. M., Zhukov L. V., Larin P. G. Substantiation of the factors influencing the reliability of special equipment in special operating conditions. *Fundamentalnye issledovaniya* = Fundamental Research. 2014; 3-2:262–266. Available at: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=33620> (In Russ.)
6. Denisov A. S., Danilov I. K. Influence of lubrication conditions on the thickness of the oil layer in the connecting rod bearings of the diesel engine. *Vestnik SGTU* = Saratov State Technical University Bulletin. 2005; 1(6):74–80. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/vliyaniye-usloviy-smazki-na-tolschinumaslyanogo-sloya-v-shatunnyh-podshipnikah-dizelnogo-dvigatelya> (In Russ.)
7. Sergienko V. P., Bukharov S. N. *Vibration and Noise in Non-Stationary Processes of Friction*. Minsk: Belarusian Science Publ.; 2012. 346 p. Available at: <http://avidreaders.ru/read-book/vibraciya-i-shum-v-nestacionarnyh-processah.html> (In Russ.)
8. Patent № 2527243 RU. Tribotechnical composition for metal friction units / Ezhunov E. M., Zakharov I. V.; appl. 25.02.2013, publ. 27.08.2014, bulletin No. 24. Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/252/2527243.html> (In Russ.)
9. Patent № 2428597 RU. Method for the formation of non-porous friction pairs and the device for its implementation / Semenov Yu. A., Taranov A. S.; appl. 09.04.2010, publ. 10.09.2011, bulletin No. 25. Available at: <http://www.freepatent.ru/patents/2428597> (In Russ.)

10. Patent № 2267521 RU. Additive for lubricants, additive package to engine oils, engine oil / Churzin A. N and others; appl.: 06.08.2004, publ. 10.01.2006, bulletin No. 1. Available at: <http://bd.patent.su/2267000-2267999/pat/servlet6c28.html> (In Russ.)

11. Patent № 2398010 RU. Metal-clad multifunctional composition for motor, transmission and industrial oils / Babel V. G., Garkunov D. N.; appl. 06.03.2009, publ. 27.08.2010, bulletin No. 24. Available at: <http://bd.patent.su/2398000-2398999/pat/servlet51c0.html> (In Russ.)

12. Patent № 2277579 RU. Metal-containing oil-soluble composition for lubricants. / Babel V. G. and others; appl. 26.05.2005, publ. 10.06.2006, bulletin No. 16. Available at: <http://www.freepatent.ru/patents/2277579> (In Russ.)

13. Patent № 2449006 RU. Lubricant compositions containing titanium. / Ginter H. H.; appl.: 05.12.2007, publ.: 27.04.2012, bulletin No. 12. Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/244/2449006.html> (In Russ.)

14. Barinov S. V., Zagorodskikh B. P., Simdyankin A. A. Increase of wear resistance of parts by their foliation. *Treniye i iznos* = Friction and Wear. 2001; 22(6):703–706. Available at: http://nasb.gov.by/rus/publications/trenie/tre22_6.php#top (In Russ.)

15. Barinov S. V., Zagorodskikh B. P., Simdyankin A. A. Investigation of the wear resistance of parts with an inhomogeneous friction surface. *Treniye i iznos* = Friction and Wear. 2003; 24(5):568–572. Available at: http://nasb.gov.by/rus/publications/trenie/tre24_5.php (In Russ.)

16. Simdyankin A. A., Uspensky I. A., Pashchenko V. M., Starunsky A. V. Treatment of lubricating oil with ultrasound during tribotechnical trials. *Treniye i iznos* = Friction and Wear. 2017; 38(4):311–315. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366617040134> (In Russ.)

17. Efremov L. V., Baeva L. S., Tikalov A. V. Vibroacoustic tests of tribocoupling samples for wear resistance. *Vestnik AGTU. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* = Astrakhan State Technical University Bulletin. Series: Marine Engineering and Technology. 2017; 2:69–79. DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2017-2-69-76> (In Russ.)

18. Kargin B. S., Anishchenko A. S., Kargin S. B., Khiora V. S., Tkachev R. O., Voronina N. A. Investigation of the influence of ultrasonic vibrations on the efficiency of technological lubricants. *Visnik Priazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Tekhnichni nauki* = Priazovskiy State Technical University Bulletin. Engineering. 2015; 30-1:136–140. Available at: http://journals.uran.ua/vestnikpctu_tech/article/view/51695 (In Russ.)

Received 11.07.2018; revised 15.08.2018; published online 28.12.2018

About authors:

Arkadii A. Simdiankin, Professor, Chair of Technical Operation of Transport, Ryazan State Agro-technological University (1 Kostycheva St., Ryazan 390044, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: I-9948-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9761-6183>, seun2006@mail.ru

Alexandr M. Davydkin, Associate Professor, Chair of Technical Service of Machines, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: S-8297-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2984-2362>, aldavydkin@yandex.ru

Mikhail N. Slyusarev, Postgraduate, Chair of Technical Operation of Transport, Ryazan State Agrotechnological University (1 Kostycheva St., Ryazan 390044, Russia), ResearcherID: T-1008-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0665-4473>, slesar87@post.ru

Alexander M. Zemskov, Senior Lecturer, Chair of Technical Service Machines, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: S-7748-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1489-6077>, ZAM503@mail.ru

Contribution of the authors:

A. A. Simdiankin – scientific supervision, formulation of the research concept, data analysis, revision of the text; A. M. Davydkin – development of research methods, control of experimental work; M. N. Slyusarev – conducting experimental studies, review and analysis of literature data; A. M. Zemskov – data interpretation of wear tests, word processing and editing the text.

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



Совершенствование технологии подготовки зерна к помолу на малых предприятиях

А. В. Анисимов*, **Ф. Я. Рудик**, **Б. П. Загородских**
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (г. Саратов, Россия)
**anisimovaleksan@mail.ru*

Введение. На малых предприятиях с упрощенным технологическим процессом сортового помола подготовительные операции, включающие в себя очистку, шелушение и увлажнение зерна, играют существенную роль в обеспечении высокого качества сортовой муки. Современное оборудование для мельниц малой производительности предполагает лишь сухую очистку зерна в обоечной машине с последующим его холодным кондиционированием. Использование оборудования, предназначенного для сортового помола с тщательной неоднократной очисткой, мойкой и гидротермической обработкой, не представляется возможным, так как это существенно повышает себестоимость муки. Целью статьи является повышение качественных и количественных показателей сортовой муки, получаемой на малых предприятиях за счет шелушения и подсушивания зерна перед помолом.

Материалы и методы. Исследования качества обработки зерна по таким показателям, как зольность (белизна), влажность, количество битых зерен проведены по ГОСТам РФ, а также установленным в науке и практике методам. Степень шелушения определена по показателю белизны с помощью фотоэлектрического белизномера СКИБ-М (ГОСТ 26361-2013 «Мука. Метод определения белизны»), влажность зерна – по ГОСТ 13586.5-2015 с использованием сушильного шкафа СЭШ-3М, количество битых зерен – по ГОСТ 30483-97.

Результаты исследования. В результате проведенного исследования было установлено, что эффективность обработки зерна в настоящее время зависит от использованных технических средств. На этом основании разработана комбинированная шелушильно-сушильная машина. Исследованы и установлены рациональные режимы обработки зерна, позволяющие повысить белизну получаемой муки в среднем на 4–7 условных единиц белизномера РЗ-БПЛ: производительность машины $Q = 700$ кг/ч; время обработки зерна $t = 72$ с; оптимальная влажность (с точки зрения белизны получаемой муки) поступающего на размол зерна $W = 14$ %; мощность излучателей $P = 1\ 000$ Вт.

Обсуждение и заключение. Теоретические исследования показывают, что шелушение зерна является одним из самых эффективных способов повышения сортности конечной продукции малых предприятий по переработке зерна с упрощенными технологическими схемами. Эффективность шелушения зерна пшеницы с влажностью выше 16 % снижается; данное обстоятельство говорит о целесообразности его подсушивания. Авторами статьи предложено оборудование и технология для обработки зерна перед сортовым помолом, обеспечивающие шелушение зерна и, в случае необходимости, его подсушивание. Определены режимные параметры шелушильно-сушильной машины для подготовки зерна к помолу. Разработанная технология позволяет в случае необходимости подсушивать переувлажненное зерно до необходимых кондиций, что дает возможность получить муку высокого качества из зерна, при гидротермической обработке которого был нарушен влажностный режим. Производительность машины в режиме подсушивания следует связать с мощностью микровол-

© Анисимов А. В., Рудик Ф. Я., Загородских Б. П., 2018



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

нового инфракрасного излучения, а его время и мощность должны ограничиваться максимально допустимой температурой нагрева зерна, не превышающей 60 °С.

Ключевые слова: шелушение, белизна, влажность, сушка, подготовка зерна к помолу

Для цитирования: Анисимов А. В., Рудик Ф. Я., Загородских Б. П. Совершенствование технологии подготовки зерна к помолу на малых предприятиях // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 4. С. 603–623. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.603-623>

Благодарности: Исследование проведено в рамках договора с Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (№ 180ГС1/6784 от 25.12.2014) по программе «СТАРТ-1» совместно с ООО «Здоровое питание».

Technological Improvements of Grain Preparation for Milling in Small Enterprises

A. V. Anisimov*, F. Ya. Rudik, B. P. Zagorodskikh

Saratov State Agrarian University named after N. I. Vavilov (Saratov, Russia)

**anisimovaleksan@mail.ru*

Introduction. In small enterprises with simplified technological process of graded milling, preparations, which involve cleaning, peeling and moistening grain, play an essential role for ensuring high quality of graded flour. Modern equipment for the low-productive mills implies only dry cleaning of grains in an abrasive machine with their further cold conditioning. The equipment designed for graded milling with deep multiple cleaning, washing and hydrothermal treatment is not possible. It significantly increases the cost of flour. The aim of the study is to increase both qualitative and quantitative indicators of graded flour in small enterprises through peeling and drying of grains before milling.

Materials and Methods. The quality analyses of grain processing according to such indicators as ash content (whiteness), moisture, quantity of fractured grains were carried out according to State Standards of the Russian Federation and the methods established in science and practice. The degree of peeling was determined by the whiteness indicator with a photoelectric whiteness SKIB-M (GOST 26361-2013 “Flour. Test method for whiteness”). Grain moisture was determined according to GOST 13586.5-2015 by the drying cabinet DEC-3M (drying electrical cabinet, model type 3M). The number of fractured grains was determined according to GOST 30483-97.

Results. The research result revealed the dependence of grain processing on the technical aids. A combined peeling–drying machine was developed on this principle. The authors have developed rational operations of grain processing, which increase the whiteness of the received flour on average 4–7 conventional units. The standard instrument for whiteness definition has been studied and set. According to the given results optimal operating parameters for grain processing before milling have been developed: machine productivity ($Q = 700$ kg/h); the period of grain processing ($t = 72$ s.); optimum moisture content (from the point of view of obtained flour whiteness) of grains received for milling ($W = 14$ %); radiant power ($P = 1\ 000$ W).

Conclusions. The research proved the fact that peeling of grains is one of the most effective ways of increasing the grade of end products of small enterprises with simplified technological process of graded milling. The efficiency of peeling seeds of wheat with humidity higher than 16 % decreases that speaks for the need to dry grains. The authors of the article introduce the equipment and technology for grain processing before graded milling, which provide grain peeling and, if necessary, drying. The operating parameters of the peeling-drying machine for preparation of grains for milling have been determined. The developed technology provide, if necessary, drying the remoistened grain to necessary standards that gives the chance to produce high-quality flour from the grains processed hydrothermally without processing moisture conditions required. The machine productivity in the mode of drying should be connected with the power of microwave infrared



radiation, and its time and power should be limited to a maximum permissible grain temperature, which does not exceed 60 °C.

Keywords: peeling, whiteness, moisture, drying, preparation of grain for grinding

For citation: Anisimov A. V., Rudik F. Ya., Zagorodskih B. P. Technological Improvements of Grain Preparation for Milling in Small Enterprises. *Vestnik Mordovskogo universiteta = Mordovia University Bulletin*. 2018; 28(4):603–623. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.603-623>

Acknowledgments: The study was conducted as part of an agreement with the Foundation for Assistance to Development of Small Enterprises in Scientific and Technical Sphere (No. 180GS1 / 6784, 25 December 2014) under the “START-1” program together with “Healthy Food” LLC.

Введение

Качество муки в первую очередь зависит от начальной операции технологического процесса, заключающегося в подготовке зерна к помолу. Необходимы тщательная очистка зерна от минеральных примесей и микронасекомых, а также шелушение оболочки. В соответствии с ГОСТ Р 52554-2006¹ в зерне, подготовленном к помолу, допускается не более 1 % примесей. В связи с этим актуальность процесса подготовки обусловлена важностью технологических операций, связанных не только с очисткой зерна от высокозольных прочных и трудноотделимых минеральных отложений, но и от оболочек, которые темнят и снижают сортность муки.

При крупнотоннажном производстве для подготовки зерна к помолу используется высокоэффективное (чаще всего импортное) оборудование. Для мельниц с малыми объемами производства (такие мельницы перерабатывают в России до 5 млн т зерна в год) в связи с высокой стоимостью, а также длительностью и сложностью технологического процесса подобное оборудование неприемлемо.

Целью данного исследования является повышение качественных и количественных показателей муки, получаемой на малых предприятиях за счет

очистки, шелушения и подсушивания зерна перед помолом.

Задачи исследования:

1. Анализ физико-механических свойств зерна пшеницы; определение основных факторов, влияющих на эффективность повышения качественных показателей получаемой муки;

2. Теоретическое обоснование основных режимных параметров шелушения и подсушивания зерна;

3. Экспериментальное исследование влияния технологических свойств зерна (влажности) и режимных параметров (степени шелушения) на качество получаемой из него муки.

Обзор литературы

На крупных предприятиях России очистка поверхности зерна от грязи, пыли и волосков осуществляется сухим методом в обоечных машинах типа РЗ-БМО или щеточных машинах типа А1-БЦМ [1]. Многочисленные исследования показывают, что очистка на оборудовании такого типа сопровождается образованием большого количества битого зерна с поврежденным эндоспермом; зольность при этом практически не снижается².

Шелушение зерна является одним из самых эффективных способов очистки поверхности от загрязнений и удаления наружных оболочек [2].

¹ Пшеница. Технические условия : ГОСТ Р 52554-2006. Введ. 2006-09-06. М. : Изд-во стандартов, 2006. 15 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-52554-2006>

² Бузоверов С. Ю., Тарасов С. А. К вопросу интенсификации подготовки зерна к помолу различными способами // *Аграрная наука – сельскому хозяйству* : сб. ст. : в 3 кн. Барнаул : РИО Алтайского ГАУ. 2017. Кн. 3. С. 24–27. URL: <https://www.twirpx.com/file/2153495/>

Целями шелушения зерна при сортовом помоле являются:

1. Удаление наружных оболочек зерна вместе с загрязнениями и микроорганизмами, которые, попадая в конечную продукцию, уменьшают выход муки высшего сорта и сокращают срок хранения;

2. Упрощение технологической схемы переработки зерна за счет снижения процентного содержания оболочек по отношению к эндосперму [3].

Удаление внешних оболочек позволяет на упрощенных схемах помола получать более чистый в структурном и микробиологическом плане продукт с высоким показателем белизны.

Сравнительные опыты П. А. Козьмина по использованию зерна, шелушенного сухим способом и предварительно увлажненного до 16 % (количество удаленных плодовых оболочек составило около 50 % от их общего содержания), показали, что мука из увлажненного зерна получается более однородной, светлой и имеет лучшие хлебопекарные показатели качества. Относительное содержание клетчатки в зерне при этом снизилось на 15–25 %³. При помоле шелушенного зерна общий выход муки увеличился на 2–3 %, в т. ч. муки высоких сортов – на 5–6%.

Исследования, проведенные посредством шелушения увлажненного и сухого зерна в обоечной машине, показали, что шелушение предварительно увлажненного зерна несколько эффективнее сухого: мука становится светлее [4].

Отмечено также, что чрезмерное переувлажнение зерна перед шелушением имеет также и отрицательные свойства: отходы шелушения (отруби) обладают высокой влажностью, возникает необходимость в их последующем просушивании; мука также имеет высокую влажность, а рабочая поверх-

ность обоечной машины быстро зашлифовывается [5].

В то же время на процесс шелушения влияет предшествующая гидротермическая обработка, в т. ч. влажность зерна. При влажности более 17 % зерно проявляет себя как упруго-пластичное тело, в результате чего возрастают работа разрушения и энергозатраты на шелушение. Повышенная влажность зерна негативно влияет на качество конечных продуктов и производительность всей ПТЛ, а рабочая поверхность шелушительных машин быстро заливается [6].

Обобщая приведенные данные, следует отметить, что поставленная исследователями задача полного удаления оболочек зерна перед помолом не достигнута по причине особенностей анатомического строения зерна (сложная форма с бороздкой и бородкой). Поэтому последующие исследования полноты отделения оболочек были направлены на поиск оптимальной с технологической точки зрения степени шелушения зерна перед помолом.

Ж. С. Алимкуловым [7] установлено, что предварительное шелушение зерна следует применять при многосортных помолах пшеницы. Исследователем принята оптимальная степень шелушения – 0,8–1,0 % в расчете на сухую массу. В этом случае заметно снижается средневзвешенная зольность муки и содержание в ней клетчатки, а белизна повышается. Отмечено, что при 1 % степени шелушения содержание продуцентов микотоксинов снижается примерно на 50 %, а зольность зерна – на 0,02–0,03 %. В последние годы в разных странах появились разработки технологии сортового помола пшеницы с предварительным шелушением зерна. Чешская фирма «Прокоп» совместно с канадскими учеными разработала подобный вариант технологии под названием «Дебраннинг», что в пе-

³ Галимзянов Д. А. Интенсификация подготовки зерна для мельниц малой производительности : дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 27 с. URL: <http://tekhnosfera.com/intensifikatsiya-podgotovki-zerna-dlya-melnits-maloy-proizvoditelnosti>



реводе с английского языка означает «оголение, удаление оболочек». Имеются данные о разработке особых вариантов технологии в Китае и Японии. Технология шелушения, разработанная фирмой Bühler, позволяет повысить качественные показатели очистки и шелушения. После очистки, увлажнения и кондиционирования зерна шелушитель удаляет наружный слой оболочки зерен. По данным фирмы, количество микроорганизмов после обработки зерна в шелушителе уменьшается почти на 90 %, микотоксинов – на 50 %, тяжелых и токсичных металлов – на 90 %, песка – более чем на 90 %⁴ [8].

Наряду с очисткой поверхности зерна важнейшим этапом современной технологии мукомольного производства является гидротермическая обработка⁵ [9]. Именно варьируя параметры и режимы ГТО, можно изменить исходные технологические свойства зерна в требуемом направлении, что даст возможность оптимизировать технологический процесс и получить больший выход муки высшего сорта. Это говорит о необходимости проведения исследований по подготовке зерна к помолу с учетом всех подготовительных операций.

В последнее время произошли значительные изменения в структуре, способах и режимах гидротермической обработки. Однако ограниченность технологического оборудования мельниц малой производительности позволяет провести только один сокращенный по времени этап холодного кондиционирования. На предприятиях малой мощности по переработке зерна упрощение технологии подготовки зерна к помолу

привело к снижению выхода муки высоких сортов, при этом ее значительная часть не соответствует требованиям ГОСТ Р 52189-2003⁶.

В настоящее время гидротермическая обработка на малогабаритных технологических линиях осуществляется в простейших по устройству увлажняющих машинах, где к зерну добавляется вода и перемешивается шнеком. Количество поступающей в машину воды устанавливается вручную в зависимости от количества зерна и его требуемой конечной влажности и не регулируется в процессе последующего увлажнения зерна. Данная система проста и довольно эффективна в работе с водопроводными сетями со стабильным давлением. В условиях 80%-процентного износа коммунальных сетей российских городов и сел давление воды в питающем трубопроводе часто не является постоянной величиной и изменяется в различных пределах. При этом нарушается расчетное соотношение воды и зерна, вследствие чего влажность зерна, поступающего в бункеры для отволаживания, не всегда соответствует норме. Если недостаточную увлажненность можно устранить повторным увлажнением, то избыточную влажность снизить затруднительно, т. к. в технологических линиях после бункеров для отволаживания не предусмотрены сушильные установки. Избыточная влажность зерна, поступающего на размол, ведет к повышению энергозатрат на шелушение и снижению производительности линии. Повышенная влажность конечных продуктов (муки, крупы, отрубей) также негативно сказывается на их качестве и сроке хранения⁷. Сове-

⁴ Там же.

⁵ Там же

⁶ Анисимова Л. В., Выборнов А. А. Влияние гидротермической обработки зерна ячменя на эффективность его шелушения и качество получаемой ячменной муки // Современные проблемы техники и технологии пищевых производств : сб. ст. и докл. 5-й Всероссийской науч.-практ. конф. «Исследования и достижения в области теоретической и прикладной химии. Экология. Продукты питания». Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2011. С. 15–21.

⁷ Разработка и создание экспериментального образца энергосберегающего оборудования для подготовки зерна к помолу / А. В. Анисимов [и др.]. Отчет о НИОКР, рег. № НИОКР 115082610022, 14.12.2015. 65 с.

менное же автоматическое оборудование для холодного кондиционирования на малых предприятиях, осуществляющее точное поддержание необходимого соотношения воды и зерна, недоступно из-за высокой стоимости.

Анализ основных направлений развития оборудования для шелушения и технологий переработки зерновых культур показывает, что они характеризуются большим разнообразием и значительно отличаются по способу шелушения.

С целью разработки и создания нового эффективного оборудования для шелушения зерновых культур была проведена работа по систематизации машин для шелушения по типу их рабочих органов и признакам, определяющим конструктивно-технологическое исполнение машины на основе того или иного способа шелушения. Такая систематизация машин для шелушения зерна по наиболее существенным признакам легла в основу их классификации (рис. 1).

Анализ разработанной классификации показал, что наряду с современными пневмомеханическими рабочими органами, основанными на комплексных ударно-инерционном и аэродинамическом воздействии на объект шелушения [10], в мукомольном производстве получили распространение машины с механическими рабочими органами, работающие по принципу сжатия и трения, обеспечивающие среднее качество шелушения зерна пшеницы, но обладающие невысокой стоимостью⁸.

Такие шелушители могут иметь как горизонтальное, так и вертикальное расположение рабочих органов [11]. Тип поверхности рабочих органов у данных устройств также может быть различным в зависимости от вида и физико-механических свойств перерабатываемой культуры [12]. Представленная класси-

фикация позволяет учесть все основные особенности при разработке конструктивно-технологических схем новых шелушителей, способных обрабатывать зерно повышенной влажности и подсушивать его, обеспечивая при этом высокое качество шелушения.

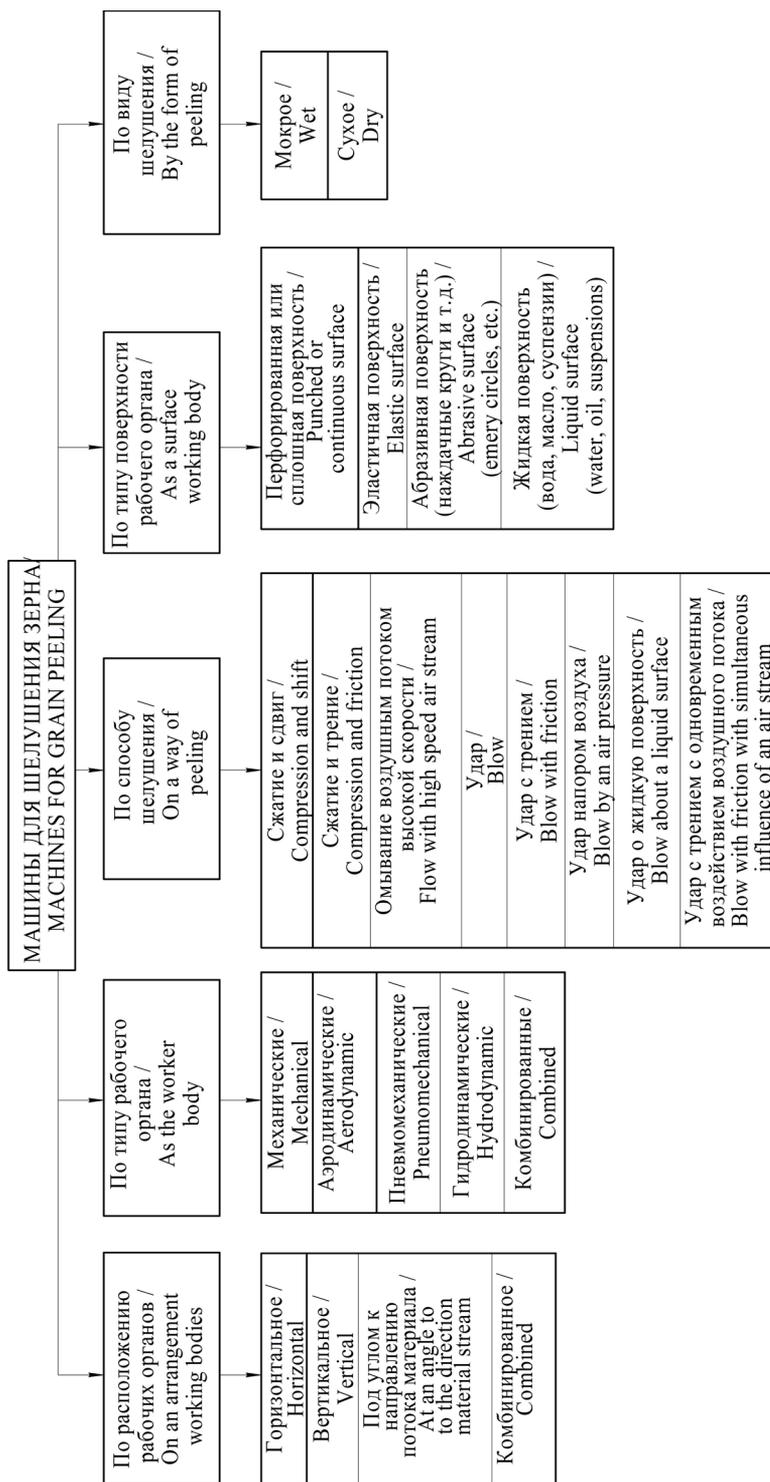
На существующих зерноперерабатывающих предприятиях самым распространенным оборудованием для обработки поверхности зерна пшеницы являются машины, разработанные на базе А1-ЗШН-3. Они предназначены для удаления поверхностных слоев зерна пшеницы (вместе с загрязнениями) при переработке в муку, ячменя – при производстве крупы [13].

Обработка в машинах данного типа использует принцип трения зерна о рабочие органы (подвижные абразивные круги и неподвижный ситовый цилиндр) и трение между самими зерновками.

Материал для обработки подается сверху в рабочую зону машины (между рабочими органами), и в результате интенсивного трения, происходящего при движении потока зерна вниз по машине, происходит соскабливание верхних слоев зерновки вместе с содержащимися на них загрязнениями, которые удаляются воздушным потоком встроенного вентилятора. Задвижкой на выходе машины регулируется степень шелушения и, соответственно, производительность машины.

Среди зарубежных фирм следует выделить швейцарскую компанию Bühler, являющуюся основным производителем машин для зернопереработки. 90 % современной техники остальных производителей оборудования для переработки зерна являются репликами моделей данной фирмы. Предприятие выпускает шелушительные машины, работающие по принципу трения и удара: это шелушительная машина для

⁸ Обзор и анализ способов шелушения овса / И. А. Хозяев [и др.] // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. ст. 9-й междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2016. С. 137–140.



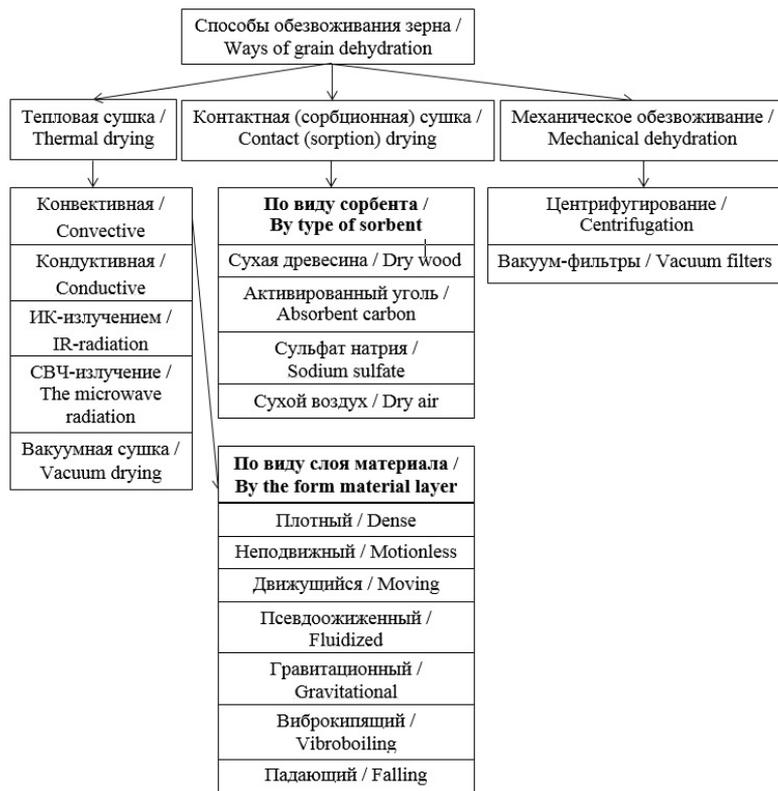
Р и с. 1. Классификация машин для шелушения зерна / Fig. 1. Classification of machines for grain peeling

обеззараживания МНХМ-W (основанная на трении зерна об обечайку), шелушитель ударного действия DOSB, шелушитель MNSA (многократный удар)⁹. Однако высокая производительность данного оборудования и чрезвычайно высокая стоимость не позволяет применять его на малых предприятиях по переработке зерна.

Достаточно высокая степень шелушения, низкий выход битого зерна и невысокая стоимость машин, действующих по принципу сжатия и трения,

свидетельствует о возможности разработки техники, основанной на данном принципе обработки.

При определении способа сушки авторы ориентировались главным образом на то, что выбранный вид сушки должен обеспечивать эффективное и быстрое удаление влаги из внутренних слоев зерновки из-за ограниченного времени нахождения зерна в машине. На основе научных данных были систематизированы способы обезвоживания зерна (рис. 2)¹⁰⁻¹¹.



Р и с. 2. Способы обезвоживания зерна
F i g. 2. Ways of grain dehydration

⁹ Продукция – BUHLERGROUP.com. URL: <http://www.buhlergroup.com/europe/ru/10.htm#.Wn-A2bdSWSM8>

¹⁰ **Васильев А. Н., Будников Д. А.** Совершенствование способов и оборудования для сушки зерна // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве : тр. междунар. науч.-техн. конф. М. : ГНУ ВИЭСХ, 2012. Т. 5. С. 152–157.

¹¹ **Буханцов К. Н.** Использование электрофизических способов для повышения эффективности сушки зерна // Новые технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности с использованием электрофизических факторов и озона : мат-лы Международной научно-практической конференции. Ставрополь : АГРУС, 2006. С. 27–30.



Наибольшее распространение получила тепловая сушка. При тепловой сушке энергия расходуется на преодоление силы связи влаги с сухим веществом зерна и на теплоту парообразования¹².

В большинстве зерносушилок, применяемых в сельском хозяйстве, тепло передается конвективным способом. Агент сушки служит не только для передачи тепла зерну, но и одновременно – для поглощения испарившейся из него влаги [14]. Данный способ характеризуется большой длительностью нагрева материала и малой энергоэффективностью. Сушка зернового слоя, находящегося непосредственно на горячей поверхности (кондуктивная сушка), малоэффективна и требует большого расхода тепла. При таком способе нижний слой зерна, соприкасающийся с горячей поверхностью, быстро нагревается; в то же время поверхностный слой почти не нагревается и не просушивается. Для интенсификации данного способа сушки необходимо обеспечивать ворошение слоя, что усложняет конструктивное исполнение сушилки [15–16].

Основанные на использовании СВЧ-излучения способы сушки состоят в том, что зерно находится в поле токов высокой частоты, где энергия превращается в теплоту, благодаря чему зерно нагревается¹³. Температура зерна в поле СВЧ быстро повышается (в течение нескольких секунд), причем однородный материал нагревается равномерно по всей толщине слоя. Разогрев зерна происходит за счет передачи молекулам зерна (как и любому токопроводящему материалу) дополнительной кинетической энергии (разгона молекул) [17].

Инфракрасные лучи широко применяются практически во всех отраслях жизнедеятельности человека [18]. Инфракрасный энергоподвод так же активно применяется в таких технологических процессах, как нагрев, обжарка, выпечка, термообработка зернового сырья и сушка [19–20]. Воздействие инфракрасного излучения на пищевые продукты растительного и животного происхождения связано с интенсификацией процессов биохимических превращений вследствие резонансного воздействия поглощаемой энергии на связи атомов в молекулах, частоты колебаний которых совпадают или кратны частоте падающего ИК-излучения [21]. Благодаря высокой проникающей способности ИК-излучение не только обеспечивает быстрый прогрев зернового сырья, но и изменяет его биохимические, физико-технологические, микробиологические и органолептические свойства. Это позволяет вырабатывать качественно новые продукты с высокой степенью усвояемости, низкой микробиологической обсемененностью, повышенным сроком хранения [22].

В настоящее время отдельные производители выпускают небольшими партиями зерносушилки различных конструкций, компонентов и производительности, принцип работы которых основан на ИК-излучении, но все они характеризуются высокой энергоэффективностью и скоростью сушки, а также низкой температурой нагрева зерна¹⁴ [23–25].

Проведенный анализ видов и способов сушки позволил сделать выбор в пользу ИК- и СВЧ-сушки. Только при данных видах подвода энергии обеспечивается быстрый равномерный нагрев

¹² Булахов Е. Ю., Канатьева А. В., Безносюк Р. В. Перспективное направление совершенствования способа сушки зерна // Принципы и технологии экологизации производства в сельском, лесном и рыбном хозяйстве : мат-лы 68-ой Междунар. науч.-практ. конф. Рязань : РГАТУ, 2017. С. 42–46. URL: http://rgatu.ru/archive/sborniki_konf/16/68_1.pdf

¹³ Файзрахманов Ш. Ф. Применение СВЧ для сушки сельскохозяйственной продукции // Лапшинские чтения : мат-лы IX Междунар. науч.-практ. конф. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2013. С. 369–371. <https://elibrary.ru/item.asp?id=22253101>

¹⁴ ИК-оборудования – ООО Производственная компания Старт. URL: <http://pcstart.ru/ik-oborudovaniya>

и удаление влаги, находящейся внутри зерновки.

Материалы и методы

Белизна муки определена по ГОСТ 26361-2013 «Мука. Метод определения белизны»¹⁵ с помощью фотоэлектрического прибора СКИБ-Л; влажность зерна в потоке – с помощью разработанной для машины автоматизированной системы управления (АСУ). Контроль влажности проведен по ГОСТ 13586.5-2015¹⁶ с использованием сушильного шкафа СЭШ-3М. Количество битых зерен определено по ГОСТ 30483-97¹⁷.

Выбор рациональных режимных параметров обработки зерна осуществлен на шелушильно-сушильной установке с производительностью 500–1 000 кг/ч.

Результаты исследования

В результате проведенных исследований установлено, что шелушение зерна пшеницы перед помолом повышает качество получаемой из него муки. Главными показателями качества шелушения при переработке зерна в муку, определяющими ее сортность, являются степень шелушения (определяется по зольности или белизне муки) [26], влажность¹⁸ и количество битых зерен.

Конструктивная схема шелушильно-сушильной установки

Была разработана и исследована комбинированная шелушильно-сушильная машина с ИК-излучением (вертикального исполнения), в которой наряду с шелушением зерна осуществляется его подсушивание и обеззараживание. Шелушение протекает по принципу

трения зерна о неподвижный ситовый цилиндр и подвижные абразивные круги (рис. 3), где 1 – корпус; 2, 3 – входной и выходной патрубки; 4 – привод; 5 – ситовый цилиндр; 6 – полый вал с отверстиями; 7 – ИК-излучатели; 8 – абразивные круги; 9 – обечайки; 10 – вентилятор [27]. Для машины была разработана автоматизированная система управления (АСУ) на основе приборов фирмы «ОВЕН» [28]. Схема процесса обработки зерна при подготовке к помолу с использованием разработанной машины представлена на рис. 4.

Шелушильно-сушильная машина работает следующим образом. Электропривод 4 через поликлиноременную передачу передает вращение полному валу 6 с установленными на нем абразивными кругами 8. Неочищенное зерно, подвергаемое обработке, самоотекотом через загрузочный патрубок 2 попадает в рабочую зону машины между подвижными абразивными кругами 8 и статичным ситовым цилиндром 5, где, благодаря интенсивному трению о них и перемешиванию, происходит отделение загрязнений и наружных оболочек зерна, которые в последующем удаляются аспирационной системой машины.

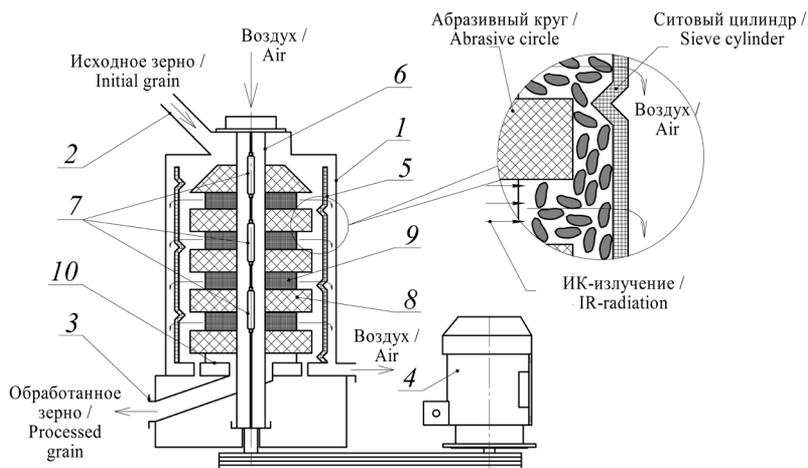
По мере прохождения зерна в рабочем пространстве выштамповка 10 ситового цилиндра 5, выполненная в виде винтовой линии, заставляет его двигаться от внешней стенки барабана к вращающимся абразивным кругам (к центру машины), что улучшает перемешивание слоев зерна, а отшелушенные оболочки быстрее удаляются через перфорацию ситового цилиндра.

¹⁵ Мука. Метод определения белизны : ГОСТ 26361-2013. Введ. 2014-07-01. М. : Стандартинформ, 2014. 10 с. URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/54625/>

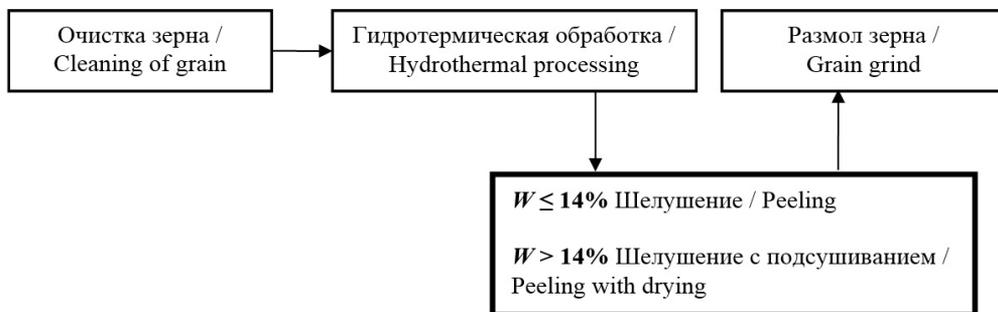
¹⁶ Зерно. Метод определения влажности : ГОСТ 13586.5-2015. Введ. 2016-07-01. М. : Стандартинформ, 2016. 15 с. URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/60687/>

¹⁷ Зерно. Методы определения общего и фракционного содержания сорной и зерновой примесей; содержания мелких зерен и крупности; содержания зерен пшеницы, поврежденных клопом-черепашкой; содержание металломагнитной примеси : ГОСТ 30483-97. Минск : ИПК Издательство стандартов, 1998. Введ. 1998-07-01. 21 с. URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/27696/>

¹⁸ Разработка и создание экспериментального образца энергосберегающего оборудования для подготовки зерна к помолу / А. В. Анисимов [и др.]. Отчет о НИОКР, рег. № НИОКР 115082610022, 14.12.2015. 65 с.



Р и с. 3. Шелушильно-сушильная машина
F i g. 3. Peeling-drying machine



Р и с. 4. Схема процесса обработки зерна при подготовке к помолу
F i g. 4. The scheme of grain processing during preparation for milling

Радиационное инфракрасное излучение, выделяемое инфракрасными излучателями 7, проходя сквозь сетчатые обечайки 9, воздействует на молекулы воды и зерна, переходит в тепло, нагревает зерно и выпаривает из него избыточную влагу. Наружный воздух, нагнетаемый вентилятором 10, являющимся частью аспирационной системы машины, проходит через полый вал 6 с инфракрасными излучателями 7 и в нагретом состоянии поступает в зону обработки зерна, осуществляя конвективный тепло- и массообмен с удалением паров воды. Из машины обработанное зерно удаляется через выпускной патрубков 3 [27].

В соответствии с теоретическими исследованиями определены конструктивные и режимные параметры машины, представленные в табл. 1.

При переработке зерна без шелушения поток зерна направляется шибберными заслонками на самотеках в обход установки. Производительность шелушильно-сушильной машины (500–1 000 кг/ч с шагом 100 кг) задается шибберной заслонкой, управляемой штурвалом через червячную передачу путем изменения площади выходного отверстия установки. Все данные архивировались на жестком диске компьютера. Для связи АСУ машины с компьютером использован адаптер сети ОВЕН АС4,

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Технические характеристики установки
Technical characteristics of the installation

Параметр / Parameter	Размерность / Dimension	Значение / Value
Производительность, Q / Productivity, Q	кг/ч / kg/h	500–1 000
Диаметр абразивных кругов, d / Diameter of abrasive disks, d	мм / mm	250
Частота вращения вала, n / Shaft speed, n	мин ⁻¹ / min ⁻¹	1 460
Диаметр ситового цилиндра, d_s / Diameter of the screen cylinder, d_s	мм / mm	270
Площадь ситового цилиндра, S / Area of the screen cylinder, S	м ² / m ²	0,29
Расход воздуха на аспирацию, V / Air consumption on an aspiration, V	м ³ /ч / m ³ /h	920
Установленная мощность (общая), P / Rated capacity (common), P	кВт / kW	14
Мощность электродвигателя, $P_{дв}$ / Electric motor power, P_{mot}	кВт / kW	11
Мощность ИК-излучателей, $P_{изл}$ / Power of IR-radiators, P_{rad}	кВт / kW	3
Тип излучателя / Radiator type	–	КГТ 220-1 000

преобразующий сигналы интерфейса RS 485 в USB и обратно, и OPC-сервер OWEN. В непрерывном режиме компьютер обрабатывал информацию, которая поступала от термопар, пирометра и датчика влажности, и выводил на монитор линии трендов температуры и влажности зерна на входе и выходе из машины. Поступающие данные обработаны программным комплексом Statistica 10.1.

На основе экспериментальных данных построены зависимости скорости сушки от мощности излучателей в камере нагрева. Мощность изменялась встроенным в АСУ установки регулятором. На рис. 5 представлен график скорости сушки при различной мощности излучателя.

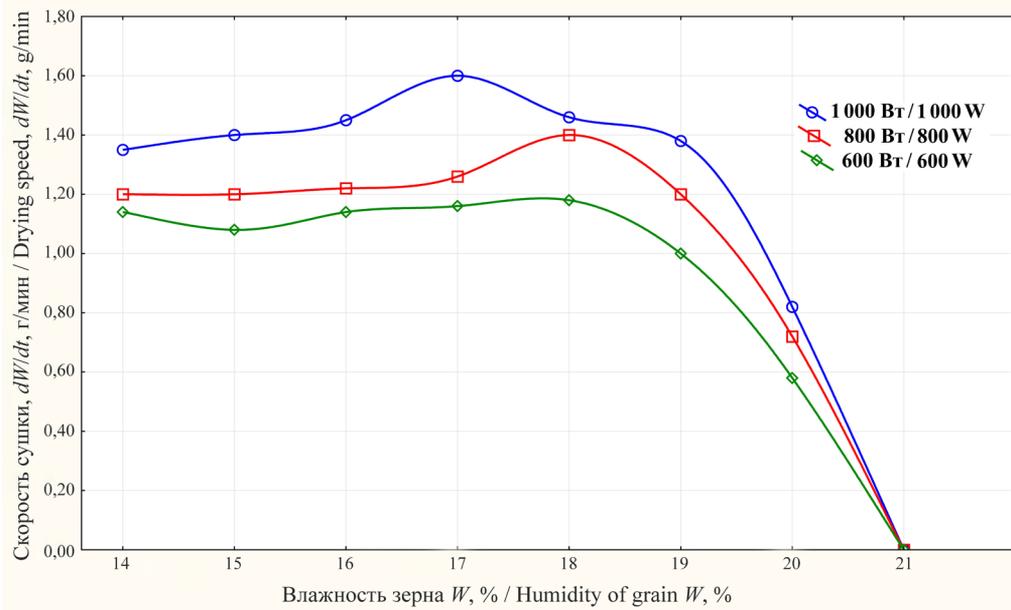
Полученные графики описывают динамику процесса сушки и дают возможность оценить изменения ее скорости. Анализ данных показывает, что скорость сушки существенно не снижается на всем протяжении операции и прямо пропорционально зависит от мощности ИК-излучения. Исходя из этого, наиболее эффективным следует

считать использование ИК-излучателей максимальной мощности – 1 000 Вт.

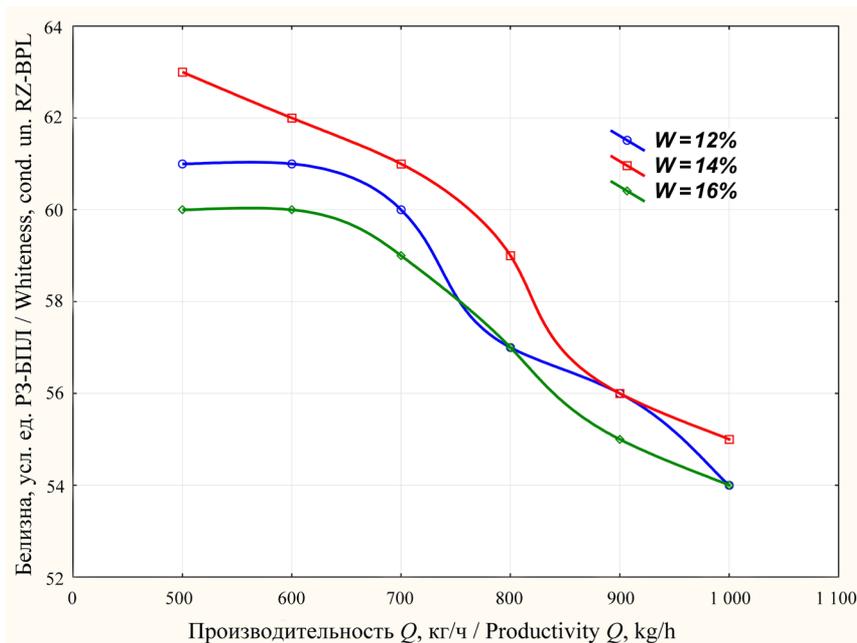
Белизна

Белизна муки определялась по стандартной методике путем отбора проб муки из обработанного и необработанного зерна разной влажности. Замеры проведены при значениях производительности 500–1 000 кг/ч с шагом в 100 кг/ч. Результаты исследований представлены на рис. 6–7.

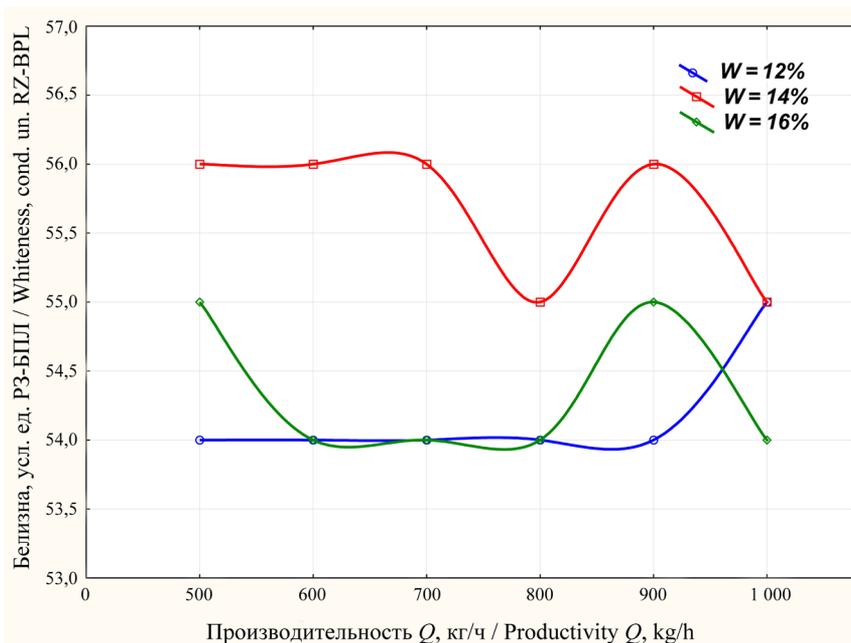
Анализ полученных результатов показывает, что белизна муки из зерна, обработанного в шелушильно-сушильной машине, выше, чем белизна муки из необработанного зерна. При самой высокой производительности машины (наименьшее время нахождения зерна в рабочей зоне и, следовательно, наименьшая степень шелушения) белизна муки выше на 1 усл. ед. РЗ-БПЛ, а при наименьшей производительности (самой высокой степени шелушения) – на 7 усл. ед. РЗ-БПЛ. В то же время экспериментальные данные показывают, что влажность исходного зерна также влияет на белизну получаемой муки. В частности, максимальная белизна



Р и с. 5. Кинетика сушки пшеницы
 F i g. 5. Kinetics of wheat drying



Р и с. 6. График зависимости белизны муки от производительности машины (шелушенное зерно)
 F i g. 6. Graph of dependence of flour whiteness on machine productivity (scoured grain)



Р и с. 7. График зависимости белизны муки от производительности машины (нешелушенное зерно)

Fig. 7. Graph of dependence of flour whiteness on machine productivity (unscoured grain)

муки наблюдается при обработке зерна влажностью 14 %, дальнейшее же увлажнение выше 16 % не приводит к росту белизны муки. Это говорит о необходимости подсушивания зерна перед первой драной системой в случае переувлажнения зерна после проведения ГТО.

Влажность

Влажность и температура зерна на входе и выходе из машины в онлайн-режиме определены автоматической системой управления машины (контроль полученных значений влажности зерна осуществлен определением влажности отобранных образцов по ГОСТ 13586.5-2015 с использованием сушильного шкафа СЭШ-3М).

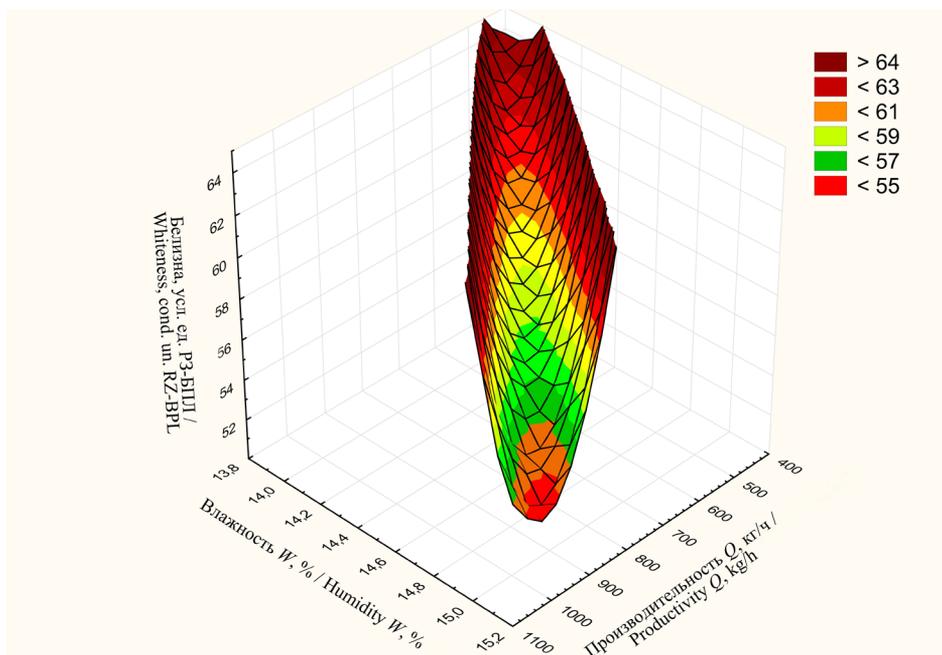
Основные результаты экспериментов по шелушению и сушке переувлажненного в результате ГТО зерна представлены в табл. 2 и на рис. 8 в виде трехмерной поверхности отклика.

Анализ зависимости показывает, что при влажности зерна $W_{нач} = 17\%$ на

выходе из машины влажность уменьшается до 15 % при максимальной производительности (наименьшее время нахождения зерна в рабочей зоне) и до 14,2 % – при минимальной производительности машины. Белизна полученной муки максимальна при производительности выше 700 кг/ч и влажности, близкой к 14 %.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что в случае переувлажнения зерна при проведении ГТО целесообразнее снизить производительность всей ПТЛ, подсушить объем зерна и получить муку высокого качества, чем произвести размол зерна с повышенной влажностью и получить муку с меньшей белизной и повышенной влажностью. Кроме того, при размоле переувлажненного зерна наблюдается повышенное выделение влаги в отсеках, что приводит к залипанию рабочих поверхностей сит и уменьшению их эффективной площади.

Экспериментально было определено время нахождения зерна в машине



Р и с. 8. График зависимости белизны муки и влажности зерна от производительности машины ($W_{нач} = 17\%$)
 F i g. 8. Graph of dependence of flour whiteness and grain moisture on machine productivity ($W_{init} = 17\%$)

Таблица 2

Table 2

Белизна муки и влажность зерна при различной производительности машины
Whiteness of flour and humidity of grain at various machine productivity

Производительность Q , кг/ч / Productivity Q , kg/h	Влажность зерна W , % / Humidity W , %	Белизна муки, усл. ед. РЗ-БПЛ / Whiteness, cond. un. RZ-BPL
500	13,9	64
600	14,1	63
700	14,7	61
800	14,9	59
900	15,0	56
1 000	15,1	55

в зависимости от ее производительности: 500 кг/ч – 94 с; 600 кг/ч – 84 с; 700 кг/ч – 72 с, 800 кг/ч – 54 с; 900 кг/ч – 42 с; 1 000 кг/ч – 34 с.

Количество битых зерен

Приращение содержания битых зерен в результате шелушения незначи-

тельно и составляет 0,36–0,79 %. Некоторое увеличение содержания зерновой примеси обусловлено ростом содержания битых зерен. За счет уменьшения размеров зерен в результате шелушения незначительно увеличивается содержание мелкого зерна.

Обсуждение и заключение

В статье представлена технология обработки зерна перед помолом, обеспечивающая шелушение зерна и его подсушивание. Разработана конструкция и определены режимные параметры шелушильно-сушильной машины для обработки зерна.

Теоретическими исследованиями установлено, что шелушение зерна является одним из самых эффективных способов повышения сортности конечной продукции малых предприятий по переработке зерна с упрощенными технологическими схемами. Эффективность шелушения зерна пшеницы с влажностью выше 16 % снижается; данное обстоятельство говорит о целесообразности его подсушивания.

В ходе экспериментальных исследований определены оптимальные технологические режимы, обеспечивающие эффективную обработку зерна пшеницы:

- производительность установки, кг/ч – 700;
- время нахождения зерна в машине, с – 72;
- влажность обрабатываемого зерна, % – 14;
- мощность излучателей, Вт – 1 000.

В результате проведенных исследований разработана конструкция и проведена производственная проверка технологии шелушильной установки, позволяющей в случае необходимости подсушивать зерно до необходимых кондиций после ГТО. Это дает возможность получить муку высокого качества из зерна, при гидротермической обработке которого был нарушен влажностный режим. Предложенная технология обеспечивает повышение сортности получаемой муки, белизна которой выше в среднем на 4–7 усл. ед. РЗ-БПЛ. Переработка переувлажненного зерна не позволяет получить муку высокого качества (с большим значением белизны); более того, переработка такого зерна приводит к выделению в технологическом оборудовании дополнительной влаги, которая становится причиной залипания рабочих органов машин и образования засоров.

Производительность машины в режиме подсушивания следует связать с мощностью микроволнового ИК-излучения, а его время и мощность должны ограничиваться максимально допустимой температурой нагрева зерна, не превышающей 60 °С.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Гафин М. М.** Подготовка зерна к помолу с использованием традиционного оборудования // Научный вестник Технологического института – филиала ФГБОУ ВПО Ульяновская ГСХА им. П. А. Столыпина. 2014. № 13. С. 51–55. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_22481480_35728280.pdf
2. **Кандрокв Р. Х., Панкратов Г. Н.** Роль шелушения зерна в технологии переработки твердой пшеницы // Хлебопродукты. 2013. № 3. С. 44–45. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_20230231_84552895.pdf
3. Оптимизация параметров и совершенствование технологии зерношелушения / В. Н. Невзоров [и др.] // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2013. № 4. С. 160–165. URL: <http://www.kgau.ru/vestnik/content/2013/4.13.pdf>
4. Влияние шелушения зерна на параметры процесса его измельчения / О. С. Журба [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья. 2012. № 8. С. 18–23. URL: <http://www.foodprom.ru/images/pdf/hips/2012/HIPS-2012-08.pdf>
5. Adherence within biological multilayered systems : Development and application of a peel test on wheat grain peripheral tissues / M. R. Martelli [et al.] // Journal of Cereal Science. 2010. Vol. 52, Issue 1. P. 83–89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.03.007>



6. Бузоверов С. Ю., Антипина Г. А. Влияние гидротермической обработки на качество зерна пшеницы // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2010. № 10 (72). С. 83–86. URL: http://www.asau.ru/vestnik/2010/10/Processing_Busoverov.pdf
7. Опыт подготовки зерна пшеницы к помолу с предварительным отделением оболочек / Ж. С. Алимкулов [и др.] // Экспресс-информация (Сер. «Мукомольно-крупяная промышленность»). 1979. Т. 1, вып. 7. С. 22.
8. Bühler: только чистое зерно можно долго хранить // Хлебопродукты. 2014. № 1. С. 34–35. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21258149>
9. Верецинский А. П. Подготовка зерна шелушением на мельницах сортов помолов пшеницы большой производительности // Хлебопродукты. 2010. № 1. С. 32–33. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_15117299_30443856.pdf
10. Патент 2457904 РФ, МПК В02В3/00. Устройство для шелушения зерна / М. Ц. Диданов, А. М. Диданов, Г. А. Исакова; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова»; заявл. 2010144596/13; опубл. 10.08.2012, бюл. № 13. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2457904>
11. Перов А. А. Способы шелушения зерна // Комбикорма. 2010. № 3. С. 45–46. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=16543568>
12. Верецинский А. П. Эффективность шелушильно-шлифовальных машин «Каскад» при подготовке зерна пшеницы в сортовых помоллах // Хлебопродукты. 2012. № 11. С. 40–41. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_18101211_78937508.pdf
13. Патент 2159679 РФ, МПК В02В3/02. Шелушильно-шлифовальная машина / Н. М. Иванов; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество научно-производственное предприятие фирма «ВОСХОД»; заявл. 11.06.1999; опубл. 27.11.2000, бюл. № 33. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2159679>
14. Nascimento V. R. G., Biagi J. D, de Oliveira R. A. Mathematical modeling of convective drying with infrared radiation of Moringa oleifera grains // Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental. 2015. Vol. 19 (7). P. 686–692. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n7p686-692>
15. Курдюмов В. И., Павлушин А. А. Теоретические и экспериментальные аспекты контактного способа передачи теплоты при сушке зерна // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2011. № 3. С. 106–110. URL: <http://lib.ugsha.ru:8080/bitstream/123456789/680/1/vestnik-2011-3-106-110.pdf>
16. К вопросу управления процессом комбинированной сушки зерна / В. А. Афонькина [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2016. Т. 26, № 1. С. 32–39. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.026.201601.032-039>
17. Патент 2509275 РФ, МПК F26B15/14, F26B17/04. СВЧ-конвективная сушилка / А. Н. Остриков, В. Д. Демьянов; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный университет инженерных технологий; заявл. 27.09.2012; опубл. 10.03.2014, бюл. № 7. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2509275>
18. Analysis on the influence of the exchange area on the heat exchange efficiency during far-infrared convection combination grain drying process / C. S. Liu [et al.] // 2017 International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA). 2017. P. 155–158. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSGEA.2017.177>
19. Image analysis and quality attributes of malting barley grain dried with infrared radiation and in a spouted bed / I. Konopka [et al.] // International Journal of Food Science and Technology. 2008. Vol. 43, Issue 11. P. 2047–2055. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2008.01820.x>
20. Reducing cracking and breakage of soybean grains under combined near-infrared radiation and fluidized-bed drying / S. Dondee [et al.] // Journal of Food Engineering. 2011. Vol. 104, Issue 1. P. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.11.018>

21. **Давидович Е. А.** Влияние ИК-обработки зерна пшеницы и ржи на параметры процесса его измельчения [сырье для производства спирта] // Пищевая и перерабатывающая промышленность. 2009. № 4. С. 1033. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13048584>

22. **Долгих П. П., Кулаков Н. В., Лоц Е. В.** Исследование инфракрасного способа сушки зерна // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2016. № 12 (123). С. 85–92. URL: http://www.kgau.ru/vestnik/2016_12/content/15.pdf

23. Патент 2352880 РФ, МПК F26B330. Сушилка инфракрасная / С. К. Волончук; заявитель и патентообладатель ФГБНУ СибНИТИП; заявл. 19.04.2007; опубл. 20.04.2009, бюл. № 11. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2352880>

24. Патент 2459166 РФ, МПК F26B17/12, F26B3/347. Установка для сушки и обработки зерна и кормов / Б. Г. Смирнов, А. Н. Васильев, А. А. Васильев; заявитель и патентообладатель ГНУ ВИ-ЭСХ; заявл. 02.08.2010; опубл. 20.08.2012, бюл. № 23. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2459166>

25. Патент 2134995 РФ, МПК A23L 1/025, A23B 9/04, F26B 3/30. Установка для термообработки зернового сырья / Н. В. Елькин, В. В. Кирдяшкин; заявитель и патентообладатель Н. В. Елькин, В. В. Кирдяшкин. № 98117679/13; заявл. 29.09.1998; опубл. 27.08.1999, бюл. № 33. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2134995>

26. **Штейнберг Т. С., Леонова Т. А.** Определение белизны муки. Новый стандарт // Контроль качества продукции. 2016. № 11. С. 22–25. URL: <http://vniiz.org/science/publication/article-208>

27. Патент 2491124 Российская Федерация, МПК B02B3/02. Шелушильно-сушильная машина / А. В. Анисимов, М. С. Богданова; заявитель и патентообладатель Саратовский гос. аграрный ун-т имени Н. И. Вавилова. № 2012104970; заявл. 13.02.2012; опубл. 27.08.2013, бюл. № 24. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2491124>

28. **Анисимов А. В.** Усовершенствованная система для автоматического управления температурой и влажностью зерна при подготовке к помолу // Вестник Саратовского государственного аграрного университета имени Н. И. Вавилова. 2015. № 6. С. 53–56. URL: <http://globalf5.com/Zhurnalny/Inzhenerno-tehnicheskie-nauki/Agrarniy-nauchnyi-jurnal/vypusk-2015-6?article=115070>

Поступила 05.03.2018; принята к публикации 15.05.2018; опубликована онлайн 28.12.2018

Об авторах:

Анисимов Александр Владимирович, доцент кафедры технологии производства и переработки продукции животноводства ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (410012, Россия, г. Саратов, Театральная пл., 1), кандидат технических наук, ResearcherID: E-7817-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5313-6329>, anisimovaleksan@mail.ru

Рудик Феликс Яковлевич, профессор кафедры технологий продуктов питания ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (410012, Россия, г. Саратов, Театральная пл., 1), доктор технических наук, ResearcherID: E-8546-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0115>, k-papsgau@rambler.ru

Загородских Борис Павлович, профессор кафедры технического сервиса и технологии конструкционных материалов ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (410012, Россия, г. Саратов, Театральная пл., 1), доктор технических наук, ResearcherID: E-8582-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3480-0631>, zagorodskihbp@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. В. Анисимов – подготовка первоначального варианта текста с последующей доработкой, анализ литературных данных; Ф. Я. Рудик – научное руководство, анализ и доработка текста; Б. П. Загородских – подготовка и первичный анализ литературных данных.



REFERENCES

1. Gafin M. M. Preparing grain for milling using conventional equipment. *Nauchnyy vestnik Tekhnologicheskogo instituta – filiala FGBOU VPO Ulyanovskaya GSKhA im. P. A. Stolypina* = Scientific bulletin of the Technological Institute – Branch of Stolypin Ulyanovsk State Academy of Agriculture. 2014; 13:51–55. Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_22481480_35728280.pdf (In Russ.)
2. Kandrov R. H., Pankratov G. N. The role of peeling of grain in technology of processing of solid wheat. *Khleboпродукты* = Bakery Products. 2013; 3:44–45. Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_20230231_84552895.pdf (In Russ.)
3. Nevzorov V. N., Holopov V. N., Samoylov V. A., Yarum A. I. Parameter optimization and technology improvement of the grain-peeler. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Krasnoyarsk State Agrarian University Bulletin. 2013; 4:160–165. Available at: <http://www.kgau.ru/vestnik/content/2013/4.13.pdf> (In Russ.)
4. Zhurba O. S., Karamzin A. V., Krikunova L. N., Ryabova S. M. Influence of peeling of grain on parameters of process of its refinement. *Khreneniye i pererabotka selkhozsyrya* = Storage and Processing of Agricultural Raw Materials. 2012; 8:18–23. Available at <http://www.foodprom.ru/images/pdf/hips/2012/HIPS-2012-08.pdf> (In Russ.)
5. Martelli M. R., Barron C., Mabile F., Rouau X., Sadoudi A. Adherence within biological multi-layered systems : Development and application of a peel test on wheat grain peripheral tissues. *Journal of Cereal Science*. 2010; 52(1):83–89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.03.007>
6. Buzoverov S. Yu., Antipina G. A. Influence of a hydroheat treatment on quality of grain of wheat/page. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Altai State Agricultural University Bulletin. 2010; 10:83–86. Available at: http://www.asau.ru/vestnik/2010/10/Processing_Buzoverov.pdf (In Russ.)
7. Alimkulov Zh. S., Egorov G. A., Maksimchuk B. M., Shcherbakova G. S. Experience of preparation of seed of wheat for a grinding with preliminary office of envelopes. *Ekspress-informatsiya. Seriya "Mukomolno-krupyanaya promyshlennost"* = Express Information. Series: Flour-Grinding Grain Industry. 1979; 1(7):22. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28337104> (In Russ.)
8. Bühler: only pure grain can be stored long. *Khleboпродукты* = Bakery Products. 2014; 1:34–35. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21258149> (In Russ.)
9. Vereshchinsky A. Grain preparation by peeling on mills high-quality grindings of wheat of big efficiency. *Khleboпродукты* = Bakery Products. 2010; 1:32–33. Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_15117299_30443856.pdf (In Russ.)
10. Patent 2457904 of the Russian Federation, IPC B02B3/00. The device for grain peeling / Didanov M. Ts., Didanov A. M., Iskakova G. A.; applicant and patent holder Berbekov Kabardino-Balkarian State University; appl. 2010144596/13; publ. 10.08.2012; bulletin no. 13. Available at: <http://www.freepatent.ru/patents/2457904> (In Russ.)
11. Perov A. A. Ways of peeling grain. *Kombikorma* = Compound feeds. 2010; 3:45–46. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=16543568> (In Russ.)
12. Vereshchinsky A. P. Effectiveness peeling-rubbing machines “Cascade” by wheat seed preparation in high-quality grindings. *Khleboпродукты* = Bakery Products. 2012; 11:40–41. Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_18101211_78937508.pdf (In Russ.)
13. Patent 2159679 of Russian Federation, IPC B02B3/02. Peeling-rubbing machine / Ivanov N. M.; applicant and patent holder Voskhod Scientific and Production Enterprise; appl. 99112348/13; publ. 27.11.2000, bulletin no. 33. Available at: <http://www.freepatent.ru/patents/2159679> (In Russ.)
14. Nascimento V. R. G., Biagi J. D., de Oliveira R. A. Mathematical modeling of convective drying with infrared radiation of Moringa oleifera grains. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2015; 19(7):686–692. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n7p686-692>
15. Kurdyumov V. I., Pavlushin A. A. Theoretical and experimental aspects of a contact way of transfer of warmth when drying grain. *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Ulyanovsk State Agricultural Academy Bulletin. 2011; 3:106–110. Available at: <http://lib.ugsha.ru:8080/bitstream/123456789/680/1/vestnik-2011-3-106-110.pdf> (In Russ.)

16. Afonkina V. A., Zakhakhatnov V. G., Mayerov V. I., Popov V. M. On the question of process control combined grain drying. *Vestnik Mordovskogo universiteta = Mordovia University Bulletin*. 2016; 26(1):32–39. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.026.201601.032-039> (In Russ.)
17. Patent 2509275 of Russian Federation, IPC F26B15/14, F26B17/04. Microwave Oven as Convective Dryer / Ostrikov A. N., Demyanov V. D.; applicant and patent holder Voronezh State University of Engineering Technologies; appl. 2012141222/06; publ. 10.03.2014; bulletin No. 7. Available at: <http://www.freepatent.ru/patents/2509275> (In Russ.)
18. Liu C. S., Shang T., Yang S. Q., Wu W. F., Chen S. Y. Analysis on the influence of the exchange area on the heat exchange efficiency during far-infrared convection combination grain drying process. In: *International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA)*. 2017; 155–158. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSGEA.2017.177>
19. Konopka I., Markowski M., Tanska M., Zmojda M., Malkowski M., Bialobrzewski I. Image analysis and quality attributes of malting barley grain dried with infrared radiation and in a spouted bed. *International Journal of Food Science and Technology*. 2008; 43(11):2047–2055. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2008.01820.x>
20. Dondee S., Meeso N., Soponronnarit S., Siriamornpun S. Reducing cracking and breakage of soybean grains under combined near-infrared radiation and fluidized-bed drying. *Journal of Food Engineering*. 2011; 104(1):6–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.11.018>
21. Davidovich E. A. Influence IR-processing of seed wheat and a rye on parameters of process its refinement [raw materials for production of alcohol]. *Pishchevaya i pererabatyvayushchaya promyshlennost = Food and Processing Industry*. 2009; 4:1033. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13048584> (In Russ.)
22. Dolgikh P. P., Kulakov E. V. The research of infra-red way of grain drying. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Krasnoyarsk State Agrarian University Bulletin*. 2016; 12:85–92. Available at: http://www.kgau.ru/vestnik/2016_12/content/15.pdf (In Russ.)
23. Patent 2352880 of Russian Federation, IPC F26B330. Dryer infrared / Volonchuk S. K.; applicant and patent holder Public Siberian Research and Design Institute of Technology of Processing of Agricultural Production Scientific Institution; appl. 2007114874/06; publ. 20.04.2009; bulletin no. 11. Available at: <http://www.freepatent.ru/patents/2352880> (In Russ.)
24. Patent 2459166 of Russian Federation, IPC F26B17/12, F26B3/347. Installation for drying and processing of grain and forages / Smirnov B. G., Vasilyev A. N., Vasilyev A. A.; applicant and patent holder GNU VIESKh; appl. 02.08.2010; publ. 20.08.2012, bulletin no. 23. <http://www.freepatent.ru/patents/2459166> (In Russ.)
25. Patent 2134995 of Russian Federation, IPC A23L 1/025, A23B 9/04, F26B 3/30. Installation for heat treatment of grain raw materials / Elkin N. V., Kiryashkin V. V.; appl. 29.09.1998; publ. 27.08.1999, bulletin no. 33. <http://www.freepatent.ru/patents/2134995> (In Russ.)
26. Steinberg T. S., Leonova T. A. Determination of whiteness of flour. New standard. *Kontrol kachestva produktsii = Quality Control of Production*. 2016; 11:22–25. Available at: <http://vniiz.org/science/publication/article-208> (In Russ.)
27. Patent 2491124 of Russian Federation, IPC B02B3/02. Peeling-drying machine / Anisimov A. V., Bogdanova M. S.; applicant and patent holder Vavilov Saratov State Agrarian University; appl. 13.02.2012; publ. 27.08.2013, bulletin no. 24. <http://www.freepatent.ru/patents/2491124> (In Russ.)
28. Anisimov A. V. An improved system for automatic control of grain temperature and moisture content in preparation for grinding. *Vavilov Saratov State Agrarian University Bulletin*. 2015; 6:53–56. Available at: <http://globalf5.com/Zhurnaly/Inzhenerno-tehnicheskie-nauki/Agrarniy-nauchnyi-jurnal/vypusk-2015-6?article=115070> (In Russ.)

Received 05.03.2018; revised 15.05.2018; published online 28.12.2018



About authors:

Alexander V. Anisimov, Associated Professor, Chair of Technology of Production and Processing of Livestock Products, Saratov State Agrarian University named after N. I. Vavilov (1 Theatre Square, Saratov 410012, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: E-7817-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5313-6329>, anisimovaleksan@mail.ru

Felix Ya. Rudik, Professor, Chair of Technology of Food Products, Saratov State Agrarian University named after N. I. Vavilov (1 Theatre Square, Saratov 410012, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: E-8546-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0115>, k-pappsgau@rambler.ru

Boris P. Zagorodskih, Professor of Chair of Technical Service and Technology of Structural Materials, Saratov State Agrarian University named after N. I. Vavilov (1 Theatre Square, Saratov 410012, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: E-8582-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3480-0631>, zagorodskihbp@yandex.ru

Contribution of the authors:

A. V. Anisimov – writing the draft, reviewing and analyzing the literature; F. Ya. Rudik – scientific supervision, analysis and revision of the draft; B. P. Zagorodskih – analyzing the literature.

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



Автоматизированный агрегат для магнитно-импульсной обработки растений в садоводстве

И. Г. Смирнов, Д. О. Хорт*, Р. А. Филиппов,
А. И. Кутырёв, А. А. Артюшин

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

*vim_sad@mail.ru

Введение. Современный уровень сельскохозяйственного производства, в том числе садоводства, определяется интеллектуальными машинными технологиями и техническими средствами нового поколения с современным информационным и приборным обеспечением. Для реализации цифровых интеллектуальных агротехнологий в промышленном садоводстве требуется кардинальное изменение парадигмы технического обеспечения, основанное на разработке и применении новых автоматических и беспилотных машин, оборудования и программного обеспечения для управления рабочими процессами машин, навигации технических средств, контроля за выполнением технологических операций, мониторинга урожайности сельскохозяйственных культур, анализа развития болезней и вредителей на растениях и других технологических функций.

Материалы и методы. В системе автоматизированного проектирования «КОМПАС-3D» с использованием метода математического моделирования, теоретической механики и оптимального проектирования визуализирована 3D-модель, а также изготовлен опытный образец автоматизированного агрегата для магнитно-импульсной обработки растений. Программный код расчета требуемого перемещения штока актуатора разработан в текстовом редакторе Sublime Text. Использован язык программирования C++. Функциональные возможности программы для электронно-вычислительных машин связаны с возможностями контроллеров STM32, Arduino Mega/Uno/Nano. Для вывода графической информации и взаимодействия с ней использован экран TFT 320x240, Nextion 2.4.

Результаты исследования. В результате проведенных лабораторных исследований разработан автоматизированный агрегат и алгоритм системы управления приводом рабочих органов в ходе магнитно-импульсной обработки растений с учетом агротехнологических параметров садовых насаждений. Для управления рабочими органами автоматизированного агрегата разработана компьютерная программа, обеспечивающая управление как в автоматическом режиме, так и дистанционно.

Обсуждение и заключение. Созданный агрегат позволяет внедрить новый экологически безопасный технологический прием стимуляции жизненных и ростовых процессов плодовых культур и повысить точность выполнения операции за счет автоматической подстройки к различным агротехнологическим параметрам насаждений, обеспечивая требуемое значение магнитной индукции в рабочей зоне на растительных объектах в полевых условиях.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка, система управления, автоматизированный агрегат, облучение растений, садоводство, низкочастотное магнитное поле

© Смирнов И. Г., Хорт Д. О., Филиппов Р. А., Кутырёв А. И., Артюшин А. А., 2018



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



Для цитирования: Автоматизированный агрегат для магнитно-импульсной обработки растений в садоводстве / Смирнов И. Г. [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 4. С. 624–642. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.624-642>

Automated Unit for Magnetic-Pulse Processing of Plants in Horticulture

I. G. Smirnov, D. O. Khort*, R. A. Filippov, A. I. Kutyrev, A. A. Artiushin

Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russia)

**vim_sad@mail.ru*

Introduction. The current level of agricultural production, including horticulture, is determined by intelligent machine technologies and new generation technical means with modern information and instrument support. The implementation of digital intelligent agricultural technologies in industrial gardening requires a fundamental change in the paradigm of technical support, based on the development and application of new automatic and unmanned machines, equipment and software for managing work processes of machines, navigating technical means, controlling the implementation of technological operations, monitoring the yield of agricultural crops, analyzing diseases and pests on plants and other technological functions.

Materials and Methods. 3D model is visualized in the computer-aided design “KOMPAS-3D” through using the methods of mathematical modeling, theoretical mechanics and optimal design. A prototype of an automated unit for magnetic pulse processing of plants is made. The program code for calculating the required movement of the actuator rod is developed in the Sublime Text editor. C++ programming language was used. The functionality of the computer program is related to the capabilities of controllers STM32, Arduino Mega/Uno/Nano. Nextion 2.4 (the TFT screen 320x240) for the graphical output and interaction was used.

Results. An automated unit with the algorithm of the drive control system of working bodies were developed during the technological operation of magnetic pulse processing of plants, taking into account the agro-technological parameters of garden plantations. A computer program with both automat and remote control was designed for driving the working bodies.

Conclusions. The unit allows introducing a new environmentally safe technological method of stimulating vital and growth processes of fruit crops. This device provides the most efficient operation through automatic adjustment to various agro-technological parameters of plantings, providing the required value of magnetic induction in the working area on plant objects in the field.

Keywords: magnetic pulse processing, control system, automated unit, irradiation of plants, gardening, low-frequency magnetic field

For citation: Smirnov I. G., Khort D. O., Filippov R. A., Kutyrev A. I., Artiushin A. A. Automated Unit for Magnetic-Pulse Processing of Plants in Horticulture. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(4):624–642. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.624-642>

Введение

Эффективность цифровых технологий для производства продукции садоводства заключается не только в известных преимуществах автоматизации производства (повышение производи-

тельности и интенсивности использования оборудования, исключение ручного труда и т. д.), но и в достижении технологического эффекта путем создания наиболее благоприятных условий для биологических объектов. Как показы-

вает анализ научных исследований, с этой целью в настоящее время активно осуществляется поиск эффективных абиотических малоэнергозатратных факторов и экологически безвредных технологий, которые могут повысить устойчивость растений и стимулировать их рост и развитие в полевых условиях.

В настоящее время на обширном экспериментальном материале доказано реагирование биологических объектов на действие искусственного магнитного поля, а также предложены различные способы использования искусственного магнитного поля для повышения урожайности культур [1–3]. По мнению исследователей, наиболее перспективным способом является применение электромагнитного поля, т. к. это предоставляет широкие возможности для изменения частот и позволяет генерировать модулированное по амплитуде и частоте ЭМП с заданной формой сигналов [4–5].

Применение технических средств для выполнения магнитно-импульсной обработки растений в условиях промышленных плантаций позволит продолжить дальнейшие исследования по изучению влияния низкочастотного магнитного поля на растительные объекты в полевых условиях.

Цель исследований – обоснование параметров автоматизированного агрегата и разработка алгоритма работы автоматического поддержания требуемого значения магнитной индукции в рабочей зоне при выполнении МИО растений в садоводстве.

Для обеспечения качественного облучения растений низкочастотным магнитным полем с помощью автоматизированного агрегата необходимо, чтобы в рабочей зоне при его движении со-

хранялось требуемое значение магнитной индукции.

Обзор литературы

Для воздействия магнитным полем на растения в полевых условиях и выявления эффекта МИО учеными созданы и использованы различные экспериментальные образцы технических средств. Например, механизированная платформа МИО растений разработана ФГБНУ «ВСТИСП», г. Москва (рис. 1).



Р и с. 1. Механизированная платформа для МИО земляники садовой

F i g. 1. Mechanized platform for magnetic pulse processing of strawberry garden

На дополнительной раме велоплатформы в горизонтальной плоскости размещены магнитные индукторы, питание осуществляется от аккумуляторной батареи.

Платформа обладает существенными недостатками, среди которых плохая проходимость, неравномерность хода, невозможность длительной обработки и малая производительность¹.

В 2007–2009 гг. на основе активатора магнитно-импульсной обработки растений (АМИ-3) был разработан и изготовлен мобильный агрегат (МА), устанавливаемый на трактор ВТЗ 2048А, с рабочим органом для об-

¹ Донецких В. И., Упадышев М. Т., Скачков М. В. Действие магнитно-импульсной обработки на продуктивность земляники садовой // Селекция и сорторазведение садовых культур : маг-лы Междунар. науч.-практ. конф., посв. 170-летию ВНИИСПК. Редкол. : Князев С. Д. [и др.]. Орел : ВНИИСПК, 2015. Т. 2. С. 50–52.



лучения растений земляники садовой (рис. 2).



Р и с. 2. Мобильный агрегат
МИО земляники садовой
F i g. 2. Mobile assembly for MPP
of garden strawberry

Агрегат включает раму, систему питания и аппарат МИО с двумя плоскими индукторами (с возможностью перемещения в вертикальной плоскости). Применение агрегата на промышленной плантации земляники обеспечило прирост урожайности земляники, выращиваемой промышленным способом, на 30 % за счет стимуляции им-

пульсным магнитным полем обменных процессов на определенных фазах развития растений [6].

Анализ зарубежных исследований показал, что существуют отдельные разработки, относящиеся к малоэнергоемким и экологически безопасным технологиям для активизации жизненных процессов растений (рис. 3).

Аграрный робот «Bonirob» различает сорняки и культуры при помощи встроенного алгоритма на базе загруженных изображений. Манипулятор подстраивается под сорняки и срезает их².

Рассмотренные образцы технических средств для МИО растений обладают рядом значительных недостатков. Они не адаптируются автоматически к высоте растений и междурядьям; предназначены только для обработки низкорастущих культур горизонтально к почве; не имеют возможности изменения угла наклона рабочих органов (магнитных индукторов) для облучения высокорослых растений; обладают малой производительностью; неспособны поддерживать во время работы заданное расстояние между рабочими



Р и с. 3. Платформа Bonirob Amazone (Германия)
F i g. 3. Bonirob Amazone platform (Germany)

² AMAZONE – Feldrobotik. URL: <http://www.amazone.at/1857.asp>

органами и обрабатываемыми культурами, что в конечном итоге влияет на качество проведения технологической операции.

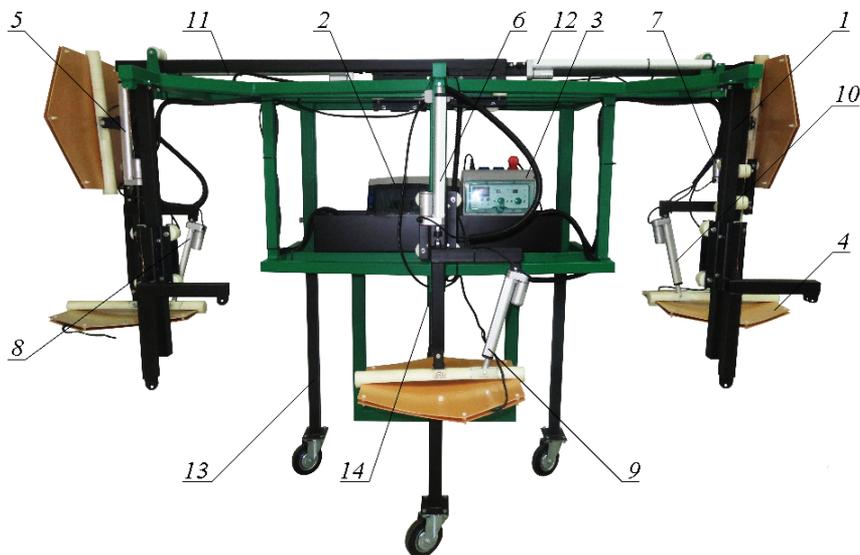
Материалы и методы

С использованием методов математического моделирования, теоретической механики и оптимального проектирования в САПР «КОМПАС-3D» была визуализирована 3D-модель и изготовлен опытный образец автоматизированного агрегата МИО (рис. 4).

В качестве приводов рабочих индукторов агрегата были выбраны электронно-управляемые электроцилиндры, закрепленные на раме³ [7].

Наиболее важными факторами для оценки и подбора линейных приводов агрегата являются создаваемое усилие, полезная нагрузка и скорость перемещения выходного звена (штока актуатора) (рис. 5).

Анализ диаграмм позволяет установить оптимальные параметры электроцилиндров: мощность – 50 Вт, питание – 12 V, ход штока – 200–600 мм, скорость – 10–45 мм/с, нагрузка – 200–900 Н. С такими параметрами электроцилиндры обеспечивают максимальное изменение ширины захвата агрегата до 3,6 м, подъем-опускание рабочих органов массой 50 Н на 300 мм, изменение



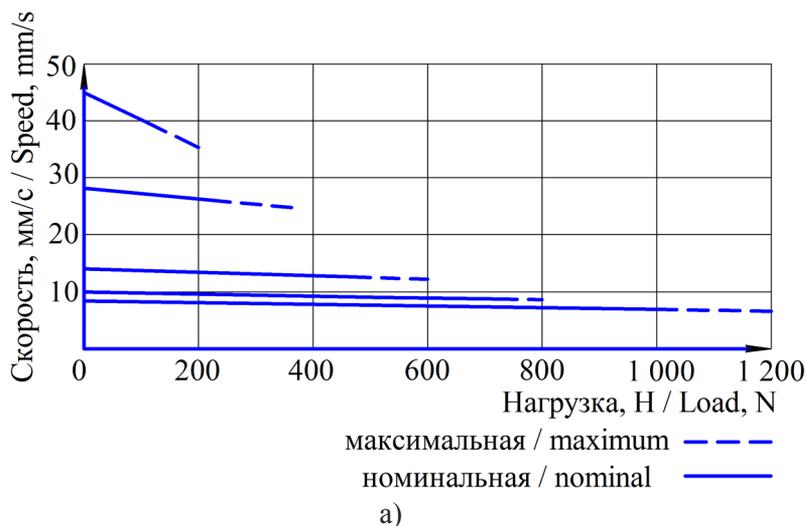
Р и с. 4. Автоматизированный агрегат для МИО растений:

- 1 – рама; 2 – блок управления; 3 – аппарат МИО; 4 – рабочие органы (магнитные индукторы); 5–7 – электроцилиндры поддержания заданного расстояния между индукторами и растениями; 8–10 – электроцилиндры изменения угла наклона; 11–12 – электроцилиндры изменения ширины захвата; 13 – съемные колеса; 14 – крепления к навеске трактора

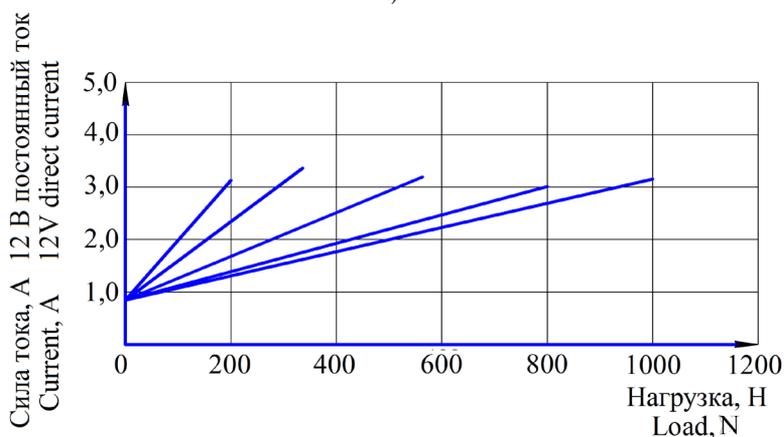
F i g. 4. Automated unit for MPP of plants:

- 1 – frame; 2 – control unit; 3 – MPP apparatus; 4 – working parts (magnetic inductors); 5–7 – electrocylinders for maintaining the given distance between inductors and plants; 8–10 – electrocylinders angle slopes; 11–12 – slat width changing electrocylinders; 13 – removable wheels; 14 – attachments to tractor hitch

³ Кутырёв А. И. Проектирование автоматизированного агрегата магнитно-импульсной обработки садовых растений // Плодоводство и ягодоводство России : сб. науч. раб. 2017. Т. 50. С. 189–195. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30730811>



a)



b)

Р и с. 5. Экспериментальные параметры линейных приводов:
 а) зависимость величины тока от нагрузки, б) зависимость скорости возвратно-поступательного перемещения штока актуатора от нагрузки

Fig. 5. Experimental parameters of linear drives:
 a) dependence of current value on load, b) dependence of reciprocating speed actuator rod on load

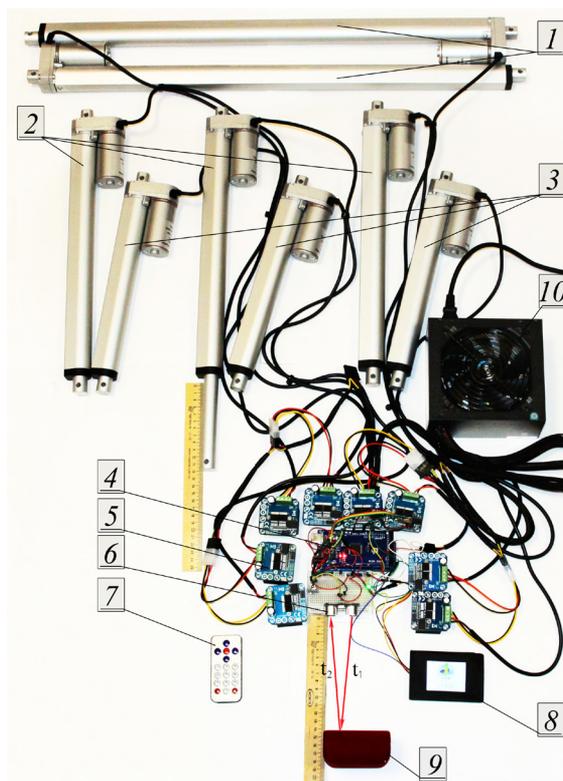
угла наклона индукторов в горизонтальной плоскости до $90^{\circ 4}$.

Исследование и разработка алгоритма работы системы управления положением рабочих органов перемещения штоков актуаторов проведены в лабораторных условиях с использова-

нием программно-аппаратных средств (рис. 6).

Программный код расчета требуемого перемещения штока актуатора разработан в текстовом редакторе Sublime Text. Использован язык программирования C++. Функциональные возмож-

⁴ Кутырёв А. И. Расчет привода рабочего органа автоматизированного агрегата магнитно-импульсной обработки садовых растений // Плодоводство и ягодоводство России : сб. науч. раб. 2017. Т. 50. С. 184–188. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30730810>



Р и с. 6. Программно-аппаратные средства системы автоматического изменения ширины захвата агрегата, поддержания расстояния и угла между индукторами и растениями:
 1 – актуаторы изменения ширины захвата агрегата; 2 – актуаторы поддержания заданного расстояния; 3 – актуаторы изменения угла наклона рабочих органов; 4 – микроконтроллер; 5 – драйверы моторов; 6 – бесконтактный ультразвуковой датчик; 7 – инфракрасный пульт ДУ с IR-приемником; 8 – TFT-экран; 9 – препятствие; 10 – блок питания

F i g. 6. Hardware and software system for automatic change of the width unit, maintaining the distance and angle between the inductors and plants:
 1 – actuators for changing the working width of the unit; 2 – actuators for maintaining the specified distance; 3 – actuators for changing the angle of inclination working elements; 4 – microcontroller; 5 – motor drivers; 6 – non-contact ultrasonic sensor, 7 – infrared remote control with IR receiver; 8 – TFT screen; 9 – obstacle; 10 – power supply

ности программы для ЭВМ связаны с возможностями контроллеров STM32, Arduino Mega/Uno/Nano. Для вывода графической информации и взаимодействия с ней использован экран TFT 320x240, Nextion 2.4.

Результаты исследования

При выполнении МИО растений навесной агрегат с тяговой машиной (мобильный агрегат) движется по плантации с неровностями, величина которых не превышает требования агрофо-

на для обрабатываемой культуры. При наезде МА на неровность положение магнитного индуктора изменяется, что ведет к изменению положения зоны воздействия с необходимыми параметрами для качественного выполнения технологической операции.

При наезде переднего колеса МА на неровность происходит смещение рабочего органа (магнитного индуктора) вниз. Наиболее сильно свое местоположение изменяет максимально удален-



ная от центра поворота точки K задняя часть индуктора – точка D (рис. 7).

Величину смещения точки D можно вычислить по формуле:

$$t_2 = \sin(\alpha)C_2D + \cos(\alpha)t_1.$$

Определив t_2 и зная радиус колеса, можно рассчитать уровень расположения индуктора при наезде переднего колеса трактора на неровность, т. е. расстояние от плоскости индуктора до уровня почвы:

$$t_3 = R - t_2,$$

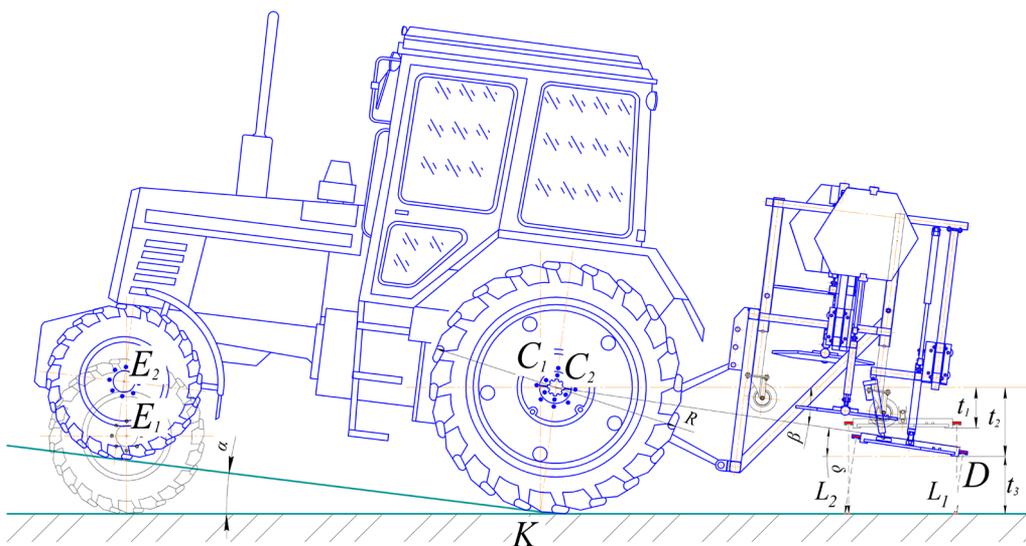
где R – радиус заднего колеса трактора.

В качестве базового был выбран трактор «Беларус-1221». Радиус заднего колеса трактора $R = 460$ мм; угол, образованный с учетом неровностей агрофона, $\alpha = 7^\circ$; расстояние от уровня центра заднего колеса до уровня индуктора $t_1 = 200$ мм; значение

$t_2 = 0,12 \cdot 1467 + 0,75 \cdot 200 = 282,5$ мм. Тогда расстояние $t_3 = 460 - 282,5 = 177,5$ мм. В данном случае значение параметров облучения в зоне обработки значительно изменится и повлияет на рассеивание магнитного поля и, соответственно, на качество выполнения технологической операции.

Для поддержания постоянного значения магнитной индукции в рабочей зоне и качественной обработки растений актуаторы в автоматическом режиме подстраиваются под неровности агрофона и агротехнологические параметры растений с учетом размеров и строения кустов, а также размерных характеристик междурядий и рядков тех или иных сортов.

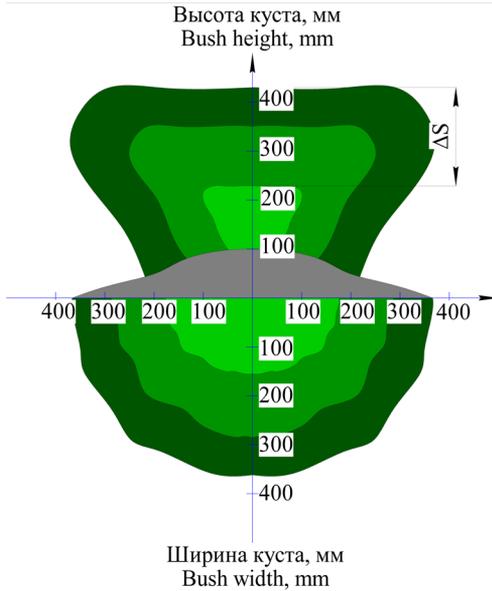
На примере земляники садовой агротехнологическая модель рассчитана на ширину куста 0,34–0,64 м при средней величине 0,459 м (рис. 8). Высота кустов находится в пределах 0,21–0,45 м при среднем значении 0,325 м⁵.



Р и с. 7. Схема изменения уровня расположения магнитного индуктора при наезде переднего колеса мобильного агрегата МИО на неровность

Fig. 7. Scheme of change in level of magnetic inductor when the front wheel mobile unit MPP hits the unevenness

⁵ Брик В. С., Цымбал А. А., Шагин Г. А. Основные размерно-весовые характеристики земляники // Плодоводство и ягодоводство нечерноземной полосы : сб. науч. раб. Вып. 8. М. : НИЗИСНП, 1973. С. 133–140.



Р и с. 8. Агротехнологическая модель куста земляники садовой

F i g. 8. Agro-technological model of a bush of strawberry

В результате проведенных лабораторных исследований разработана блок-схема, описывающая алгоритм работы приводов рабочих органов навесного агрегата МИО (рис. 9) с ультразвуковыми датчиками при выполнении технологической операции с учетом агротехнологической модели куста земляники садовой.

Задав требуемое расстояние до объекта облучения, запускаем цикл, включающий в себя определение текущего расстояния до объекта, расчет изменения дистанции и перемещение штока на требуемое расстояние в зависимости от заданных условий.

При выполнении облучения низкочастотным магнитным полем ультразвуковые датчики измеряют расстояние до объекта, генерируют узконаправленный сигнал на частоте 40 кГц и, дойдя до препятствия в виде растения, улавливают отраженный сигнал (рис. 10).

Расстояние до растения и обратно рассчитывается умножением скорости

распространения звука на время. Звуковая волна проходит расстояние от датчика до объекта и обратно, поэтому при определении расстояния только до объекта результат делится на 2:

$$L = V \cdot E / 2, \quad (1)$$

где L – расстояние до растения, м; V – скорость звука в воздухе, м/с; E – время ожидания эха, с.

Скорость звука в воздухе – величина непостоянная и зависит от температуры:

$$V^2 = \gamma \cdot R \cdot \frac{T}{M}, \quad (2)$$

где γ – показатель адиабаты воздуха, ед.; R – универсальная газовая постоянная (Дж/моль*К); T – абсолютная температура воздуха, К; M – молекулярная масса воздуха, г/моль.

Подставив в формулу известные значения γ , R , M , получим:

$$V \approx 20,042\sqrt{T}. \quad (3)$$

Подставим формулу (3) в (1), переводя L из м в см, E – из с в мкс, T – из К в °С, и получим:

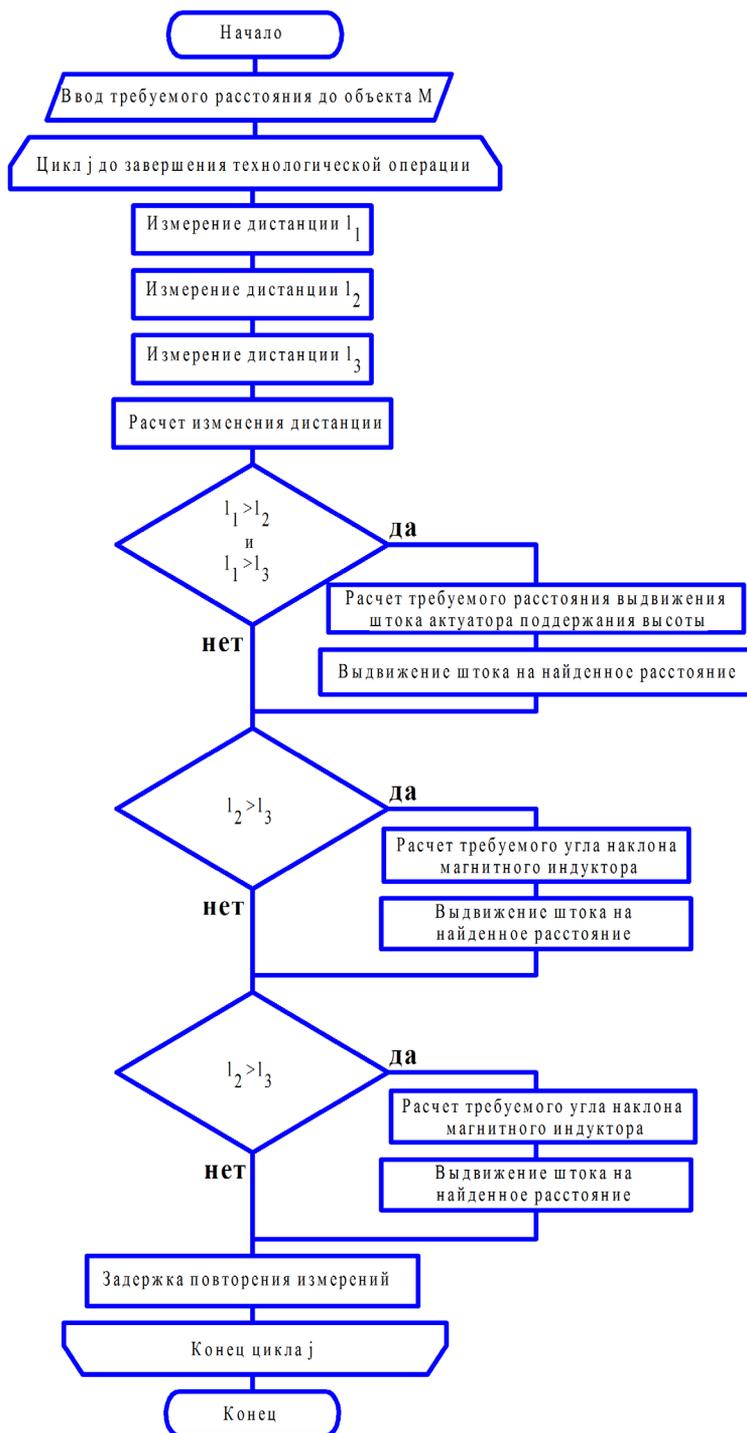
$$L \approx E \sqrt{(t + 273,15) / 1000}, \quad (4)$$

где t – температура, °С.

Показания всех датчиков агрегата, значения максимальных и минимальных высот растений под рабочей площадью индуктора передаются в микроконтроллер, где рассчитывается требуемое перемещение штока актуатора.

Для регулировки угла наклона и высоты индукторов датчики закреплены на рабочих органах и раме агрегата.

Датчики поддержания заданной высоты (B) магнитных индукторов установлены под углом 30°. Актуаторы в зависимости от показаний датчиков получают сигнал от микроконтроллера



Р и с. 9. Блок-схема алгоритма работы приводов рабочих органов автоматизированного агрегата МИО

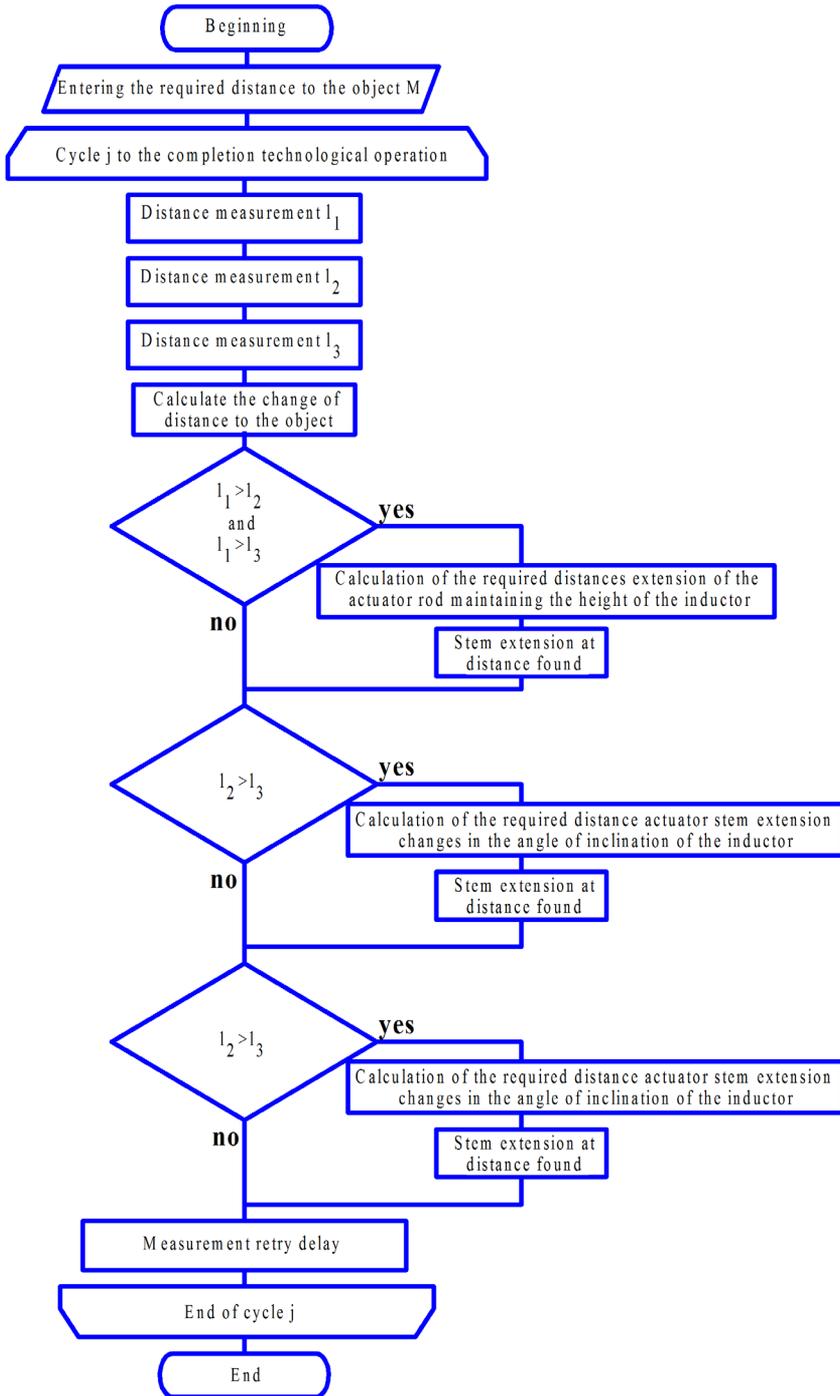
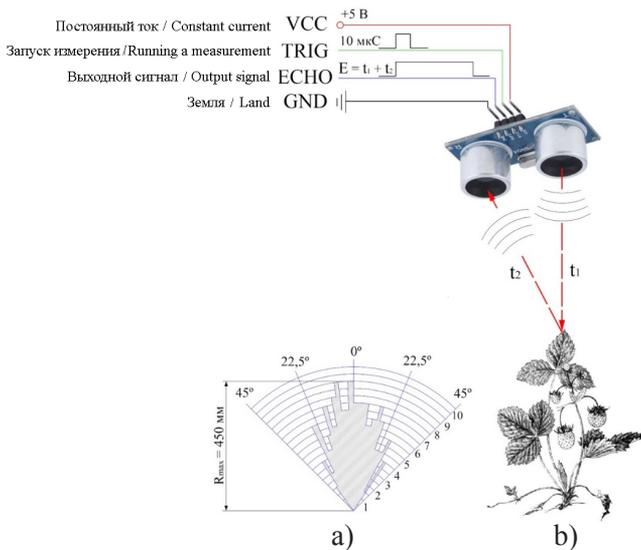


Fig. 9. Flowchart of the algorithm operation actuators of the operating elements of the automated assembly unit MPP

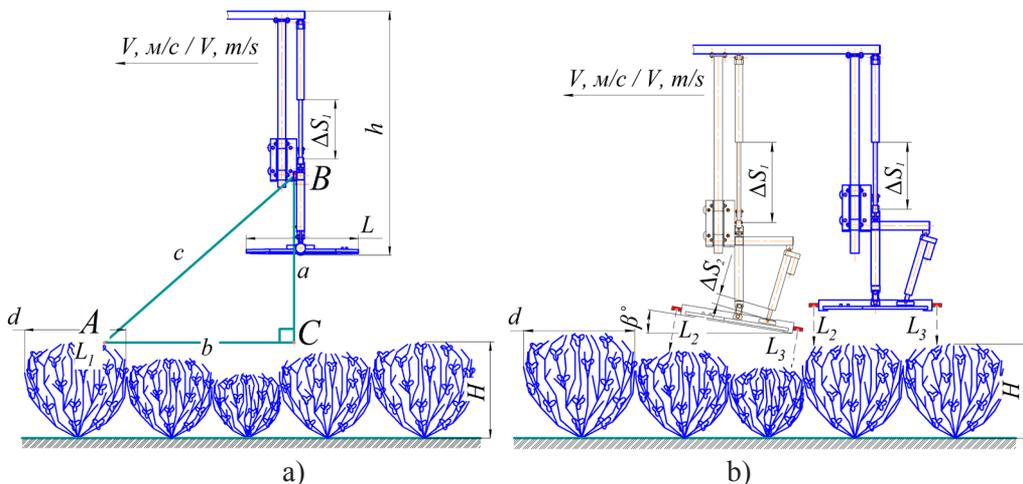


Р и с. 10. Принцип работы ультразвуковых датчиков при облучении растений:
 а) диаграмма направленности излучения датчика; б) определение дистанции до объекта МИО
 F i g. 10. Principle of operation ultrasonic sensors in the performance of technological operation
 irradiation of plants: а) radiation pattern of sensor; б) determination of the distance to MPP object

и перемещают шток на требуемое расстояние, изменяя высоту h .

Задержка времени перемещения штока актуатора изменения высоты h

магнитных индукторов зависит от расстояния b и скорости движения V автоматизированного агрегата с выбранным режимом МИО (рис. 11).



Р и с. 11. Схемы изменения уровня расположения магнитных индукторов:
 а) регулировка высоты магнитных индукторов,
 б) регулировка угла наклона магнитных индукторов

F i g. 11. Schemes of the level of magnetic inductors:
 а) adjustment of height of magnetic inductors,
 б) adjustment of the angle of inclination of magnetic inductors

Расстояние b находится из прямо-угольного треугольника ABC:

$$b = c \cdot \cos(A). \quad (5)$$

Скорость движения агрегата находится по формуле:

$$V = \frac{3,6(L+d)F}{N} \text{ м/с}, \quad (6)$$

где L – длина плоского индуктора рабочего органа в направлении движения агрегата, м; d – диаметр куста растений, м; F – частота следования импульсов магнитной индукции, Гц; N – число воздействующих импульсов магнитной индукции; c – показателя ультразвукового датчика, м.

Отсюда можно определить время задержки подстройки рабочих органов под растения:

$$T = \frac{c \cdot \cos(A) \cdot N}{3,6(L+d)F}, \text{ с}. \quad (7)$$

Требуемое расстояние ΔS_1 и ΔS_2 выдвижения/втягивания штоков актуаторов в теле цикла находится по формулам:

$$\Delta S_1 = c \cdot \sin(A) - M, \text{ мм}; \quad (8)$$

$$\Delta S_2 = L_3 - M, \text{ мм}; \quad (9)$$

где M – требуемое расстояние между растением и магнитным индуктором, мм; L_2, L_3 – измеренное ультразвуковым

датчиком расстояние от поверхности магнитного индуктора до растения, мм; $\sin(A)$ регулируемый угол наклона поворота ультразвукового датчика, град.

Изменение ширины захвата агрегата происходит также с помощью инфракрасного пульта дистанционного управления. Режим работы аппарата МИО (параметры воздействия) выбирается на блоке управления в зависимости от обрабатываемой культуры. Питание блока управления аппарата МИО и системы адаптации осуществляется от инвертора и бортовой сети тяговой машины.

Для управления рабочими органами автоматизированного агрегата разработана программа [8–10]. Фрагмент программного кода расчета требуемого перемещения штока актуатора представлен на рис. 12.

В систему управления агрегатом включены программные модули, обеспечивающие управление рабочими органами как в автоматическом режиме, так и дистанционно. Работа с программой начинается с разблокировки экрана. Далее открывается основная кнопочная форма, на которой выбирается режим работы агрегата:

- 1) ручная настройка;
- 2) выбор культуры (автоматическая).

В ручном режиме настраивается требуемое расстояние до объекта облучения, ширина захвата агрегата, угол наклона рабочих органов.

```

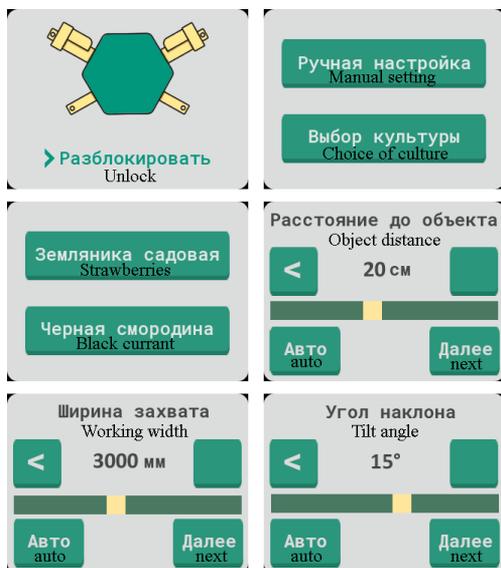
31 //Замер дистанции до объекта // distance measurement
32 distance = sonar.ping_cm();
33
34 //расчёт изменения расстояния // distance calculation
35 distanceDelta = distance - distanceLast;
36
37 //проверяем необходимые условия для перемещения штока актуатора // conditional test
38 if((abs(distanceDelta) > 2) && (distance < 30) && (distance > 5)){
39     //запоминаем текущее расстояние для дальнейших расчётов // remember the current distance
40     distanceLast = distance;
41
42     //вызываем функцию перемещения штока актуатора // actuator travel function
43     motion(distanceDelta);
44 }
    
```

Р и с. 12. Программный код расчета расстояния перемещения штока актуатора
 F i g. 12. The program code for calculating the displacement distance of the actuator rod



Для работы в автоматическом режиме выбирается объект облучения (низкорослое / высокорослое растение), требуемое расстояние до объекта обучения и технология посадки.

Выбор режима работы осуществляется на сенсорном дисплее Nextion 2.4. (рис. 13).



Р и с. 13. Меню выбора режима работы агрегата

F i g. 13. Unit operation mode selection menu

Разработанный алгоритм работы системы управления позволяет накапливать в базе экспериментальных данных информацию о растительных объектах в полевых условиях.

Обсуждение и заключение

Созданный агрегат позволяет внедрить новый экологически безопасный технологический прием стимуляции жизненных и ростовых процессов плодовых культур, а также повысить точность выполнения операции за счет автоматической подстройки к различным агротехнологическим параметрам насаждений, обеспечивая требуемое значение магнитной индукции в рабочей зоне на растительных объектах в полевых условиях.

По результатам полевых экспериментов можно отметить, что наиболее эффективными для стимуляции жизненных процессов вегетирующих частей садовых культур являются следующие режимы агрегата МИО:

- скорость движения $V = 2,5$ км/ч;
- частота импульсов магнитного поля – 15,325 Гц;
- скважность – 16,145;
- значение магнитной индукции в зоне облучения – 5,05 мТл;
- форма магнитных импульсов – прямоугольная;
- направление вектора магнитной индукции – вертикально вниз.

Данные параметры обеспечивают разработанный аппарат МИО [15] с плоской спиральной катушкой апертурой из 48 витков кабеля 1 x 2,5 мм, наружным диаметром 400 мм, внутренним диаметром 30 мм и индуктивностью 373 мкГн. Числовое значение величины индукции магнитного поля на расстоянии 100 мм от центра катушки составляет 5 мТл.

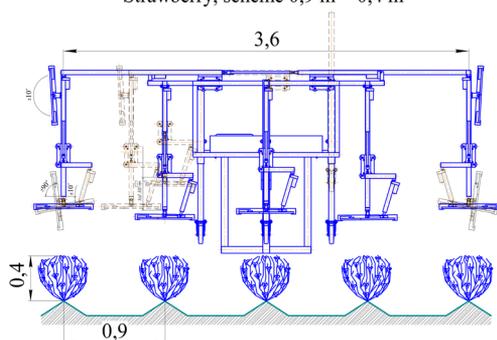
Анализ схем технологического применения агрегата и результатов полевых испытания показал, что регулируемая ширина захвата в пределах 1,4–1,8 м и возможность регулировки наклона рабочих индукторов в диапазонах 0–90° позволяют применять автоматизированный агрегат на посадках земляники садовой с междурядьем 0,8–0,9 м, в садах интенсивного типа с междурядьями 3,0–3,5 м и кустарниковых ягодниках с междурядьями 2,5–3,5 м (рис. 14).

Производительность агрегата на различных типах посадки садовых культур зависит от количества используемых рабочих органов:

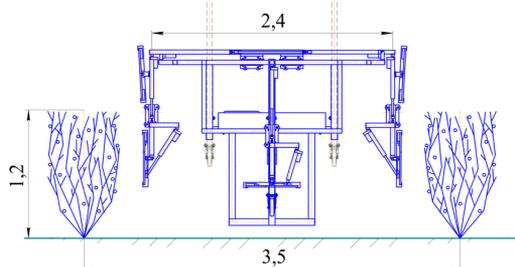
$$W_{\text{см}} = 0,1 \cdot n \cdot B \cdot V \cdot T_{\text{см}} \cdot t_{\text{см}}, \text{ га в смену};$$

где n – количество используемых магнитных индукторов, шт.; B – ширина катушки индуктивности, м; $T_{\text{см}}$ – продолжительность рабочей смены, ч; V – ра-

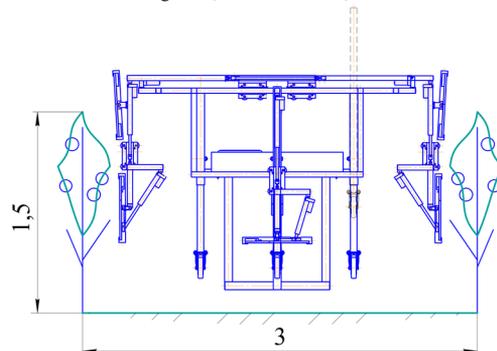
Земляника садовая, схема $0,9 \text{ м} \times 0,4 \text{ м}$
Strawberry, scheme $0,9 \text{ м} \times 0,4 \text{ м}$



Кустарниковые ягодники, схема $3,5 \text{ м} \times 1,2 \text{ м}$
Shrub berry, scheme $3,5 \text{ м} \times 1,2 \text{ м}$



Плодовый сад, схема $3 \text{ м} \times 1,5 \text{ м}$
Fruit garden, scheme $3 \text{ м} \times 1,5 \text{ м}$



Р и с. 14. Конструктивно-технологические схемы работы автоматизированного навесного агрегата МИО в садовых насаждениях

F i g. 14. Structural and technological schemes for MPP operation of automated unit in garden plantations

бочая скорость движения агрегата, км/ч;
 $t_{см}$ коэффициент использования рабочего времени; 0,1 – переводной коэффициент, дающий размерность производительности в гектарах.

На землянике садовой с технологией посадки $0,9 \times 0,4 \text{ м}$ производительность агрегата МИО – 2,8 га в смену; на кустарниковых ягодниках со схемой посадки $3,5 \times 1,2 \text{ м}$ – 2,24 га в смену; в плодовом



**Технико-экономические показатели применяемой
и предлагаемой технологии возделывания земляники садовой**
**Technical and economic indicators of the applied
and proposed technology cultivation of garden strawberry**

Показатели / Indicators	Уход за земляникой садовой с применяемой технологией / Carrying out the operation for care of garden strawberry with the technology used	Уход за земляникой садовой с предлагаемой технологией / Carrying out the operation for care of garden strawberry with the proposed technology
1	2	3
Основная зарплата, руб. / Salary, rub.	230 893,40	231 919,39
Горюче-смазочные материалы, руб. / Combustive-lubricating materials, rub.	24 535,91	27 446,91
Мульчирующий материал, руб. / Mulching material, rub.	50 000,00	50 000,00
Ядохимикаты (всего), руб. / Pesticides (total), rub.	656,90	656,90
Оросительная смесь, руб. / Irrigation mixture, rub.	32 435,00	32 435,00
Амортизация, техническое обслуживание, текущий ремонт, руб. / Amortization, maintenance, current repairs, rub.	16 381,30	19 821,20
Итого прямых затрат, руб / Total direct costs, rub.	354 902,51	362 279,40
Урожайность, ц/га / Productivity, centner/ha	70,50	84,60
Себестоимость 1 ц. ягод, руб. / Cost price of 1 centner of berries, rub.	5 034,08	4 282,26
Цена реализации, руб./ц. / Sales price, rub./centner	13 000,00	13 000,00
Доход, руб./га / Income, rub./ha	916 500,00	1 099 800,00
Прибыль, руб./га / Profit, rub./ha	314 940,25	485 736,41
Рентабельность, % / Profitability, %	52,35	79,10
Стоимость агрегата МИО, руб. / Cost of the MPP unit, rub.	–	223 306,82
Срок окупаемости / Payback period	–	0,46

саду со схемой посадки 3 x 1,5 м – 1,12 га в смену.

Расчет экономической эффективности проведен в сравнении с типовыми картами ухода за садовыми насаждениями⁶⁻⁷. Для примера в таблице представлен расчет материальных затрат на уход за земляникой садовой с использованием агрегата МИО и без него.

Анализ расчетных данных показывает, что срок окупаемости капитальных вложений на приобретение агрегата МИО и его использование на площади 10 га составляет 0,46 года, рентабельность производства увеличивается на 26,75 % за счет повышения до 20 % потенциальной урожайности обработанных низкочастотным магнитным полем садовых культур.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Radhakrishnan R., Kumari B. D. R.** Pulsed magnetic field : a contemporary approach offers to enhance plant growth and yield of soybean // *Plant Physiology and Biochemistry*. 2012. Vol. 51. P. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2011.10.017>
2. **Esitken A., Turan M.** Alternating magnetic field effects on yield and plant nutrient element composition of strawberry (*Fragaria x ananassa* cv. Camarosa) // *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*. 2004. Vol. 54, Issue 3. P 135–139. DOI: <https://doi.org/10.1080/09064710310019748>
3. Магнитно-импульсная обработка семян земляники садовой / А. И. Кутырёв [и др.] // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. № 5. С. 9–15. URL: <http://www.vimsmi.com/jour/article/view/205/161>
4. **Chao L., Walker D. R.** Effects of magnetic field on germination on apple, apricot and peach seed // *HortScience*. 1967. Vol. 2. P. 152–153. URL: <https://www.emf-portal.org/en/article/10312>
5. **Galland P., Pazur A.** Magnetoreception in plants // *International Journal of Plant Research*. 2005. Vol. 118, Issue 6. P. 371–389. URL: https://www.researchgate.net/publication/7485507_Magnetoreception_in_plant
6. **Куликов И. М., Донецких В. И., Упадышев М. Т.** Магнитно-импульсная обработка растений как перспективный прием в технологических процессах садоводства // *Садоводство и виноградарство*. 2015. № 4. С. 45–52. URL: https://www.sadivin.com/jour/article/view/50?locale=ru_RU
7. **Хорт Д. О., Филиппов Р. А., Кутырёв А. И.** Моделирование и анализ конструкции технологического адаптера для магнитно-импульсной обработки растений в садоводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. № 3. С. 29–34. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-3-29-34>
8. Система автоматизированного управления параметрами агрегата магнитно-импульсной обработки растений в садоводстве / А. И. Кутырёв [и др.] // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12, № 1. С. 16–21. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-1-16-21>
9. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Программа автоматизированного управления агрегатом магнитно-импульсной обработки растений / А. И. Кутырёв [и др.]. Заявитель и правообладатель ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (RU). № 2018614946; заявл. 26.01.2018; опубл. 19.04.2018.

⁶ Интенсивная технология производства земляники садовой (методические рекомендации) / И. М. Куликов [и др.]. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. 84 с. URL: https://www.rosinformagrotech.ru/sites/default/files/files/technol_pr_zeml_sad-465.pdf

⁷ Новые технологии и технические средства для механизации работ в садоводстве (методические рекомендации) / И. М. Куликов [и др.]. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2012. 164 с. URL: https://www.rosinformagrotech.ru/sites/default/files/files/technol_teh_sr_meh_rab-284.pdf



10. **Кутырёв А. И., Хорт Д. О., Филиппов Р. А.** Обоснование параметров аппарата для магнитно-импульсной обработки растений // Вестник аграрной науки Дона. 2018. Т. 1, № 41. С. 32–38. URL: http://achga.a.pf/files/vestnik/VD1_2018_41.pdf

Поступила 22.05.2018; принята к публикации 01.10.2018; опубликована онлайн 28.12.2018

Об авторах:

Смирнов Игорь Геннадьевич, ученый секретарь, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат сельскохозяйственных наук, ResearcherID: K-5623-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9992-1261>, vim_sad@mail.ru

Хорт Дмитрий Олегович, заведующий отделом технологий и машин для садоводства, виноградарства и питомниководства, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат сельскохозяйственных наук, ResearcherID: Q-2695-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6503-0065>, vim_sad@mail.ru

Филиппов Ростислав Александрович, ведущий научный сотрудник отдела технологий и машин для садоводства, виноградарства и питомниководства, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат сельскохозяйственных наук, ResearcherID: Q-2722-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3586-3634>, vim_sad@mail.ru

Кутырёв Алексей Игоревич, младший научный сотрудник отдела технологий и машин для садоводства, виноградарства и питомниководства, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ResearcherID: I-3699-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7643-775X>, alexeykutyrev@gmail.com

Артюшин Анатолий Алексеевич, главный научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), доктор технических наук, член-корреспондент РАН, Researcher ID: K-5610-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2182-5274>, vim@vim.ru

Заявленный вклад соавторов:

И. Г. Смирнов – научное руководство, определение методологии исследования, постановка задачи; Д. О. Хорт – сбор и анализ литературных данных, критический анализ, редактирование; Р. А. Филиппов – литературный и патентный анализ, участие в теоретическом исследовании, верстка и редактирование текста; А. И. Кутырёв – подготовка начального текста с последующей доработкой, компьютерное моделирование; А. А. Артюшин – формирование выводов, доработка и редактирование текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Radhakrishnan R., Kumari B. D. R. Pulsed magnetic field: a contemporary approach offers to enhance plant growth and yield of soybean. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2012; 51:139–144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2011.10.017>
2. Esitken A., Turan M. Alternating magnetic field effects on yield and plant nutrient element composition of strawberry (*Fragaria x ananassa* cv. Camarosa). *Acta Agriculturae Scandinavica*. 2004; 54(3):135–139. DOI: <https://doi.org/10.1080/09064710310019748>
3. Kutyrev A. I., Khort D. O., Filippov R. A., Tsench Yu. S. Magnetic-pulse treatment of garden strawberry seeds. *Selskokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machines and Technologies. 2017; 5:9–15. Available at: <http://www.vimsmit.com/jour/article/view/205/161> (In Russ.)
4. Chao L., Walker D. R. Effects of magnetic field on germination on apple, apricot and peach seed. *HortScience*. 1967; 2:152–153. Available at: <https://www.emf-portal.org/en/article/10312>

5. Galland P., Pazur A. Magnetoreception in plants. *International Journal of Plant Research*. 2005; 118(6):371–389. Available at: https://www.researchgate.net/publication/7485507_Magnetoreception_in_plant
6. Kulikov I. M., Donetskikh V. I., Upadyshev M. T. Magnetic impulse treatment of plants as a promising technique in the technological processes of horticulture. *Sadovodstvo i vinogradarstvo = Gardening and Viticulture*. 2015; 4:45–52. Available at: https://www.sadivin.com/jour/article/view/50?locale=ru_RU (In Russ.)
7. Khort D. O., Filippov R. A., Kutyrev A. I. Model-based analysis of construction design of technological adapter for magnetic-pulse processing of plants in horticulture. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machines and Technologies*. 2017; 3:29–34. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-3-29-34> (In Russ.)
8. Kutyrev A. I., Khort D. O., Filippov R. A., Smirnov I. G., Vershinin R. V. System of magnetic-pulse unit parameters automated control for plant treatment in gardening. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machines and Technologies*. 2018; 12(1):16–21. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-1-16-21> (In Russ.)
9. Kutyrev A. I., Khort D. O., Filippov R. A., Smirnov I. G., Izmailov A. Yu. Certificate of registration of the computer program. The program of automated control of the plant of magnetic pulse processing of plants. Applicant and copyright holder: FBBUU FNAC VIM (RU). No. 2018614946; appl. 01/26/2018; publ. 04/19/2018. (In Russ.)
10. Kutyrev A. I., Khort D. O., Filippov R. A. Substantiation of the parameters apparatus for magnetic-pulse treatment of plants. *Vestnik agrarnoy nauki Dona = Bulletin of Agrarian Science of Don*. 2018; 1(41):32–38. Available at: http://achaa.pф/files/vestnik/VD1_2018_41.pdf (In Russ.)

Received 22.05.2018; revised 01.10.2018; published online 28.12.2018

About authors:

Igor G. Smirnov, Scientific Secretary, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Ph.D. (Agriculture), ResearcherID: K-5623-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9992-1261>, vim_sad@mail.ru

Dmitriy O. Khort, Head, Department of Technologies and Machines for Horticulture, Viticulture and Nursery, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Ph.D. (Agriculture), ResearcherID: Q-2695-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6503-0065>, vim_sad@mail.ru

Rostislav A. Filippov, Leading Researcher, Department of Technologies and Machines for Horticulture, Viticulture and Nursery, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Ph.D. (Agriculture), ResearcherID: Q-2722-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3586-3634>, vim_sad@mail.ru

Alexey I. Kutyrev, Junior Researcher, Department of Technologies and Machines for Horticulture, Viticulture and Nursery, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), ResearcherID: I-3699-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7643-775X>, alexeykutyrev@gmail.com

Anatoly A. Artiushin, Chief Researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), D.Sc. (Engineering), Corresponding Member of RAS, Researcher ID: K-5610-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2182-5274>, vim@vim.ru

Contribution of the authors:

I. G. Smirnov – scientific supervision, development of research methodology, formulation of the problem; D. O. Khort – review and critical analysis of relevant literature, editing the article; R. A. Filippov – literature and patent analysis, theoretical study, word processing and text editing; A. I. Kutyrev – preparation of the initial text with further refinement, computer modeling; A. A. Artiushin – drawing the conclusions, revising and editing the text.

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



Информация для авторов и читателей

Научный журнал «Вестник Мордовского университета» публикует оригинальные научные исследования, способствующие развитию науки в области инженерных систем и технологий.

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

01.04.00 Физика

05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление

05.20.00 Процессы и машины агроинженерных систем.

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 «Вестник Мордовского университета» 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 заключения (Conclusions).

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. Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках. Рисунки могут быть представлены в растровом или векторном формате с разрешением не ниже 300 dpi. Они должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. *Все графические данные помещаются в текст статьи, а также высылаются дополнительно в виде отдельных файлов.*

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, Researcher ID, Scopus ID, электронная почта, телефон, почтовый адрес для отправки авторского экземпляра. Приводится на русском и английском языках.

9. **Заявленный вклад соавторов.** В конец рукописи необходимо включить примечания, в которых разъясняется фактический вклад каждого соавтора в выполненную работу. *Приводится на русском и английском языках.*

При подаче статьи в редакцию автор соглашается с положениями прилагаемого лицензионного договора.

Важным этапом в процессе отбора статьи является рецензирование. В журнале «Вестник Мордовского университета» принято «двойное слепое» (рецензент и автор не знают имен друг друга) рецензирование статей. Рецензент на основании анализа статьи принимает решение о рекомендации ее к публикации или о ее отклонении. В случае несогласия автора статьи с замечаниями рецензента его мотивированное заявление рассматривается редакционной коллегией.

Политика редакционной коллегии журнала базируется на современных юридических требованиях в отношении клеветы, авторского права, законности и плагиата, поддерживает Кодекс этики научных публикаций, сформулированный Комитетом по этике научных публикаций, и строится с учетом этических норм работы редакторов и издателей, закрепленных в Кодексе поведения и руководящих принципах наилучшей практики для редактора журнала и Кодексе поведения для издателя журнала, разработанных Комитетом по публикационной этике (COPE).

Допускается свободное воспроизведение материалов журнала в личных целях и свободное использование в информационных, научных, учебных и культурных целях в соответствии со ст. 1273 и 1274 гл. 70 ч. IV Гражданского кодекса РФ. Иные виды использования возможны только после заключения соответствующих письменных соглашений с правообладателем.

Электронные версии статей размещаются на сайте Научной электронной библиотеки. Журнал распространяется по подписке, заявкам высших учебных заведений, учреждений образования и отдельных лиц. Подписной индекс в каталоге агентства «Роспечать» – 70539.

Вдовин Сергей Михайлович – главный редактор. Тел.: +7 (8342) 24-48-88.

Сенин Петр Васильевич – заместитель главного редактора. Тел.: +7 (8342) 23-32-60.

Гордина Светлана Викторовна – ответственный секретарь. Тел.: +7 (8342) 48-14-24.



Information for authors and readers of the journal

“Mordovia University Bulletin” Journal accepts unpublished earlier original research results promoting the development of science in the field of engineering system and technologies. The titles and contents of the journal sections correspond to the fields of science and specialty groups of academic specialists according to the Nomenclature of scientific specialties:

01.04.00 Physics

05.13.00 Computer Science, Computer Engineering and Management

05.20.00 Processes and Machines of Agricultural Engineering Systems

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 Mordovia University Bulletin 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. *All names, signatures and structural elements of graphs, tables, diagrams, etc. should be written in Russian and English.* Figures should be presented in a raster or vector format with a resolution of at least 300 dpi. It should be possible to move them in the text and resize them. All graphic data should be placed in the text of the article and also should be attached as separate files.

5) Conclusions. 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, Researcher ID, Scopus ID, e-mail, phone number, postal address for sending a personal copy of the Journal issue.

Information about the authors should be written in Russian and English.

9. **Contribution of the authors.** At the end of the manuscript, the authors should include notes that explain the actual contribution of each co-author to the work performed.

Contribution of the authors should be written in Russian and English.

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. *Mordovia University Bulletin* journal uses double-blind review, which means that both the reviewer and author identities are concealed from the reviewers, and vice versa. On the basis of the analysis of the article, the reviewer makes a decision whether to recommend the article for publication or reject it. If the author disagrees with the reviewer's comments, their reasoned statement shall be considered by the Editorial Board.

Editorial staff's policy is based on modern legal requirements concerning libel, copyright, legitimacy, plagiarism, ethical principles, kept in community of leading scientific issues publishers. Journal's editorial policy is based upon traditional ethical principles of Russian academic periodicals; it supports Academic Periodicals Ethical Codex, stated by Committee on Publication Ethics (Russia, Moscow) and it is formed in account of standards of ethics of editors' and publishers' work confirmed by Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors and Code of Conduct for Journal Publishers, developed by Committee on Publication Ethics (COPE).

Free reproduction of the Journal's materials for personal purposes and free use for information, scientific, educational and cultural purposes is allowed in accordance with articles 1273 and 1274 of Chapter 70, part 4 of the Civil Code of the Russian Federation. Other types of use are possible only after the conclusion of relevant written agreements with the right holder.

Electronic copies of the journal with full text of the articles in PDF are in free access at the website of Academic Electronic Library. The Journal is distributed on the basis of a subscription, requests of higher education institutions, educational institutions and individuals. The subscription index in the catalogue of the agency of Rospechat is 70539.

Sergey M. Vdovin – Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 244888.

Petr V. Senin – Deputy Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 233260.

Svetlana V. Gordina – Executive Editor. Tel.: +7 (8342) 481424.



Редактор – *С. А. Сечнев*

Перевод *С. В. Голованова, Н. Н. Плеханковой*

Компьютерная верстка *Е. П. Гординой*

Информационная поддержка *Р. В. Карасева*

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Подписано в печать 07.12.2018 г. Дата выхода в свет 28.12.2018 г.

Формат 70 × 100^{1/16}. Усл. печ. л. 14,95.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 250 экз. Заказ № 2015. 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 07.12.2018. Date of publishing 28.12.2018.

Sheet size $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Conventional printed sheets 14,95.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 250 copies. Order no. 2015. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)