

DOI: 10.15507/0236-2910.028.201802 ISSN 0236-2910 (Print), 2313-0636 (Online)

Том 28, № 2. 2018

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



Vol. 28, no. 2. 2018

SCHOLARLY 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](mailto:vestnik_mrsu@mail.ru); **http://**[vestnik.mrsu.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 в Web of Science Core Collection (ESCI),  
Российском индексе научного цитирования (РИНЦ),  
а также EBSCO, Index Copernicus 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 (Роскомнадзоре),  
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. Большевикская, д. 68/1  
Телефон, факс: +7 (8342) 48-14-24

**Founder, Publisher and Editorial House address:**  
68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005,  
Republic of Mordovia, Russia  
Phone, fax: +7 (8342) 48-14-24

© ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», 2018

### Научный журнал «Вестник Мордовского университета»

принимает не опубликованные ранее научные статьи и дискуссионные материалы научного характера кандидатов и докторов наук, преподавателей, аспирантов и студентов старших курсов (в соавторстве).

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

Журнал осуществляет научное рецензирование (двустороннее слепое) всех поступающих в редакцию материалов 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 авторам представленных материалов копии рецензий или мотивированный отказ.

Редакция журнала направляет копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении соответствующего запроса.

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





### **“Mordovia University Bulletin” journal**

accepts scholarly articles and debatable academic materials not published before from holders of the following degrees: Ph.D., D.Sc., lecturer, postgraduate student and senior student (co-authored).

The titles and contents of the journal sections correspond to fields of science and specialty groups of scientists, 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 Argoengineering Systems

All reviewers are acknowledged experts in the areas they are responsible for. Reviews are stored in the publishing house and publishing office during 5 years.

Editorial staff sends to the authors of the received materials copies of reviews or a substantiated refusal.

Editorial staff of the journal forwards copies of reviews in Ministry of Education and Science of the Russian Federation by request.

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 ID: 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 ID: 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 ID: 0000-0001-6281-9714, margulisva@mrsu.ru (Саранск, Россия)

**Гордина Светлана Викторовна** – *ответственный секретарь*, кандидат педагогических наук, ORCID ID: 0000-0003-2265-418X, vestnik\_mrsu@mail.ru (Саранск, Россия)

**Аллахвердиев Сурхай Рагим оглы** – академик Российской Академии Естествознания, профессор кафедры лесной индустрии, Бартынский государственный университет, профессор кафедры экологии и природопользования, ФГБОУ ВО «Московский педагогический государственный университет», доктор биологических наук, профессор (Бартын, Турция)

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

**Дианов Евгений Михайлович** – академик Российской академии наук, директор ФГБУН «Научный центр волоконной оптики Российской академии наук», доктор физико-математических наук, профессор, ORCID ID: 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 ID: 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)

**Калашников Владимир Иванович** – заведующий кафедрой технологии строительных материалов и деревообработки, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», доктор технических наук, профессор, ORCID ID: 0000-0002-1979-4678 (Пенза, Россия)

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

**Котин Александр Владимирович** – заведующий кафедрой механизации переработки сельскохозяйственной продукции, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор технических наук, профессор, ORCID ID: 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 ID: 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 ID: 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 ID: 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 ID: 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 ID: 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 ID: 0000-0001-6281-9714, margulisva@mrsu.ru (Saransk, Russia)
- Svetlana V. Gordina** – *Executive Editor*, Ph.D. (Pedagogy), ORCID ID: 0000-0003-2265-418X, vestnik\_mrsu@mail.ru (Saransk, Russia)
- Surhay Allahverdi** – Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Head of Forest Industry Chair, Bartin University, Professor of Ecology and Nature Management Chair, Moscow Pedagogical State University, D.Sc. (Biology), Professor (Bartın, Turkey)
- Aleksey G. Bulgakov** – Professor of Faculty of Architecture, Dresden University of Technology, D.Sc. (Engineering), Professor (Dresden, Germany)
- Ivan I. Chuchayev** – Dean of Mathematics and Information Technology Faculty, National Research Mordovia State University, Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor (Saransk, Russia)
- Yevgeniy M. Dianov** – Academician of the Russian Academy of Sciences, Director of Fiber Optics Research Center, Russian Academy of Sciences, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, ORCID ID: 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 ID: 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 I. Kalashnikov** – Head of Construction Material Technology and Woodwork Chair, Penza State University of Architecture and Construction, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID ID: 0000-0002-1979-4678 (Penza, 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 ID: 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 ID: 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 ID: 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 ID: 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

### ФИЗИКА

<b>Побединский В. В., Газизов А. М., Санников С. П., Побединский А. А.</b> Диэлектрическая проницаемость лесного фонда в зависимости от параметров среды при радиочастотном мониторинге.....	148
<b>Егерев Э. Н., Егерев А. Ю., Зубов А. О.</b> Поперечные колебательные движения в вязкой жидкости, контактирующей с пористой средой.....	164

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<b>Аль-Салаймех С., Мигдади А.</b> Структурирование организационно-технологической системы управления логистикой.....	175
<b>Чугунов М. В., Полунина И. Н.</b> Междисциплинарное моделирование роботов с использованием систем автоматизированного проектирования.....	181
<b>Тарасов Е. М., Герус В. Л., Тарасова А. Е.</b> Исследование информативности признаков при распознавании состояний рельсовых линий.....	191

### ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

<b>Измайлов А. Ю., Лобачевский Я. П., Федотов А. В., Григорьев В. С., Ценч Ю. С.</b> Адсорбционно-окислительная технология переработки сточных вод предприятий агропромышленного комплекса.....	207
<b>Комаров В. А.</b> Исследование предприятий технического сервиса для обеспечения показателей надежности машин (на примере агропромышленного комплекса Республики Мордовия).....	222
<b>Димитров В. П., Борисова Л. В., Тугенгольд А. К., Нурутдинова И. Н.</b> Технологическая настройка сельскохозяйственных машин на основе нечеткой логики.....	239
<b>Байков Д. В., Иншаков А. П., Федотов Ю. Б.</b> Обкаточно-тормозной стенд двигателя внутреннего сгорания на базе асинхронного электропривода с рекуперативным преобразователем частоты.....	255
<b>Рудик Ф. Я., Загородских Б. П., Моргунова Н. Л., Кодацкий Ю. А.</b> Совершенствование технологии переработки сои с использованием ультразвука.....	266
<i>Информация для авторов и читателей (на рус. яз.).....</i>	287
<i>Информация для авторов и читателей (на англ. яз.).....</i>	289



## CONTENTS

### PHYSICS

<b>Pobedinsky V. V., Gazizov A. M., Sannikov S. P., Pobedinskiy A. A.</b> Dielectric Permeability of Forestry Depending on Environmental Parameters in Radio Frequency Monitoring.....	148
<b>Egereva E. N., Egerev A. Yu., Zubov A. O.</b> Transverse Oscillatory Motion in Viscous Fluid in Contact with Porous Medium.....	164

### COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

<b>Al Salaimh S., Miqdadi A.</b> Structuring of Logistics Management Organizational-Technological System.....	175
<b>Chugunov M. V., Polunina I. N.</b> Interdisciplinary Modelling of Robots Using CAD/CAE Technology.....	181
<b>Tarasov E. M., Gerus V. L., Tarasova A. E.</b> Study of Informative Value of Features in Rail Condition Monitoring.....	191

### PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

<b>Izmaylov A. Yu., Lobachevskiy Ya. P., Fedotov, A. V., Grigoryev V. S., Tsench Yu. S.</b> Adsorption-Oxidation Technology of Wastewater Recycling in Agroindustrial Complex Enterprises.....	207
<b>Komarov V. A.</b> Research of Technical Service Enterprises for Promoting Equipment Reliability (Case Study of Agro-Industrial Complex of the Republic of Mordovia).....	222
<b>Dimitrov V. P., Borisova L. V., Tugengold A. K., Nurutdinova I. N.</b> Technological Adjustment of Agricultural Machines Based on Fuzzy Logic.....	239
<b>Baykov D. V., Inshakov A. P., Fedotov Yu. B.</b> Rolling-Brake Stand of Internal Combustion Engine Based on Asynchronous Electric Drive with Recuperative Frequency Converter.....	255
<b>Rudik F. Ya., Zagorodskih B. P., Morgunova N. L., Kodatsky Yu. A.</b> Improving Soybean Processing Using Ultrasound.....	266
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in Russian).....</i>	287
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in English).....</i>	289

## ФИЗИКА / PHYSICS

УДК 630\*181.21

DOI: 10.15507/0236-2910.028.201802.148-163



### Диэлектрическая проницаемость лесного фонда в зависимости от параметров среды при радиочастотном мониторинге

**В. В. Побединский<sup>1\*</sup>, А. М. Газизов<sup>2</sup>, С. П. Санников<sup>1</sup>,  
А. А. Побединский<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (г. Екатеринбург, Россия)

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Россия)

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья» (г. Тюмень, Россия)

\*pobed@el.ru

*Введение.* Рассмотрена проблема мониторинга лесного фонда. Актуальность исследований обусловлена необходимостью совершенствования системы лесоуправления и лесопользования на базе современных информационных технологий. Самый эффективный решением является использование радиочастотного мониторинга лесного фонда с помощью сети радиочастотных (RFID) устройств. Такая система позволяет оперативно отслеживать перемещения лесосырьевых потоков с точностью до одного бревна, выявлять лесные пожары в самом начале задымления и выполнять многие другие функции. Одним из необходимых параметров функционирования и проектирования системы является комплексная диэлектрическая проницаемость, получить которую традиционными статистическими методами не представляется возможным. Таким образом, цель исследования – получение функциональной зависимости диэлектрической проницаемости от параметров лесной среды на основе нечеткого вывода.

*Материалы и методы.* Методологическую основу теоретических исследований составили положения математического и нечеткого моделирования, а в части выполнения экспериментальных исследований по апробации системы радиочастотного мониторинга и проверки адекватности предложенной нечеткой модели использовались методы лесной таксации, процессов лесозаготовок, теории информации и передачи сигналов, математической статистики, теории эксперимента. Синтез нечеткой модели был выполнен средствами Fuzzy Logic Toolbox приложения MATLAB.

*Результаты исследования.* Была получена зависимость диэлектрической проницаемости от параметров лесной среды на основе нечеткого вывода. Формально суммарная комплексная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_k$  участка лесной среды (полога) и значения входных величин определяются следующим образом:  $\epsilon_k = f(V_i, \alpha)$ , где  $V_i$  – объемная доля  $i$ -го компонента лесной среды (в реальных условиях, по данным эксперимента, – от 0 до 0,5);  $\alpha$  – константа, учитывающая вид лесного массива (от 0 до 0,5 – открытый участок; от 0,5 до 1,5 – сосновый бор стандартной высоты 25 м; от 1,5 до 2,5 – смешанный лес; от 3,5 до 4,5 – березовая роща; от 4,5 до 5,0 – ельник). Главное отличие предложенного подхода заключается в дискретном представлении лесной среды как суммы элементов леса. Только такой подход обеспечивает точное измерение диэлектрической проницаемости лесной среды.



*Обсуждение и заключения.* В статье впервые предложен теоретический подход к оценке параметров лесной среды, представленной дискретно, а диэлектрическая проницаемость определена на основе нечеткого моделирования. Практическая применимость результатов заключается в возможности создания структуры информационного обеспечения автоматизированной системы лесоуправления и лесопользования на базе мониторинга лесного фонда. Предложенная функция диэлектрической проницаемости участка леса учитывает основные параметры лесной среды и является достаточно корректной. Она необходима для проектирования систем радиочастотного мониторинга лесного фонда и позволяет реализовать принципиально новый подход к решению задач мониторинга лесного фонда.

**Ключевые слова:** радиочастотный мониторинг, лесной фонд, диэлектрическая проницаемость, комплексная диэлектрическая проницаемость, нечеткое моделирование, нечеткий вывод

*Для цитирования:* Диэлектрическая проницаемость лесного фонда в зависимости от параметров среды при радиочастотном мониторинге / В. В. Побединский [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 2. С. 148–163. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.148-163>

## Dielectric Permeability of Forestry Depending on Environmental Parameters in Radio Frequency Monitoring

V. V. Pobedinsky<sup>1\*</sup>, A. M. Gazizov<sup>2</sup>, S. P. Sannikov<sup>1</sup>,  
A. A. Pobedinskiy<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ural State Forestry University (Ekaterinburg, Russia)

<sup>2</sup>Ufa State Oil Technical University (Ufa, Russia)

<sup>3</sup>State Agrarian University of the Northern Trans-Urals (Tyumen, Russia)

\*[pobed@el.ru](mailto:pobed@el.ru)

*Introduction.* New approach to forestry monitoring is presented. The relevance of the study is caused by the need to improve the forest management system based of modern information technologies. The paper demonstrates radio frequency monitoring as a most effective solution using a network of radio-frequency devices. This system quickly tracks the movement of forest resources, detect forest fires at the beginning of smoke and perform other functions. Complex dielectric permittivity is one of the main parameters for the design and operation of the system. The usual statistical methods do not allow obtaining such permeability. Thus, the aim of the study is to find a functional dependence of the permittivity on the parameters of the forest environment based on fuzzy inference.

*Materials and Methods.* Mathematical and fuzzy modeling are methods of theoretical research in this paper. In addition, methods of forest inventory and logging processes, information theory and signaling, mathematical statistics, and experimental theory were used to perform experimental studies on approbation of a radio frequency monitoring system and to verify the adequacy of the proposed fuzzy model. We used Fuzzy Logic Toolbox software with MatLab technical computing software as a tool for synthesis.

*Results.* The dependence of the permittivity on the parameters of the forest environment based on fuzzy inference was obtained. Formally, the total complex dielectric constant  $\epsilon_k$  of the forest area (canopy) and the values of the input quantities are determined as follows:  $\epsilon_k = f(V_i, \alpha)$ , where  $V_i$  – volume fraction of  $i$  component of the forest environment (in real conditions, according to experimental data, is from 0 to 0,5);  $\alpha$  – constant, taking into account the type of forest (from 0 to 0,5 – open area; from 0,5 to 1,5 – pine forest of standard height 25 m; from 1,5 to 2,5 – mixed forest; from 3,5 to 4,5 – birch grove; from 4,5 to 5,0 – spruce forest). A feature of the proposed approach is a discrete representation

of the forest environment as a sum of forest elements. This approach provides an accurate measure of the permittivity of the forest environment.

*Conclusions.* The practical significance of the results lies in the possibility of creating an information support structure for an automated forest management system based on forestry monitoring. The proposed function of the permittivity of the forest area takes into account the main parameters of the forest environment, so it is sufficiently correct. This function is necessary for the design of radio frequency monitoring systems of forestry and allows us to implement a fundamentally new approach to solving the tasks of forest fund monitoring.

*Keywords:* radio frequency monitoring, forestry, forest, permittivity, complex dielectric permittivity, fuzzy modeling, fuzzy output

*For citation:* Pobedinsky V. V., Gazizov A. M., Sannikov S. P., Pobedinskiy A. A. Dielectric Permeability of Forestry Depending on Environmental Parameters in Radio Frequency Monitoring. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(2):148–163. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.148-163>

## Введение

Проблемы сохранения и использования лесов в настоящее время приобретают для лесной отрасли промышленности первостепенное значение. Во многом они определяются недостаточной эффективностью и комплексностью использования заготавливаемой древесины вследствие недостатков организационно-технологических и технических мероприятий, низкого уровня использования лиственной древесины (из-за ограниченного спроса) и ряда других факторов. В целом перечисленное относится к области лесоуправления, в частности, контролю состояния лесного фонда, в т. ч. движения сырьевых потоков.

Данные мониторинга являются основой для принятия решений в процессах лесоуправления и лесопользования. Но отсутствие должного контроля перемещения лесоматериалов с мест рубок приводит к невозможности учета объемов заготавливаемой древесины, фондов, соблюдения правил рубок, ухода за лесом и практически к стихийному лесопользованию и хищениям.

В управлении лесами Россия имеет большой исторический опыт, но в но-

вых социально-экономических условиях, а также при распространении природных и техногенных катастроф существующие подходы к лесоуправлению требуют совершенствования. Эта тенденция нашла законодательную поддержку на правительственном уровне<sup>1</sup>, где в числе мероприятий по совершенствованию системы федерального государственного лесного надзора (лесной охраны) и федерального государственного пожарного надзора в лесах указаны меры по созданию новых дистанционных систем наземного, авиационного и космического мониторинга пожарной опасности, защите от незаконных рубок и использованию инновационных информационных технологий.

Так, в ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» была разработана подобная система, не имеющая аналогов в мировой практике [1–2], что подтверждено патентом Российской Федерации<sup>2</sup>. Данная система непрерывного радиочастотного мониторинга лесного фонда использует в качестве одного из основных входных параметров значение комплексной диэлектрической проницаемости

<sup>1</sup> Основы государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года / Правительство Российской Федерации. Распоряжение № 1724-р от 26 сентября 2013 г.

<sup>2</sup> Патент 2492891 Российская Федерация, МПК А62С 37/00 (2006/01). Система обнаружения лесного пожара / В. Г. Лисенко, С. П. Санников; заявл. 26.04.2012, опубл. 20.09.13, бюл. № 26. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/249/2492891.html>



участка леса на пути распространения радиоволны. В первую очередь такая величина зависит от параметров среды, но в реальных условиях лесная среда характеризуется не статистическими параметрами, как это общепринято в научных исследованиях, а свойствами неопределенности. Следовательно, получить функцию диэлектрической проницаемости в зависимости от множества параметров статистическими методами, требующих огромного объема статистических и экспериментальных данных, не представляется возможным и математически корректным. Для таких условий предназначен аппарат теории нечетких множеств (ТНМ) и его приложение нечеткое моделирование, которые показали свою эффективность в решении широчайшего класса задач во многих отраслях науки и производства. В настоящих исследованиях предварительно были получены определенные экспериментальные результаты<sup>3</sup>, но для вывода статистических функций этого недостаточно.

Цель исследований – получить функциональную зависимость комплексной диэлектрической проницаемости участка леса при радиочастотном мониторинге от параметров лесной среды на основе нечеткого моделирования.

Разработка модели предусматривала решение следующих задач.

1. Выполнение содержательной постановки задачи нечеткого моделирования комплексной диэлектрической проницаемости.

2. Определение нечетких функций принадлежности для входных и выход-

ных переменных задачи (приведение к нечеткости).

3. Разработка базы правил нечеткой продукции.

4. Синтез нечеткой модели зависимости комплексной диэлектрической проницаемости от входных параметров средствами Fuzzy Logic Toolbox приложения MATLAB.

### Обзор литературы

Множество публикаций российских авторов посвящено использованию ТНМ в задачах моделирования различных процессов, но особенно большой опыт по этой теме накоплен в зарубежных изданиях.

Так, в российских исследованиях наиболее значимой в практическом плане является работа А. В. Леоненкова<sup>4</sup>, где изложены теоретические основы ТНМ, подробно рассмотрены примеры нечеткого моделирования, даны базовые знания работы в системе FuzzyTECH.

В работе В. И. Васильева, Б. Г. Ильясова<sup>5</sup> рассмотрены вопросы создания интеллектуальных систем для управления летательными аппаратами. Изложены методики разработки интеллектуальных систем на основе нечеткой логики.

Ученые С. Штовба, А. Ротштейн, О. Панкевич [3] применили нечеткую логику для оценки технического состояния строительных бетонных конструкций.

Профессор Варшавского университета А. Пегат<sup>6</sup> изложил фундаментальные обобщающие исследования по рассматриваемой теме. Несмотря на обширный теоретический материал, работа имеет практическую значимость и освещает методики выполнения не-

<sup>3</sup> Санников С. П., Серебренников М. Ю. Влияние леса на распространение радиочастотного сигнала RFID метки // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России : мат-лы IX Всерос. науч.-техн. конф. студ. и аспирантов. Екб. : Изд-во УГЛТУ, 2013. Ч. 2. С. 87–90.

<sup>4</sup> Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH. СПб. : БХВ-Петербург, 2005. 736 с. URL: <http://bwbooks.net/index.php?id1=4&category=comp-lit&author=leolenkov-av&book=2005>

<sup>5</sup> Васильев В. И., Ильясов Б. Г. Интеллектуальные системы управления: теория и практика : учеб. пособие. М. : Радиотехника, 2009. 392 с. URL: <https://www.twirpx.com/file/931617>

<sup>6</sup> Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / Пер. с англ. М. : Бином. Лаборатория знаний, 2009. 798 с. URL: [http://window.edu.ru/resource/324/65324/files/Pegat\\_978-5-94774-353-1/1-2-3\\_cB353-1.pdf](http://window.edu.ru/resource/324/65324/files/Pegat_978-5-94774-353-1/1-2-3_cB353-1.pdf)

четкого вывода, нечеткого моделирования и нечеткого управления. Особенно ценной и даже уникальной можно считать предложенную методику проверки на устойчивость нечетких регуляторов.

Среди зарубежных исследований следует отметить Л. А. Заде, который является основоположником теории ТНМ и разработчиком других ее положений [4–5]. Также известны как создатели ряда прикладных методов использования ТНМ Е. Х. Мамдани [6], Т. Такаги, М. Сугено [7].

До настоящего времени за рубежом наблюдается творческий бум в развитии ТНМ, который охватывает не только прикладные исследования, но и математический аппарат учета нечеткости, неопределенности и других аспектов этого понятия [8–10].

Известно большое количество работ по нечеткому моделированию технических объектов, например [11–13]. Однако следует отметить, что одним из отличий зарубежных исследований от российских является значительно большее количество публикаций по различным гуманитарным направлениям использования ТНМ [14–16], в юриспруденции [17], экономике [18] и, что может быть особенно ценно и перспективно, медицинских науках [19–21].

Вопросы исследования свойств лесной среды на основе нечеткого моделирования ранее не рассматривались.

### Материалы и методы

Методологическую основу теоретических исследований составили положения математического и нечеткого моделирования, а в части выполнения экспериментальных исследований по апробации системы радиочастотного мониторинга и проверки адекватности

предложенной нечеткой модели использовались методы лесной таксации, процессов лесозаготовок, теории информации и передачи сигналов, математической статистики, теории эксперимента.

Для практической реализации нечетких моделей в основном используется система компьютерной математики MATLAB<sup>7</sup>, которая располагает средствами для этой цели: приложениями Fuzzy Logic Toolbox, FIS Editor, системами имитационного моделирования Simulink.

Разработка нечеткого вывода функции выполнялась по известной методике<sup>8–10</sup> [3] в последовательности, приведенной ниже. Данная методика нечеткого вывода использовалась авторами ранее для решения другой задачи [22].

### Результаты исследования

#### 1. Содержательная постановка задачи моделирования диэлектрической проницаемости участка леса

В известной методике содержательная постановка задачи используется для того, чтобы представить данные об основных параметрах лесного фонда в форме определенных эвристических правил, моделирующих диэлектрическую проницаемость участка леса. Выполняется описание поведения или состояния объекта и его диэлектрической проницаемости в зависимости от сочетания основных влияющих на него параметров. В данном случае эта процедура осуществляется одновременно с формированием базы основных правил системы нечеткого вывода, а в содержательном описании задачи определяются наиболее специфические особенности моделирования диэлектрической проницаемости.

<sup>7</sup> MATLAB® & Simulink® release notes for R2008a. URL: <http://www.mathworks.com>

<sup>8</sup> Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH. СПб. : БХВ-Петербург, 2005. 736 с. URL: <http://bwbooks.net/index.php?id1=4&category=comp-lit&author=leonenkovav&book=2005>

<sup>9</sup> Васильев В. И., Ильясов Б. Г. Интеллектуальные системы управления: теория и практика : учеб. пособие. М. : Радиотехника, 2009. 392 с. URL: <https://www.twirpx.com/file/931617>

<sup>10</sup> MATLAB® & Simulink® release notes for R2008a. URL: <http://www.mathworks.com>



В первую очередь рассмотрим свойства лесной среды (породный состав, плотность насаждений, полноту деревьев), которые влияют на величину диэлектрической проницаемости. Предположим, что другие влияющие параметры (влажность, температура воздуха, конструктивные параметры сети радиочастотных устройств, рабочая частота) постоянны.

Итак, полнота лесонасаждений может быть выражена нормированной величиной 0 до 1. Следует учесть, что сеть мониторинга должна реагировать на рубки и перемещение древесины любого объема от одного дерева. Поэтому для удобства в данном случае обозначим ее величиной объемной доли компонента лесной среды, также в нормированном виде.

Диэлектрическая проницаемость находится в прямо пропорциональной зависимости от объемной доли компонента, поскольку с увеличением полноты регистрируемого ствола диэлектрическая проницаемость среды увеличивается. Другими словами, при минимальной объемной доле компонента диэлектрическая проницаемость при прочих равных условиях будет минимальной и наоборот. Выражается это комплексной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_k$ , обусловленной неоднородностью среды и определяемой как сумма значений параметров отдельных компонентов леса:

$$\epsilon_k = \sum V_i \epsilon_i$$

где  $V_i$  – объемная доля  $i$ -го компонента лесной среды;  $\alpha$  – константа, учитывающая вид лесного массива (полога);  $\epsilon_i$  – комплексная диэлектрическая проницаемость отдельного компонента лесной среды.

Оценку породного состава и одновременно плотности насаждений воз-

можно выполнить также с использованием нормированной величины в виде коэффициентов (констант), а для учета многообразия этих сочетаний можно выделить соответствующие диапазоны коэффициентов. Влияние данного параметра обратно пропорциональное, т. е. при увеличении константы, учитывающей вид лесного массива (породный состав, плотность насаждений и др.) диэлектрическая проницаемость среды уменьшается, при этом увеличивается коэффициент затухания (мнимая часть в формуле комплексной диэлектрической проницаемости лесной среды).

Для дальнейшей постановки задачи необходимо определить нечеткие функции принадлежности и базу правил нечеткой продукции.

*2. Определение нечетких функций принадлежности для входных и выходных переменных задачи (приведение к нечеткости)*

Запишем формулу суммарной комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_k$  участка лесной среды (полога) и значения входных величин в следующем виде:

$$\epsilon_k = f(V_i, \alpha),$$

где  $V_i$  – объемная доля  $i$ -го компонента лесной среды, изменяется от 0 до 1 (в реальных условиях, по данным эксперимента – от 0 до 0,5);  $\alpha$  – константа, учитывающая вид лесного массива (от 0 до 0,5 – открытый участок; от 0,5 до 1,5 – сосновый бор стандартной высоты 25 м; от 1,5 до 2,5 – смешанный лес; от 3,5 до 4,5 – березовая роща; от 4,5 до 5,0 – ельник).

Предварительные экспериментальные исследования<sup>11</sup> показали, что величина комплексной диэлектрической проницаемости для частоты 865 МГц имеет следующие значения:  $\epsilon_{\text{ель}} =$  от 14 до 56 Ф/м,  $\epsilon_{\text{сосна}} =$  от 11 до 50 Ф/м; для

<sup>11</sup> Санников С. П., Серебренников М. Ю. Влияние леса на распространение радиочастотного сигнала RFID метки // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России : мат-лы IX Всерос. науч.-техн. конф. студ. и аспирантов. Екб. : Изд-во УГЛУ, 2013. Ч. 2. С. 87–90.

частоты 2,4 ГГц:  $\epsilon_{\text{кель}} =$  от 11 до 55 Ф/м,  $\epsilon_{\text{косопа}} =$  от 10 до 48 Ф/м.

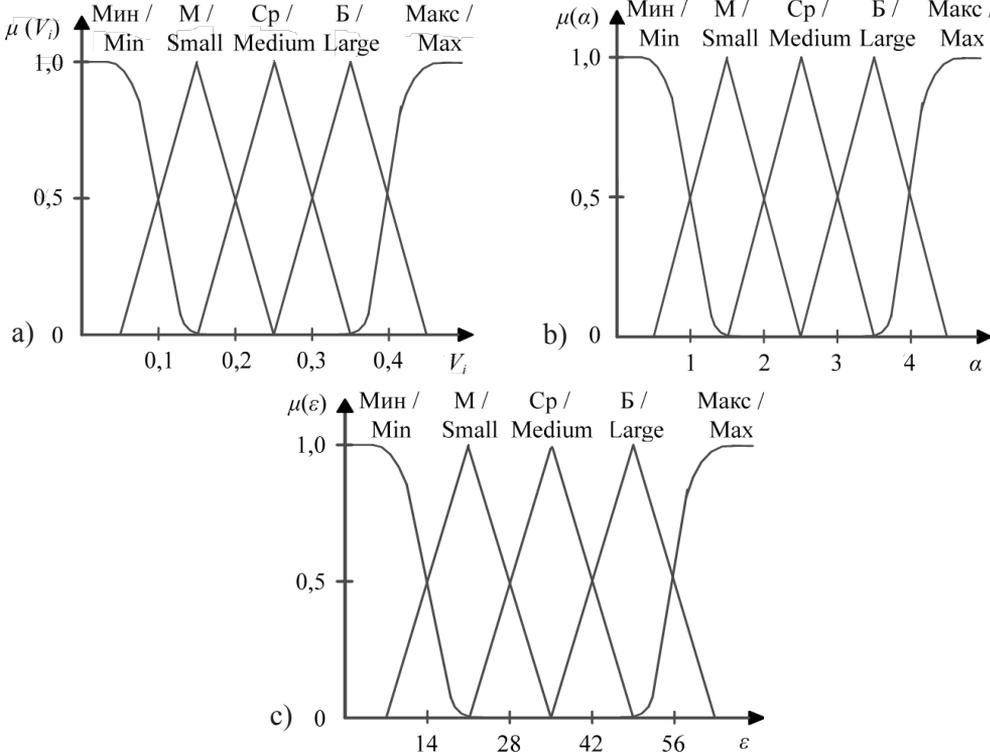
В отдельных случаях диэлектрическая проницаемость может составлять величины  $\sim 4$  Ф/м и достигать 70 Ф/м.

Таким образом, в задаче следует принять диапазон изменений входной величины  $\epsilon_{\text{к}}$  от 0 до 70, выходных величин  $V_i$  – от 0 до 0,5 и  $\alpha$  – от 0 до 5.

Будем полагать, что термножества значений лингвистических переменных представлены треугольными нечеткими числами, а на границах области определения сигмоидальными нечеткими интервалами (рис. 1). Выбор сигмоидальных функций, а не традиционно используемых трапецидальных позволяет

получить более сглаженную результирующую функцию. На рис. 1, а–б показаны функции принадлежности входных переменных «Объемная доля компонента  $V_i$ » и «Константа вида лесного массива  $\alpha$ »; на рис. 1, в приведена нечеткая функция лингвистической выходной переменной «Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_{\text{к}}$ ».

Во многих случаях при решении подобных задач<sup>12</sup> [3] на универсуме нечеткого множества принимают минимальное значение функции принадлежности, равное 3, что позволяет ограничиться небольшим объемом базы правил. Но вместе с тем в зависимости от размерности параметров выходная величина аппроксимируется менее гладкой, ступенчатой.



Р и с. 1. Нечеткие функции принадлежности лингвистических переменных для вывода функции  $\epsilon_{\text{к}} = f(V_i, \alpha)$ : а) «Объемная доля компонента  $V_i$ »; б) «Константа вида лесного массива  $\alpha$ »; в) «Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_{\text{к}}$ »

Fig. 1. Fuzzy membership functions of linguistic variables for derivation of the function  $\epsilon_{\text{к}} = f(V_i, \alpha)$ : а) “Volume fraction of the  $V_i$  component”; б) “The constant of the type of forest massif  $\alpha$ ”; в) “Dielectric constant  $\epsilon_{\text{к}}$ ”

<sup>12</sup> **Пегат А.** Нечеткое моделирование и управление / Пер. с англ. М. : Бинум. Лаборатория знаний, 2009. 798 с. URL: [http://window.edu.ru/resource/324/65324/files/Pegat\\_978-5-94774-353-1/1-2-3\\_cB353-1.pdf](http://window.edu.ru/resource/324/65324/files/Pegat_978-5-94774-353-1/1-2-3_cB353-1.pdf)



пенчатой функцией. В данном случае целесообразно принять 5 значений лингвистических переменных. (4 входных и 1 выходной).

В качестве обозначений лингвистических переменных для предложенных функций приняты следующие значения: «Минимальная» – Мин; «Малая» – М; «Средняя» – Ср; «Большая» – Б; «Максимальная» – Макс.

В терминах ТНМ лингвистические переменные определены термножествами со следующие значениями:

– «Объемная доля компонента  $V_i$ » {Мин, М, Ср, Б, Макс};

– «Константа вида лесного массива  $\alpha$ » {Мин, М, Ср, Б, Макс};

– «Диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_k$ » {Мин, М, Ср, Б, Макс}.

Принятые нечеткие функции принадлежности для вывода функции  $\varepsilon_k = f(V_i, \alpha)$  показаны на рис. 1.

### 3. Формирование базы правил системы нечеткого вывода

Для нечеткого вывода функции принадлежности используем метод Мамда-

ни<sup>13</sup> [6], что предполагает разработку базы правил нечеткой продукции.

Опишем влияние некоторых сочетаний входных воздействий на выходной параметр.

Если  $V_i = \text{«Минимальная»}$  и  $\alpha = \text{«Минимальная»}$ , То  $\varepsilon_k = \text{«Минимальная»}$ ;

Если  $V_i = \text{«Минимальная»}$  и  $\alpha = \text{«Малая»}$ , То  $\varepsilon_k = \text{«Малая»}$ ;

Если  $V_i = \text{«Максимальная»}$  и  $\alpha = \text{«Максимальная»}$ , То  $\varepsilon_k = \text{«Максимальная»}$ ;

Если  $V_i = \text{«Малая»}$  и  $\alpha = \text{«Минимальная»}$ , То  $\varepsilon_k = \text{«Минимальная»}$ ;

Если  $V_i = \text{«Средняя»}$  и  $\alpha = \text{«Минимальная»}$ , То  $\varepsilon_k = \text{«Малая»}$ ;

Если  $V_i = \text{«Максимальная»}$  и  $\alpha = \text{«Большая»}$ , То  $\varepsilon_k = \text{«Максимальная»}$ .

Используя описание вариантов сочетаний входных параметров ( $V_i$  и  $\alpha$ ), а также большее количество значений лингвистических переменных (например, «Средняя», «Большая», «Малая») и специфических особенностей явления, можно формализовать базу правил нечеткого вывода функции диэлектрической проницаемости (таблица).

Т а б л и ц а

Table

#### База правил нечеткой продукции для моделирования величины диэлектрической проницаемости $\varepsilon_k = f(V_i, \alpha)$

#### The base of fuzzy production rules for modeling the dielectric permittivity $\varepsilon_k = f(V_i, \alpha)$

Значения лингвистической переменной «Объемная доля компонента $V_i$ » / Values of the linguistic variable «Volume fraction of the $V_i$ component»	Значения выходных нечетких подмножеств «Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_k$ » при изменении нечеткой функции «Константа особенностей лесного массива $\alpha$ » / The values of output fuzzy subsets «Dielectric Permeability $\varepsilon_k$ » with a change in the fuzzy function «The singularity constant of the forest array $\alpha$ »				
	Мин / Minimum	М / Small	Ср / Medium	Б / Large	Макс / Maximum
Мин / Minimum	Мин	Мин	М	М	Ср
М / Small	Мин	М	М	Ср	Б
Ср / Medium	М	М	Ср	Б	Макс
Б / Large	Ср	Б	Б	Макс	Макс
Макс / Maximum	Ср	Б	Б	Макс	Макс

<sup>13</sup> Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH. СПб. : БХВ-Петербург, 2005. 736 с. URL: <http://bwbooks.net/index.php?id1=4&category=comp-lit&author=leonenkov-av&book=2005>

Нечеткий вывод результирующей функции выполнен по методу Мамдани<sup>14-15</sup> [6]. Схема вывода в MATLAB-формате приведена на рис. 2.

4. Синтез нечеткой модели зависимости диэлектрической проницаемости от параметров лесной среды

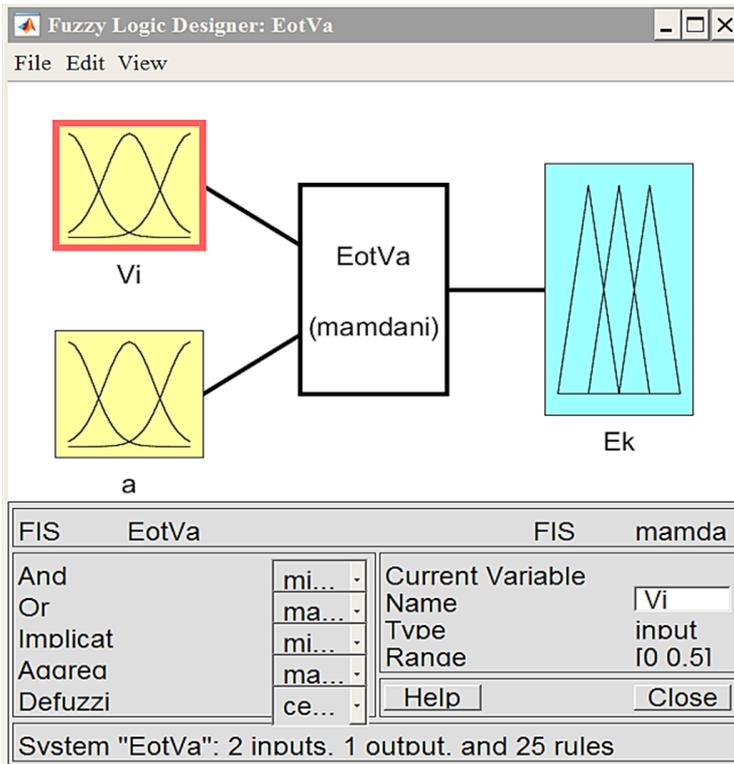
Изложенная формальная постановка задачи нечеткого вывода позволяет реализовать ее в специализированных компьютерных программах.

Реализация задачи нечеткого вывода выполнена в среде Fuzzy Logic

Toolbox приложения MATLAB<sup>17</sup>. Процедура вывода показана на рис. 3.

В данном случае использовался алгоритм по известной методике<sup>18</sup> [Там же]:

- 1) фаззификация (введение нечеткости) (рис. 3, а-с);
- 2) формирование базы правил нечеткой продукции (рис. 3, d);
- 3) нечеткий вывод (рис. 3, е);
- 4) дефаззификация (приведение к четкости) (рис. 3, е);
- 5) получение конечной функции нечеткого вывода (рис. 3, f).



Р и с. 2. Схема нечеткого вывода в среде MATLAB<sup>16</sup>

F i g. 2. The scheme of fuzzy output in the MATLAB environment

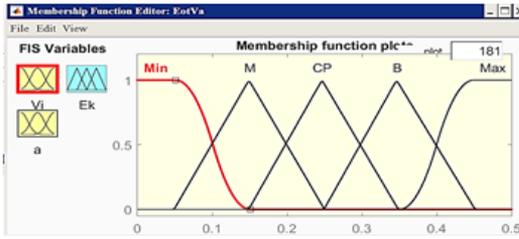
<sup>14</sup> Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH. СПб. : БХВ-Петербург, 2005. 736 с. URL: <http://bwbooks.net/index.php?id1=4&category=comp-lit&author=leolenkov-av&book=2005>

<sup>15</sup> MATLAB® & Simulink® release notes for R2008a. URL: <http://www.mathworks.com>

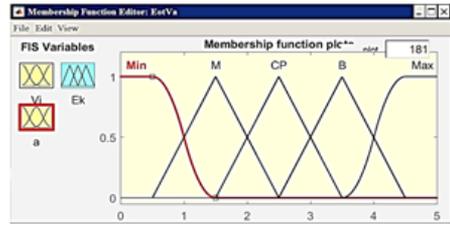
<sup>16</sup> Там же.

<sup>17</sup> Там же.

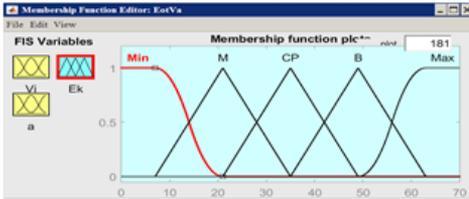
<sup>18</sup> Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH.



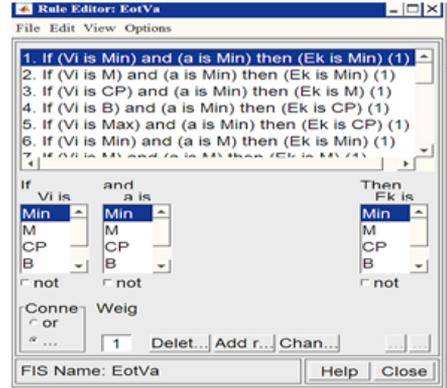
a)



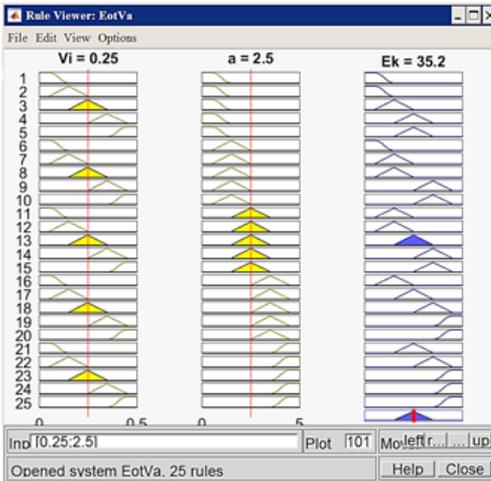
b)



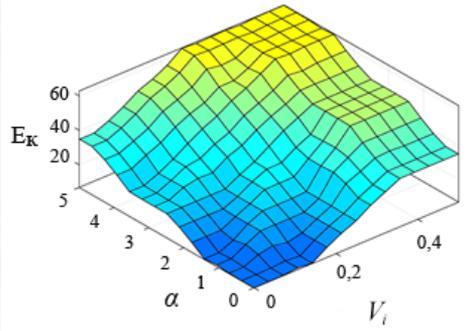
c)



d)



e)



f)

Р и с. 3. Нечеткий вывод функции  $\epsilon_k = f(V_i, \alpha)$  в среде Fuzzy Logic Toolbox приложения MATLAB: а) нечеткая функция принадлежности переменной «Объемная доля компонента  $V_i$ »; б) нечеткая функция принадлежности переменной «Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_k$ »; в) нечеткая функция принадлежности лингвистической переменной «Константа вида лесного массива  $\alpha$ »; д) база правил нечеткого вывода; е) процедура нечеткого вывода и приведения к четкости; ф) функция нечеткого вывода диэлектрической проницаемости

Fig. 3. Fuzzy output of the function  $\epsilon_k = f(V_i, \alpha)$  in the Fuzzy Logic Toolbox environment of the MATLAB application: a) fuzzy membership function of the variable “Volume fraction of the component  $V_i$ ”; b) fuzzy membership function of the variable “Dielectric constant  $\epsilon_k$ ”; c) fuzzy function of belonging to the linguistic variable “Constant type of forest  $\alpha$ ”; d) base of rules of fuzzy inference; e) procedure of fuzzy inference and reduction to clarity; f) fuzzy inference function of the dielectric permeability

Полученная в результате нечеткого вывода функция является достаточно корректной математически и может использоваться для прогнозирования величины комплексной диэлектрической проницаемости участка леса между датчиками при радиочастотном мониторинге с учетом характеристик лесной среды.

### **Обсуждение и заключения**

Как было отмечено, достаточно обстоятельных исследований, направленных на создание систем радиочастотного мониторинга леса, ни в России, ни за рубежом не проводилось.

Следует упомянуть только одну работу – В. И. Попова<sup>19</sup> (Латвия), суть которой заключалась в следующем. Автором рассматривалась лесная среда как многослойная структура. Такие элементы как кроны деревьев, образующие полог леса, воздушная среда под пологом, почва представлялись как слои квазиоднородной анизотропной линейной среды, но фактически вследствие допущений в модели, в итоге они сводились к однородной среде. Параметры, основанные на таких физических принципах, не могут оценивать лесную среду как строго дискретную, состоящую из элементов леса. Следовательно, системы мониторинга будут нечувствительны к перемещению лесосырьевых потоков, а тем более одного бревна.

Главное отличие предложенного в статье подхода заключается в дискретном представлении лесной среды как суммы элементов леса. Только такой подход обеспечивает измерения диэлектрической проницаемости лесной среды с точностью до одного бревна и, следовательно, позволяет проконтролировать путь его перемещения. Этот факт был подтвержден в результате экспериментов [1; 23–24]. Другое отличие заключается в выявлении и формализации связи комплексной ди-

электрической проницаемости лесной среды с объемной долей компонента леса и видом лесного массива.

Научная новизна работы следует из отличительных особенностей результатов, т. е. впервые предложен теоретический подход к оценке параметров лесной среды, представленной дискретно, как сумма элементов леса, и к определению диэлектрической проницаемости на основе нечеткого моделирования.

Кроме того, в ходе исследований была установлена функциональная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости леса от основных параметров лесной среды: объемных долей компонентов и вида лесного массива (открытый участок, сосновый бор стандартной высоты 25 м, смешанный лес, березовая роща, ельник).

Практическая применимость результатов заключается в возможности создания структуры информационного обеспечения автоматизированной системы лесопользования на базе мониторинга лесного фонда. Результаты в виде функциональной зависимости, полученной на основе нечеткого вывода, необходимы для проектирования систем радиочастотного мониторинга лесного фонда.

Результаты исследований составили содержание НИОКР Уральского государственного лесотехнического университета «Экологический и экспериментальный мониторинг лесов и управление ими на основе технологии RFID» (рег. № 01 ЛИФ-2009) и раздел «Разработка методики и регламента на проведение мониторинга движения сырьевых потоков в лесопромышленном производстве на основе технологий RFID» в отчете НИОКР «Разработка новых технологий заготовки и переработки древесного сырья в рамках научно-исследовательских программ Уральского лесного технопарка» (рег. № 11-01).

<sup>19</sup> **Попов В. И.** Распространение радиоволн в лесах. М. : Горячая линия-Телеком, 2017. 392 с.



Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы.

1. В настоящее время совершенствование методов изучения параметров лесной среды при радиочастотном мониторинге невозможно без применения интеллектуальных программных систем и компьютерных средств. Предложенная постановка задачи нечеткого моделирования диэлектрической проницаемости участка леса и реализация соответствующего программного обеспечения в среде MATLAB позволяет эффективно использовать информационные технологии в исследованиях, моделировании и совершенствовании систем радиочастотного мониторинга лесного фонда.

2. Разработка модели оценки диэлектрической проницаемости участка леса с привлечением статистических методов является чрезвычайно трудоемкой и недостаточно корректной. Для условий такого класса задач в наибольшей мере подходит аппарат нечетких множеств.

3. Предлагаемая функция диэлектрической проницаемости участка леса, построенная на основе нечеткого вывода, учитывает основные параметры лесной среды, а сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными демонстрирует адекватность разработанной модели, что позволяет реализовать принципиально новый подход к решению задачи.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Метод мониторинга незаконных рубок деревьев с использованием радиочастотных устройств и беспроводной сенсорной сети / С. П. Санников [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2017. Т. 33, № 1. С. 118–123. DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-1-118-123>
2. Модель информационного обеспечения системы лесопользования на базе радиочастотного мониторинга лесного фонда / С. П. Санников [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2017. Т. 34, № 2. С. 109–115. DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-2-109-115>
3. **Shtovba S., Rotshtein A., Pankevich O.** Fuzzy rule based system for diagnosis of stone construction cracks of buildings // *Advances in Computational Intelligence and Learning, Methods and Applications*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2002. P. 401–411. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-010-0324-7\\_28](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0324-7_28)
4. **Zadeh L. A.** Fuzzy sets // *Information and Control*. 1965. Vol. 8, no. 3. P. 338–353. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
5. **Zadeh L. A.** Fuzzy logic // *IEEE Transactions on Computers*. 1988. Vol. 21, no. 4. P. 83–93.
6. **Mamdani E. H.** Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis // *IEEE Transactions on Computers*. 1977. Vol. 26, no. 12. P. 1182–1191. DOI: <https://doi.org/10.1109/TC.1977.1674779>
7. **Takagi T., Sugeno M.** Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1985. Vol. 15, no. 1. P. 116–132. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399>
8. **Garg H.** A linear programming method based on an improved score function for interval-valued Pythagorean fuzzy numbers and its application to decision-making // *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 2018. Vol. 26, no. 01. P. 67–80. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218488518500046>
9. Adaptive fuzzy tracking control for stochastic nonlinear systems with time-varying input delays using the quadratic functions / H. Yue [et al.] // *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 2018. Vol. 26, no. 01. P. 109–142. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218488518500071>
10. **Schneider J., Urban R.** Proof of Donsker's invariance principle based on support functions of fuzzy random vectors // *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 2018. Vol. 26, no. 01. P. 27–42. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218488518500022>

11. **Carneiro A. L. G., Porto Jr. A. C. S.** An integrated approach for process control valves diagnosis using fuzzy logic // World Journal of Nuclear Science and Technology. 2014. Vol. 4. P. 148–157. DOI: <https://doi.org/10.4236/wjnst.2014.43019>
12. **Lin J.-J., Chuang C.-J., Ko C.-F.** Applying GA and fuzzy logic to breakdown diagnosis for spinning process // Intelligent Information Management. 2017. Vol. 9. P. 21–38. DOI: <https://doi.org/10.4236/iim.2017.91002>
13. Frequency features based fuzzy system for rotating machinery vibration analysis using smart-phones low-cost MEMS sensors / A. Ali [et al.] // Journal of Sensor Technology. 2016. Vol. 6. P. 56–74. DOI: <https://doi.org/10.4236/jst.2016.63005>
14. **Uraon K. K., Kumar S.** Analysis of defuzzification method for rainfall event // International Journal of Computer Science and Mobile Computing. 2016. Vol. 1, no. 1. P. 341–354.
15. **Alguliyev R., Abdullayeva F.** Development of fuzzy risk calculation method for a dynamic federation of clouds // Intelligent Information Management. 2015. Vol. 7. P. 230–241. DOI: <https://doi.org/10.4236/iim.2015.74018>
16. **Moises S. A., Pereira S. do L.** Dealing with empty and overabundant answers to flexible queries // Journal of Data Analysis and Information Processing. 2014. Vol. 2, no. 1. P. 12–18. DOI: <https://doi.org/10.4236/jdaip.2014.21003>
17. **Perez O.** Fuzzy law: a theory of quasi-legality // Canadian Journal of Law & Jurisprudence. 2015. Vol. 28, no. 2. P. 343–370. URL: [https://www.researchgate.net/publication/303389581\\_Fuzzy\\_Law\\_A\\_Theory\\_of\\_Quasi-Legality\\_in\\_Patrick\\_Glenn\\_and\\_Lionel\\_Smith\\_Eds\\_'Law\\_and\\_the\\_New\\_Logics'\\_Cambridge\\_University\\_Press\\_Forthcoming\\_2016](https://www.researchgate.net/publication/303389581_Fuzzy_Law_A_Theory_of_Quasi-Legality_in_Patrick_Glenn_and_Lionel_Smith_Eds_'Law_and_the_New_Logics'_Cambridge_University_Press_Forthcoming_2016)
18. **Xu W., Liu G., Yu X.** A binomial tree approach to pricing vulnerable option in a vague world // International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems. 2018. Vol. 26, no. 01. P. 143–162. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218488518500083>
19. **Ntaganda J. M., Hagggar M. S. D., Mampassi B.** Fuzzy logic strategy for solving an optimal control problem of therapeutic hepatitis C virus dynamics // Open Journal of Applied Sciences. 2015. Vol. 5, no. 9. P. 527–541. DOI: <https://doi.org/10.4236/ojapps.2015.59051>
20. **Gour A., Pardasani K. R.** Statistical and soft fuzzy set based analysis of amino acid association patterns in peptide sequence of swine influenza virus // Advanced Science, Engineering and Medicine. 2018. Vol. 10, no 2. P. 137–144. DOI: <https://doi.org/10.1166/ asem.2018.2118>
21. **Miranda G. H. B., Felipe J. C.** Computer-aided diagnosis system based on fuzzy logic for breast cancer categorization // Computers in Biology and Medicine. 2015. Vol. 64, Issue C. P. 334–346. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2014.10.006>
22. Зависимость падения мощности сигнала от параметров лесной среды при радиочастотном мониторинге лесного фонда / С. П. Санников [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2016. Т. 32, № 4. С. 181–187. DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2016-4-181-187>
23. **Санников С. П., Побединский В. В., Побединский А. А.** Модель рассеивания радиоволн в лесной среде // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. Т. 21, № 3. С. 39–48. DOI: <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2017-3-6>
24. **Санников С. П., Побединский В. В., Побединский А. А.** Экспериментальное исследование характеристик сигнала при радиочастотном мониторинге лесной среды // Вестник Поволжского государственного технологического университета (Сер. «Лес. Экология. Природопользование»). 2017. Т. 36, № 4. С. 48–58. DOI: <https://doi.org/10.15350/2306-2827.2017.4.48>

*Поступила 09.03.2018; принята к публикации 12.04.2018; опубликована онлайн 29.06.2018*

*Об авторах:*

**Побединский Владимир Викторович**, профессор кафедры сервиса и технической эксплуатации, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (620100, Россия, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, д. 37), доктор технических наук, ResearcherID: G-3245-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6318-3447>, [pobed@el.ru](mailto:pobed@el.ru)



**Газизов Асгат Мазхатович**, профессор кафедры пожарной и промышленной безопасности, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (450064, Россия, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 5/1), доктор технических наук, ResearcherID: G-4307-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7940-8444>, [ashatgaz@mail.ru](mailto:ashatgaz@mail.ru)

**Санников Сергей Петрович**, доцент кафедры автоматизации производственных процессов, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (620100, Россия, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, д. 37), кандидат технических наук, ResearcherID: G-4047-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6135-6954>, [ssp-54@mail.ru](mailto:ssp-54@mail.ru)

**Побединский Андрей Анатольевич**, старший преподаватель кафедры лесного хозяйства, деревообработки и прикладной механики, ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья» (625621, Россия, г. Тюмень, Рошинское ш., д. 18), Researcher ID: G-3777-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7548-3076>, [vm993711@mail.ru](mailto:vm993711@mail.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

В. В. Побединский – научное руководство, математическая постановка задачи и разработка нечеткой модели; А. М. Газизов – подготовка черного варианта статьи; С. П. Санников – выполнение экспериментальных исследований по теме, проверка модели на адекватность; А. А. Побединский – разработка прикладного программного обеспечения для реализации моделей, обработка и интерпретация данных.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Sannikov S. P., Pobedinsky V. V., Borodulin I. V., Pobedinsky A. A. Method of monitoring of illegal tree felling with the use of radio-frequency devices and wireless sensor network. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies. 2017; 1(33):118–123. DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-1-118-123> (In Russ.)
2. Sannikov S. P., Pobedinsky V. V., Borodulin I. V., Pobedinsky A. A. Model of information support of the forest management system on the basis of radio frequency monitoring of the forest fund. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies. 2017; 2(34):109–115. DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-2-109-115> (In Russ.)
3. Shtovba S., Rotshtein A., Pankevich O. Fuzzy rule based system for diagnosis of stone construction cracks of buildings // *Advances in Computational Intelligence and Learning, Methods and Applications*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2002. P. 401–411. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-010-0324-7\\_28](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0324-7_28)
4. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965; 8(3):338–353. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
5. Zadeh L. A. Fuzzy logic. *IEEE Transactions on Computers*. 1988; 21(4):83–93.
6. Mamdani E. H. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis // *IEEE Transactions on Computers*. 1977; 26(12):1182–1191. DOI: <https://doi.org/10.1109/TC.1977.1674779>
7. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1985; 15(1):116–132. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399>
8. Garg H. A linear programming method based on an improved score function for interval-valued Pythagorean fuzzy numbers and its application to decision-making. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 2018; 26(01):67–80. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218488518500046>
9. Yue H, Li J., Shi J., Yang W. Adaptive fuzzy tracking control for stochastic nonlinear systems with time-varying input delays using the quadratic functions. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 2018; 26(01):109–142. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218488518500071>

10. Schneider J., Urban R. Proof of Donsker's invariance principle based on support functions of fuzzy random vectors. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 2018; 26(01):27–42. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218488518500022>
11. Carneiro A. L. G., Porto Jr. A. C. S. An integrated approach for process control valves diagnosis using fuzzy logic. *World Journal of Nuclear Science and Technology*. 2014; 4:148–157. DOI: <https://doi.org/10.4236/wjnst.2014.43019>
12. Lin J.-J., Chuang C.-J., Ko C.-F. Applying GA and fuzzy logic to breakdown diagnosis for spinning process. *Intelligent Information Management*. 2017; 9:21–38. DOI: <https://doi.org/10.4236/iim.2017.91002>
13. Ali A., El-Serafi K., Mostafa S. A. K., El-Sheimy N. Frequency features based fuzzy system for rotating machinery vibration analysis using smartphones low-cost MEMS sensors. *Journal of Sensor Technology*. 2016; 6:56–74. DOI: <https://doi.org/10.4236/jst.2016.63005>
14. Uraon K. K., Kumar S. Analysis of defuzzification method for rainfall event. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*. 2016; 1(1):341–354.
15. Alguliyev R., Abdullayeva F. Development of fuzzy risk calculation method for a dynamic federation of clouds. *Intelligent Information Management*. 2015; 7:230–241. DOI: <https://doi.org/10.4236/iim.2015.74018>
16. Moises S. A., Pereira S. do L. Dealing with empty and overabundant answers to flexible queries. *Journal of Data Analysis and Information Processing*. 2014; 2(1):12–18. DOI: <https://doi.org/10.4236/jdaip.2014.21003>
17. Perez O. Fuzzy law: A theory of quasi-legality. *Canadian Journal of Law & Jurisprudence*. 2015; 28(2):343–370. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/303389581\\_Fuzzy\\_Law\\_A\\_Theory\\_of\\_Quasi-Legality\\_in\\_Patrick\\_Glenn\\_and\\_Lionel\\_Smith\\_Eds\\_'Law\\_and\\_the\\_New\\_Logics'\\_Cambridge\\_University\\_Press\\_Forthcoming\\_2016](https://www.researchgate.net/publication/303389581_Fuzzy_Law_A_Theory_of_Quasi-Legality_in_Patrick_Glenn_and_Lionel_Smith_Eds_'Law_and_the_New_Logics'_Cambridge_University_Press_Forthcoming_2016)
18. Xu W., Liu G., Yu X. A binomial tree approach to pricing vulnerable option in a vague world. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 2018; 26(01):143–162. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218488518500083>
19. Ntaganda J. M., Haggag M. S. D., Mampassi B. Fuzzy logic strategy for solving an optimal control problem of therapeutic hepatitis C virus dynamics. *Open Journal of Applied Sciences*. 2015; 5(9):527–541. DOI: <https://doi.org/10.4236/ojapps.2015.59051>
20. Gour A., Pardasani K. R. Statistical and soft fuzzy set based analysis of amino acid association patterns in peptide sequence of swine influenza virus. *Advanced Science, Engineering and Medicine*. 2018; 10(2):137–144. DOI: <https://doi.org/10.1166/ asem.2018.2118>
21. Miranda G. H. B., Felipe J. C. Computer-aided diagnosis system based on fuzzy logic for breast cancer categorization. *Computers in Biology and Medicine*. 2015; 64:334–346. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2014.10.006>
22. Sannikov S. P., Pobedinsky V. V., Gazizov A. M., Borodulin I. V., Chernitsyn M. A., Kuzminov N. S. Dependence of the signal power loss on the forest ambience parameters under radio-frequency monitoring of forest fund. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies. 2016; 32(4):181–187. DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2016-4-181-187> (In Russ.)
23. Sannikov S. P., Pobedinskiy V. V., Pobedinskiy A. A. Model scattering of radio waves in a forest. *Izmereniye. Monitoring. Upravleniye. Kontrol* = Measurement. Monitoring. Control. 2017; 21(3):39–48. DOI: <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2017-3-6> (In Russ.)
24. Sannikov S. P., Pobedinskiy V. V., Pobedinskiy A. A. Experimental study of characteristics of a signal at the radio-frequency monitoring of forest environment. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopolzovaniye* = Volga State Technological University Bulletin. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management. 2017; 36(4):48–58. DOI: <https://doi.org/10.15350/2306-2827.2017.4.48>

*Received 09.03.2018; revised 12.04.2018; published online 29.06.2018*

*About authors:*

**Vladimir V. Pobedinsky**, Professor, Chair of Service and Technical Operation, Ural State Forestry University (37 Sibirskiy Trakt St., 620100 Ekaterinburg, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: G-3245-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6318-3447>, [pobed@e1.ru](mailto:pobed@e1.ru)

**Asgat M. Gazizov**, Professor, Chair of Fire Protection and Industrial Safety, Ufa State Oil Technical University (5/14 Kosmonavtov St., Ufa 500064, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: G-4307-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7940-8444>, [ashatgaz@mail.ru](mailto:ashatgaz@mail.ru)

**Sergey P. Sannikov**, Associate Professor, Chair of Automation of Production Process, Ural State Forestry University (37 Sibirskiy Trakt St., 620100 Ekaterinburg, Russia), ResearcherID: G-4047-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6135-6954>, [ssp-54@mail.ru](mailto:ssp-54@mail.ru)

**Andrey A. Pobedinskiy**, Senior Lecturer, Chair of Forestry and Applied Mechanics, State Agrarian University of the Northern Trans-Urals (18, Roshinskoye Shosse, Tyumen 625621, Russia), ResearcherID: G-3777-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7548-3076>, [vm993711@mail.ru](mailto:vm993711@mail.ru)

*Authors' contribution:*

V. V. Pobedinsky – scientific management, mathematical formulation of the problem and development of a fuzzy model; A. M. Gazizov – writing the draft; S. P. Sannikov – development of experimental studies, testing of the model; A. A. Pobedinskiy – software development for implementing the model, data processing and interpretation.

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



## Поперечные колебательные движения в вязкой жидкости, контактирующей с пористой средой

Э. Н. Егерев<sup>1</sup>, А. Ю. Егерев<sup>2</sup>, А. О. Зубов<sup>3\*</sup>

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

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»» (г. Москва, Россия)

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

\*finist94@yandex.ru

*Введение.* Рассматривается решение двух задач о поперечных колебаниях в вязкой несжимаемой однородной жидкости, контактирующей с пористой средой (матрицей), насыщенной этой же жидкостью. Поверхностью раздела пористой среды и контактирующей с ней жидкости во всех рассмотренных случаях является плоскость.

*Материалы и методы.* Для описания движения жидкости в пористой среде использовалось нестационарное уравнение Бринкмана. В граничных условиях учитывалось возможное скольжение жидкости в пористой среде вдоль твердой непроницаемой поверхности, ограничивающей пористую среду.

*Результаты исследования.* Получены точные аналитические решения двух задач о внутренних поперечных волнах в вязкой жидкости, находящейся на слое пористой среды. Решение первой задачи показывает, что в вязкой жидкости могут существовать затухающие поперечные волны, скорость которых перпендикулярна направлению волны. В пористой среде амплитуда скорости монотонно уменьшается по мере удаления вглубь пористой среды. В тех случаях, когда поперечные волны существуют, их длина в пористой среде и свободной жидкости равна  $2\pi\delta_2\sqrt{\Gamma}$  и  $2\pi\delta_2$  соответственно. Сильное затухание волны происходит на расстоянии, приближенном к ее длине, поэтому движение сосредоточено в слое аналогичной толщины. Чтобы волна могла проникнуть из свободной жидкости в пористую среду, толщина слоев  $h_1$  и  $h_2$  должна быть сравнимой с длинами волн. Во второй задаче получено, что в случае  $\varepsilon^2 \ll 1$  затухающие поперечные волны могут существовать только в свободной жидкости, а в случае  $\varepsilon^2 \gg 1$  – как в жидкости, так и в пористой среде.

*Обсуждение и заключения.* Таким образом, при малых частотах колебаний затухающие поперечные волны могут существовать только в свободной жидкости, а при больших – и в жидкости, и в пористой среде. Для дальнейшего исследования можно рассмотреть колебательные движения пористого шара с твердым непроницаемым ядром в вязкой жидкости.

**Ключевые слова:** пористая среда, вязкая жидкость, поперечные колебания, внутренние поперечные волны, уравнение Бринкмана, точное аналитическое решение

**Для цитирования:** Егерев Э. Н., Егерев А. Ю., Зубов А. О. Поперечные колебательные движения в вязкой жидкости, контактирующей с пористой средой // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 2. С. 164–174. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201802.164-174



## Transverse Oscillatory Motion in Viscous Fluid in Contact with Porous Medium

E. N. Egereva<sup>1</sup>, A. Yu. Egerev<sup>2</sup>, A. O. Zubov<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

<sup>2</sup>National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russia)

<sup>3</sup>Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia)

\*finist94@yandex.ru

*Introduction.* We consider the solution of two problems on transverse oscillations in a viscous incompressible homogeneous fluid in contact with a porous medium (matrix) saturated with the same liquid. The surface of the section of the porous medium and the liquid in contact with it is the plane in all the cases considered.

*Materials and Methods.* To describe the motion of a liquid in a porous medium, the non-stationary Brinkman equation is used. In the boundary conditions, the possible slip of a liquid in a porous medium along a solid impermeable surface, which limits the porous medium, is taken into account.

*Results.* Exact analytical solutions of two problems on internal transverse waves in a viscous fluid located on a layer of a porous medium are obtained. The first problem shows that damped transverse waves exist in a viscous fluid. The velocity of the wave is perpendicular to its direction. The amplitude of the velocity decreases monotonically as it moves deeper into the porous medium. Damped transverse waves can exist both in a free liquid and in a porous medium. The amplitude of these waves attenuates with distance from the oscillating plane into the interior of the liquid. In those cases where the transverse waves exist, their length in regions 1 and 2 is equal to  $2\pi\delta_2\sqrt{\Gamma}$  and  $2\pi\delta_2$ , respectively. The strong attenuation of the wave occurs at a distance of the order of its length. Therefore, the motion is concentrated in a layer of thickness on the order of the wavelength. That the wave could penetrate from the free liquid into the porous medium of the thickness of the layers  $h_1$  and  $h_2$  should be comparable with the wave lengths. In the second problem, it is obtained that in the case of  $\varepsilon^2 \ll 1$  damped transverse waves exist only in a free liquid, and in the case of  $\varepsilon^2 \gg 1$  damped transverse waves exist in both a liquid and a porous medium.

*Conclusions.* For the case of low frequencies, damped transverse waves can exist only in a free liquid, and in the case of high oscillation frequencies, both in a liquid and in a porous medium. The lengths of these waves in regions 1 and 2 are the same as in the first problem. Vibrational motion of a porous sphere with a solid impermeable core in a viscous fluid could be usefully explored in further research.

**Keywords:** porous medium, viscous fluid, transverse oscillatory, inner transverse waves, Brinkman equation, exact analytical solutions

**For citation:** Egereva E. N., Egerev A. Yu., Zubov A. O. Transverse Oscillatory Motion in Viscous Fluid in Contact with Porous Medium. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(2):164–174. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201802.164-174

### Введение

В статье рассматривается решение двух задач о поперечных колебаниях в вязкой несжимаемой однородной жидкости, контактирующей с пористой средой (матрицей), насыщенной этой же жидкостью. Поверхностью раздела пористой среды и контактирующей с ней жидкостью во всех рассмотренных случаях

является плоскость. Очевидно, что колебательные движения жидкости могут проникать на заметную глубину в пористую матрицу только при достаточно большой пористости (близкой к единице) и высокой проницаемости пористой матрицы. Пористая среда далее предполагается недеформируемой, однородной и изотропной.

Новизна данного исследования заключается в том, что поперечные колебательные движения жидкости рассматриваются с учетом пористого основания, на котором она располагается и которое ограничено снизу твердой непроницаемой стенкой. Работа носит теоретический характер, однако результаты исследования могут быть применены в области ракетно-космической, авиационной и транспортной техники, а также при моделировании биосистем, где важна гидроупругость.

### **Обзор литературы**

Распространение поверхностных волн в слое жидкости, находящейся на пористом основании, рассмотрено, в частности, в работах [1–2]. Наряду с поверхностными волнами в вязкой жидкости могут существовать также внутренние поперечные волны, вызванные колебаниями погруженных в нее твердых тел. Решение задачи о поперечных колебательных движениях в жидкости, соприкасающейся с неограниченной плоской поверхностью, которая колеблется в своей плоскости, приведено в работах<sup>1–2</sup>.

В статье [3] представлены результаты качественного и количественного анализа аналитических решений краевой задачи о течении вязкой несжимаемой жидкости под действием постоянного градиента давления в длинной плоской щели и цилиндрическом канале, заполненных пористым материалом.

В работе [4] исследована математическая модель распространения и неустойчивости волн на поверхности цилиндрического столба магнитной жидкости бесконечной длины, окружающей коаксиально расположенное длинное пористое ядро круглого сечения. Найдены условия, при которых возмущения поверхности жидкого столба становятся неустойчивыми

и приводят к его распаду на цепочку соединенных капель. Показано, что длина этих капель увеличивается с возрастанием магнитного поля.

Численное решение модели Бринкмана с учетом неравномерной пористости вблизи стенки канала, заполненного зернистой средой, получено в статье [5]. Данное решение позволяет более детально исследовать поведение потока жидкости вблизи стенки в зернистых средах. Сравнение моделей пористой среды Дарси и Бринкмана приведено в работе [6], где рассмотрено математическое моделирование нестационарных режимов термогравитационной конвекции в пористой вертикальной цилиндрической полости с теплопроводной оболочкой конечной толщины в условиях конвективного охлаждения со стороны окружающей среды.

Решение задачи о течении вязкой жидкости в плоском канале, который заполнен волокнистой пористой средой, представленной регулярной системой цилиндров, расположенных поперек потока жидкости, представлено в работах<sup>3</sup> [7].

В работе [8] рассмотрено условие передачи импульса, которое применяется на границе между пористой средой и однородной жидкостью. При этом используются закон Дарси с поправкой Бринкмана и уравнения Стокса. Данный подход вызывает скачок напряжения, что имеет важное значение для процессов теплообмена, поскольку допускает непрерывный конвективный перенос на границе между пористой средой и однородной жидкостью.

В работе [9] приведены точные аналитические решения задач об обтекании сферы и цилиндра в пористой среде при использовании уравнения Бринкмана с граничным условием На-

<sup>1</sup> Ламб Г. Гидродинамика. М. : ОГИЗ, 1947. 929 с. URL: <https://www.twirpx.com/file/63848>

<sup>2</sup> Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: в 10 т. М. : Физматлит, 2015. 736 с. Т. 6: Гидродинамика. URL: [http://www.immsp.kiev.ua/postgraduate/Biblioteka\\_trudy/GidrodinamikaLanday1986.pdf](http://www.immsp.kiev.ua/postgraduate/Biblioteka_trudy/GidrodinamikaLanday1986.pdf)

<sup>3</sup> Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2004. С. 640–641. URL: <http://www.geokniga.org/books/4843>



вье. Показано, что условие прилипания на границе пористой среды и твердого тела, в частности, при использовании уравнения Бринкмана, в общем случае должно быть заменено на условие, допускающее ненулевую скорость фильтрации на границе.

### Материалы и методы

#### Первая задача

Рассматриваются поперечные колебательные движения жидкости с учетом пористого основания. Предполагается, что неподвижный слой пористой среды толщиной  $h_1$  снизу ограничен неподвижной непроницаемой плоской поверхностью, а сверху контактирует со слоем свободной жидкости толщиной  $h_2$ . Жидкость соприкасается сверху с неограниченной плоской поверхностью, колеблющейся вдоль своей плоскости по гармоническому закону с частотой  $\omega$ .

Система координат выбрана так, что поверхность раздела пористой среды и жидкости совпадает с плоскостью  $y, z$ ; пористая среда занимает область  $h_1 \leq x \leq 0$ , а жидкости соответствует  $0 \leq x \leq h_2$ . Ось  $y$  выбирается параллельно направлению колебаний плоской поверхности  $x = h_2$ , скорость которой запишем в виде функции от времени  $u = u_0 \exp(-i\omega t)$ , где  $u_0$  – действительная постоянная. Все величины не зависят от  $z$ . Величины, относящиеся к пористой среде и свободной жидкости, обозначаются в необходимых случаях индексами 1 и 2 соответственно.

Для решения первой задачи запишем систему уравнений нестационарного движения жидкости в пористой среде – модель фильтрации Бринкмана [10]:

$$\frac{\rho}{\Gamma} \frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial t} + \frac{\rho}{\Gamma^2} (\mathbf{u}_1 \cdot \nabla) \mathbf{u}_1 = -\nabla p_1 + \eta' \nabla^2 \mathbf{u}_1 + \mathbf{f}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_1 = 0, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости ( $\rho = const$ );  $\Gamma$  – пористость матрицы ( $\Gamma = const$ );  $\mathbf{u}_1$  – макроскопическая скорость фильтра-

ции ( $\mathbf{u}_1 = \Gamma \mathbf{v}_1$ , где  $\mathbf{v}_1$  – средняя по объему пор скорость жидкости);  $p_1$  – среднее по объему пор давление;  $\mathbf{f} = -(\eta / K) \mathbf{u}_1$  – плотность силы сопротивления пористой матрицы;  $K$  – коэффициент проницаемости пористой матрицы ( $K = const$ )  $\eta'$  – эффективная вязкость жидкости в порах;  $\eta$  – вязкость свободной жидкости ( $\eta' = \eta$ ).

Очевидно, колебательное движение жидкости в пористой среде возможно только при достаточно большой пористости, близкой к единице. Поэтому далее предполагаем, что пористость близка к единице, и с учетом этого принимаем  $\eta' = \eta$  [11].

Уравнения движения свободной жидкости имеют вид<sup>4</sup> [4]

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}_2}{\partial t} + \rho (\mathbf{u}_2 \cdot \nabla) \mathbf{u}_2 = -\nabla p_2 + \eta \nabla^2 \mathbf{u}_2,$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_2 = 0. \quad (2)$$

Из соображений симметрии следует, что все величины будут функциями только от координаты  $x$  и времени  $t$ . Согласно уравнениям непрерывности, в (1–2)  $u_{1y} \equiv u_1$ ,  $u_{2y} \equiv u_2$ , а также  $u_{1x} = const$ ,  $u_{2x} = const$ , где обе константы должны быть равны нулю, поскольку с учетом уравнений непрерывности граничных условий  $u_{1x} = 0$  и  $u_{2x} = 0$  на непроницаемых поверхностях  $x = -h_1$  и  $x = h_2$ . Поэтому  $u_{1x} \equiv 0$ ,  $u_{2x} \equiv 0$ . Кроме того,  $(\mathbf{u}_1 \cdot \nabla) \mathbf{u}_1 \equiv 0$  и  $(\mathbf{u}_2 \cdot \nabla) \mathbf{u}_2 \equiv 0$ . Таким образом, вследствие симметрии уравнения движения (1–2) линеаризуются.

#### Вторая задача

Отличие постановки данной задачи от первой заключается в том, что на свободной поверхности жидкости  $x = h_2$  действует касательное напряжение, измеряющееся по гармоническому закону  $\sigma_{xy} = \eta S_0 \exp(-i\omega t)$ .

Такое напряжение может быть создано, например, потоком воздуха переменного направления или касательным к поверхности переменным

<sup>4</sup>Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: в 10 т. Т. 6: Гидродинамика. М.: Физматлит, 2015. 736 с. URL: [http://www.immsp.kiev.ua/postgraduate/Biblioteka\\_trudy/GidrodinamikaLanday1986.pdf](http://www.immsp.kiev.ua/postgraduate/Biblioteka_trudy/GidrodinamikaLanday1986.pdf)

электрическим полем, действующим на поверхностный заряд в электропроводной жидкости.

### Результаты исследования

Уравнения движения для первой задачи принимают вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Gamma} \frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \nabla p_1 + \nu \nabla^2 \mathbf{u}_1 - \frac{\nu}{K} \mathbf{u}_1, \\ \operatorname{div} \mathbf{u}_1 &= 0, \\ \frac{\partial \mathbf{u}_2}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \nabla p_2 + \nu \nabla^2 \mathbf{u}_2, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{где } \nu' = \frac{\eta'}{\rho}; \quad \nu = \frac{\eta}{\rho}.$$

Из (3) найдем  $p_1 \equiv \text{const}$ ,  $p_2 \equiv \text{const}$ . Из симметрии следует, что скорости  $\mathbf{u}_1$ ,  $\mathbf{u}_2$  направлены вдоль оси  $y$ .

Введем обозначения  $u_{1y} \equiv u_1$ ,  $u_{2y} \equiv u_2$ , получим:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Gamma} \frac{\partial u_1}{\partial t} &= \nu \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} - \frac{\nu}{K} u_1, \\ \frac{\partial u_2}{\partial t} &= \nu \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Граничные условия к уравнениям (4) запишем в виде<sup>5</sup> [8; 12]:

$$\begin{aligned} u_1 &= \beta \frac{\partial u_1}{\partial x} (x = -h_1) \quad (\beta = \text{const}), \\ u_1 &= u_2 (x = 0), \\ \Lambda \left( \frac{\partial u_1}{\partial x} - \frac{\partial u_2}{\partial x} \right) &= u_2 (x = 0) \quad (\Lambda = \text{const}), \\ u_2 &= u_0 \exp(-i\omega t) (x = h_2), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\beta$  и  $\Lambda$  – постоянные с размерностью длины.

В первом условии (5) учитывается возможное скольжение жидкости относительно твердой непроницаемой поверхности, контактирующей с пористой средой. При  $\beta = 0$  получается обычное условие прилипания  $u_1 = 0$ . В модели фильтрации Дарси (более простой по

сравнению с моделью Бринкмана) наличие скольжения неявно учитывается тем, что на скорость жидкости накладывается только условие непротекания в нормальном к твердой поверхности направлении, а скорость скольжения жидкости вдоль этой поверхности остается неопределенной. Второе условие (5) выражает непрерывность скорости. Третье связывает скачок касательных напряжений с относительной касательной скоростью жидкости на поверхности раздела; при  $1/\Lambda \rightarrow 0$  оно переходит в условие непрерывности касательных напряжений, а при  $\Lambda = 0$  – в условие прилипания. Четвертое – это обычное условие прилипания жидкости к твердой поверхности.

Найдем решения уравнений (4) с учетом граничных условий:

$$\begin{aligned} u_1(x, t) &= F_1(x) \exp(-i\omega t), \\ u_2(x, t) &= F_2(x) \exp(-i\omega t). \end{aligned} \quad (6)$$

Подставив (6) в (4), получим:

$$\begin{aligned} F_1''(x) + \left( \frac{i\omega}{\nu\Gamma} - \frac{1}{K} \right) F_1(x) &= 0, \\ F_2''(x) + \frac{i\omega}{\nu} F_2(x) &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Найдем решение системы данных дифференциальных уравнений с учетом четырех граничных условий для функций  $F_1$  и  $F_2$ , вытекающих из условий (5):

$$\begin{aligned} F_1(x) &= A_1 \exp \xi_1 x + B_1 \exp(-\xi_1 x), \\ F_2(x) &= A_2 \exp \xi_2 x + B_2 \exp(-\xi_2 x), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $A_1, B_1, A_2, B_2$  – произвольные постоянные,

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \frac{1}{\sqrt{\Gamma}} \left( \frac{1}{\delta} - \frac{i\delta}{\delta_2^2} \right), \quad \xi_2 = \frac{1-i}{\delta_2}, \\ \frac{1}{\delta^2} &= \frac{1}{\delta_1^2} + \sqrt{\frac{1}{\delta_1^4} + \frac{1}{\delta_2^4}}, \end{aligned}$$

<sup>5</sup> Ламб Г. Гидродинамика. М. : ОГИЗ, 1947. 929 с. URL: <https://www.twirpx.com/file/63848>



$$\delta_1 = \sqrt{\frac{2K}{\Gamma}}, \quad \delta_2 = \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}}$$

Подставим выражения  $F_1(x)$ ,  $F_2(x)$  (8) в граничные условия (5), запишем систему алгебраических уравнений относительно произвольных постоянных  $A_1, B_1, A_2, B_2$ :

$$A_1(1 - \beta\xi_1) \exp(-\xi_1 h_1) + B_1(1 + \beta\xi_1) \exp(\xi_1 h_1) = 0$$

при  $x = -h_1$

$$A_1 + B_1 = A_2 + B_2 \text{ при } x = 0;$$

$$A_1 \left( \xi_1 - \frac{1}{\Lambda} \right) - B_1 \left( \xi_1 + \frac{1}{\Lambda} \right) - (A_2 - B_2) \xi_2 = 0$$

при  $x = 0$ ;

$$A_2 \exp(\xi_2 h_2) + B_2 \exp(-\xi_2 h_2) = u_0$$

при  $x = h_2$ .

Найдем постоянные  $A_1, B_1, A_2, B_2$ :

$$A_1 = \frac{u_0}{2} \left( \frac{1}{D_1} - \frac{D}{D_1} \operatorname{sh} \xi_2 h_2 \right) (1 + \beta \xi_1) \cdot \exp(\xi_1 h_1 + \xi_2 h_2),$$

$$B_1 = \frac{u_0}{2} \left( \frac{D}{D_1} \operatorname{sh} \xi_2 h_2 - \frac{1}{D_1} \right) (1 - \beta \xi_1) \cdot \exp(\xi_2 h_2 - \xi_1 h_1),$$

$$A_2 = \frac{1}{2} u_0 D,$$

$$B_2 = u_0 \left( \exp \xi_2 h_2 - \frac{1}{2} D \exp 2 \xi_2 h_2 \right),$$

$$D = \frac{D_1 \xi_2 + D_2}{D_1 \xi_2 \operatorname{ch} \xi_2 h_2 + D_2 \operatorname{sh} \xi_2 h_2}$$

$$D_1 = \operatorname{sh} \xi_1 h_1 + \beta \xi_1 \operatorname{ch} \xi_1 h_1,$$

$$D_2 = \xi_1 \left( 1 - \frac{\beta}{\Lambda} \right) \operatorname{ch} \xi_1 h_1 + \left( \beta \xi_1^2 - \frac{1}{\Lambda} \right) \operatorname{sh} \xi_1 h_1$$

В частном случае  $\beta = 0, \Lambda \rightarrow \infty$  коэффициенты  $A_1, B_1, A_2, B_2$  значительно упрощаются.

В пределе  $\Gamma \rightarrow 1, K \rightarrow \infty$  насыщенная жидкостью пористая среда заменяется свободной жидкостью. При этом система двух уравнений (7) заменяется одним вторым уравнением с граничными условиями:  $u_1(-h_1) = 0$  и 4 в (5). Решение такой задачи представлено в работе Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица<sup>6</sup>. В предельном случае  $h_1 \rightarrow 0$  остается только уравнение для  $F_2(x)$  и граничное условие 4 в (5). Второе граничное условие примет вид  $u_2(0, t) = 0$ ; условия 1 и 3 отбрасываются. В результате получим выражение для скорости, совпадающее с тем, что было получено Ландау и Лифшицем:

$$u_2(x, t) = \frac{\operatorname{sink}_2 x}{\operatorname{sink}_2 h_2} u_0 \exp(-i\omega t).$$

Здесь и далее  $k_2 = (1+i)/\delta_2$ . Везде подразумеваются действительные части соответствующих комплексных выражений.

В связи с громоздкостью общего решения (8) рассмотрим подробнее два предельных случая:

- 1)  $\varepsilon^2 = (\delta_1/\delta_2)^2 = \omega K / (\nu \Gamma) \ll 1$ ,
- 2)  $\varepsilon^2 \gg 1$ .

В первом предельном случае  $\varepsilon^2 \ll 1$  выражения для скоростей принимают следующий вид:

$$\frac{u_1}{u_0} = H' \left( \operatorname{sh} \frac{h_1 + x}{\delta_1^*} + \frac{\beta}{\delta_1^*} \operatorname{ch} \frac{h_1 + x}{\delta_1^*} \right) \cdot \exp(-ik_2 h_2 - i\omega t),$$

$$\frac{u_2}{u_0} = \left[ D' \operatorname{sink}_2 (h_2 - x) + e^{ik_2 x} \right] \cdot \exp(-ik_2 h_2 - i\omega t)$$

$$H' = (1 + D' \operatorname{sink}_2 h_2) / D'_1,$$

<sup>6</sup> Там же.

$$\begin{aligned}
 D' &= \frac{ik_2 D'_1 - D'_2}{k_2 D'_1 \cos k_2 h_2 + D'_2 \sin k_2 h_2}, \\
 D'_1 &= \operatorname{sh} \frac{h_1}{\delta_1^*} + \frac{\beta}{\delta_1^*} \operatorname{ch} \frac{h_1}{\delta_1^*}, \\
 D'_2 &= \frac{1}{\delta_1^*} \left( 1 - \frac{\beta}{\Lambda} \right) \operatorname{ch} \frac{h_1}{\delta_1^*} + \\
 &+ \frac{1}{\delta_1^*} \left( \frac{\beta}{\delta_1^*} - \frac{\delta_1^*}{\Lambda} \right) \operatorname{sh} \frac{h_1}{\delta_1^*}. \quad (9)
 \end{aligned}$$

Здесь и далее  $\delta_1^* = \delta_1 \sqrt{\Gamma/2}$ .

Силу трения, действующую на единицу площади колеблющейся пластины, определим по формуле:

$$P_y = -\eta \frac{\partial u_2}{\partial x} \text{ при } x = h_2.$$

В данном случае эта сила трения равна

$$\begin{aligned}
 P_y(h_2) &= -\eta \frac{\partial u_2}{\partial x} \Big|_{x=h_2} = \\
 &= -\eta u_0 k_2 (i - D' e^{-ik_2 h_2}) \cdot e^{-i\omega t}, \quad (10)
 \end{aligned}$$

а на поверхности пористой матрицы ( $x = 0$ ):

$$\begin{aligned}
 P_y(0) &= \eta \frac{\partial u_2}{\partial x} \Big|_{x=0} = \eta u_0 k_2 (i - D' \cos k_2 h_2) \cdot \\
 &\cdot \exp(-ik_2 h_2 - i\omega t). \quad (11)
 \end{aligned}$$

Для второго предельного случая  $\varepsilon^2 \gg 1$  запишем:

$$\begin{aligned}
 \frac{u_1}{u_0} &= H'' \left[ \sin \frac{k_2(h_1+x)}{\sqrt{\Gamma}} + \frac{\beta k_2}{\sqrt{\Gamma}} \cos \frac{k_2(h_1+x)}{\sqrt{\Gamma}} \right] \cdot \\
 &\cdot \exp(-ik_2 h_2 - i\omega t), \\
 \frac{u_2}{u_0} &= \left[ D'' \sin k_2(h_2-x) + e^{ik_2 x} \right] \cdot \\
 &\cdot \exp(-ik_2 h_2 - i\omega t), \\
 H'' &= (1 + D'' \sin k_2 h_2) / D_1'',
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D'' &= \frac{ik_2 D_1'' - D_2''}{k_2 D_1'' \cos k_2 h_2 + D_2'' \sin k_2 h_2}, \\
 D_1'' &= \sin \frac{k_2 h_1}{\sqrt{\Gamma}} + \frac{\beta k_2}{\sqrt{\Gamma}} \cos \frac{k_2 h_1}{\sqrt{\Gamma}}, \\
 D_2'' &= \frac{k_2}{\sqrt{\Gamma}} \left( 1 - \frac{\beta}{\Lambda} \right) \cos \frac{k_2 h_1}{\sqrt{\Gamma}} - \\
 &- \left( \frac{\beta k_2^2}{\Gamma} + \frac{1}{\Lambda} \right) \sin \frac{k_2 h_1}{\sqrt{\Gamma}}. \quad (12)
 \end{aligned}$$

Силы трения на поверхностях  $x = h_2$  и  $x = 0$  вычисляются в данном случае из формул (10–11) соответственно путем замены в них  $D'$  на  $D''$ .

При  $\beta \rightarrow 0$ ,  $\Lambda \rightarrow 0$ ,  $h_1 \rightarrow 0$  выражения (10–11) в обоих предельных случаях принимают известный вид<sup>7</sup>:

$$P_y(h_2) = -k_2 \eta u_0 \operatorname{ctg} k_2 h_2 \exp(-i\omega t),$$

$$P_y(0) = \frac{k_2 \eta u_0}{\sin k_2 h_2} \exp(-i\omega t).$$

Согласно (9; 12) скорость  $u_2$  в первом предельном случае, а также  $u_1$  и  $u_2$  во втором выражаются через тригонометрические функции от аргумента  $x$  (а также от времени  $t$ ) и экспоненциальные множители перед ними. Следовательно, в вязкой жидкости (область 2) в первом случае могут существовать затухающие поперечные волны, в которых скорость  $u_2 = u_{2y}$  перпендикулярна направлению волны (оси  $x$ ). В пористой среде (область 1) такие волны в этом случае отсутствуют: амплитуда скорости  $u_1$  монотонно убывает по мере удаления от поверхности  $x = 0$  вглубь пористой среды.

Во втором предельном случае затухающие поперечные волны могут существовать как в свободной жидкости, так и в пористой среде. Амплитуда этих волн затухает по мере удаления от колеблющейся плоскости вглубь жидкости.

<sup>7</sup> Там же.



В тех случаях, когда поперечные волны существуют, их длина в областях 1 и 2 равна  $2\pi\delta_2\sqrt{\Gamma}$  и  $2\pi\delta_2$  соответственно. Сильное затухание волны происходит на расстоянии, близком к ее длине, поэтому движение сосредоточено в слое аналогичной толщины. Чтобы волна могла проникнуть из свободной жидкости в пористую среду, толщина слоев  $h_1$  и  $h_2$  должна быть сравнимой с длинами волн.

Во второй задаче вместо условия 4 в (5) запишем:

$$\frac{\partial u_2}{\partial x} = S_0 \exp(-i\omega t) \quad (x = h_2),$$

при этом условия 1–3 не изменяются.

В этом случае решения уравнений (7) имеют вид (8), но с другими коэффициентами:  $A_1, B_1, A_2, B_2$ . Найдем эти коэффициенты из математических граничных условий данной задачи в общем виде:

$$\begin{aligned} & A_1(1 - \beta\xi_1) \exp(-\xi_1 h_1) + \\ & + B_1(1 + \beta\xi_1) \exp(\xi_1 h_1) = 0 \quad (x = -h_1) \\ & A_1 + B_1 = A_2 + B_2 \quad (x = 0), \\ & A_1 \left( \xi_1 - \frac{1}{\Lambda} \right) - B_1 \left( \xi_1 + \frac{1}{\Lambda} \right) - (A_2 - B_2)\xi_2 = 0 \\ & \quad (x = 0), \\ & \xi_2 A_2 \exp(\xi_2 h_2) - \xi_2 B_2 \exp(-\xi_2 h_2) = S_0 \\ & \quad (x = h_2). \end{aligned}$$

Из четырех данных уравнений найдем неизвестные  $A_1, B_1, A_2, B_2$  в общем виде:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{S_0(1 + \beta\xi_1)}{2D_1} \left( D \operatorname{ch} \xi_2 h_2 - \frac{1}{\xi_2} \right) \cdot \\ & \quad \cdot \exp(\xi_1 h_1 + \xi_2 h_2), \\ B_1 &= \frac{S_0(1 + \beta\xi_1)}{2D_1} \left( \frac{1}{\xi_2} - D \operatorname{ch} \xi_2 h_2 \right) \cdot \\ & \quad \cdot \exp(\xi_2 h_2 + \xi_1 h_1), \end{aligned}$$

$$A_2 = \frac{1}{2} S_0 D,$$

$$B_2 = S_0 \left( \frac{1}{2} D \cdot \exp 2\xi_2 h_2 - \frac{\exp \xi_2 h_2}{\xi_2} \right),$$

$$D = \frac{D_1 \xi_2 + D_2}{D_1 \xi_2^2 \operatorname{sh} \xi_2 h_2 + D_2 \xi_2 \operatorname{ch} \xi_2 h_2},$$

$$D_1 = \operatorname{sh} \xi_1 h_1 + \beta \xi_1 \operatorname{ch} \xi_1 h_1,$$

$$D_2 = \xi_1 \left( 1 - \frac{\beta}{\Lambda} \right) \operatorname{ch} \xi_1 h_1 + \left( \beta \xi_1^2 - \frac{1}{\Lambda} \right) \operatorname{sh} \xi_1 h_1.$$

В связи с громоздкостью получаемого выражения для скорости колебания жидкости рассмотрим два предельных случая найденного общего решения.

В случае малых частот колебаний волн  $\varepsilon^2 \ll 1$  выражения для скоростей принимают вид:

$$\begin{aligned} u_1 &= H' \left( \operatorname{sh} \frac{h_1 + x}{\delta_1^*} + \frac{\beta}{\delta_1^*} \operatorname{ch} \frac{h_1 + x}{\delta_1^*} \right) \cdot \\ & \quad \cdot \exp(-ik_2 h_2 - i\omega t), \\ u_2 &= S_0 D' \left[ \frac{1}{2} e^{-ik_2 x} + \left( \frac{1}{2} e^{-ik_2 h_2} + \frac{1}{ik_2 D'} \right) e^{ik_2(x-h_2)} \right] \cdot \\ & \quad \cdot \exp(-i\omega t), \\ H' &= \frac{S_0}{D_1} \left( \frac{1}{ik_2} + D' \cos k_2 h_2 \right), \\ D' &= \frac{k_2 D'_1 + i D'_2}{k_2 D'_2 \cos k_2 h_2 - k_2^2 D'_1 \sin k_2 h_2}, \\ D'_1 &= \operatorname{sh} \frac{h_1}{\delta_1^*} + \frac{\beta}{\delta_1^*} \operatorname{ch} \frac{h_1}{\delta_1^*}, \\ D'_2 &= \frac{1}{\delta_1^*} \left( 1 - \frac{\beta}{\Lambda} \right) \operatorname{ch} \frac{h_1}{\delta_1^*} + \\ & \quad + \frac{1}{\delta_1^*} \left( \frac{\beta}{\delta_1^*} - \frac{\delta_1^*}{\Lambda} \right) \operatorname{sh} \frac{h_1}{\delta_1^*}. \quad (13) \end{aligned}$$

Для больших частот колебаний волн  $\varepsilon^2 \gg 1$  запишем:

$$\begin{aligned}
 u_1 &= H'' \left[ \sin \frac{k_2(h_1+x)}{\sqrt{\Gamma}} + \frac{\beta k_2 \cos \frac{k_2(h_1+x)}{\sqrt{\Gamma}}}{\sqrt{\Gamma}} \right] \cdot \\
 &\quad \cdot \exp(-ik_2 h_2 - i\omega t), \\
 u_2 &= S_0 D'' \left[ \frac{1}{2} e^{-ik_2 x} + \left( \frac{1}{2} e^{-ik_2 h_2} + \frac{1}{ik_2 D''} \right) e^{ik_2(x-h_2)} \right] \cdot \\
 &\quad \cdot \exp(-i\omega t), \\
 H'' &= \frac{S_0}{D_1''} \left( \frac{1}{ik_2} + D'' \cos k_2 h_2 \right), \\
 D'' &= \frac{k_2 D_1'' + i D_2''}{k_2 D_2'' \cos k_2 h_2 - k_2 D_1'' \sin k_2 h_2}, \\
 D_1'' &= \sin \frac{k_2 h_1}{\sqrt{\Gamma}} + \frac{\beta k_2 \cos \frac{k_2 h_1}{\sqrt{\Gamma}}}{\sqrt{\Gamma}}, \\
 D_2'' &= \frac{k_2}{\sqrt{\Gamma}} \left( 1 - \frac{\beta}{\Lambda} \right) \cos \frac{k_2 h_1}{\sqrt{\Gamma}} - \\
 &\quad - \left( \frac{\beta k_2^2}{\Gamma} + \frac{1}{\Lambda} \right) \sin \frac{k_2 h_1}{\sqrt{\Gamma}}. \quad (14)
 \end{aligned}$$

Из (13–14) следует, что в первом предельном случае затухающие поперечные волны могут существовать только в свободной жидкости, а во втором – и в жидкости, и в пористой среде. Длины этих волн в областях 1 и 2 аналогичны записанным в первой задаче.

Скорость жидкости на свободной поверхности равна в первом случае

$$u_2 \Big|_{x=h_2} = S_0 D' [\exp(-ik_2 h_2) + 1 / ik_2 D] \cdot \exp(-i\omega t), \quad (15)$$

а во втором вычисляется из (13) путем замены  $D'$  на  $D''$ .

В пределе  $\beta \rightarrow 0$ ,  $\Lambda \rightarrow 0$ ,  $h_1 \rightarrow 0$  (при замене пористой матрицы непроницаемой поверхностью  $x = 0$ ) выражение (15) принимает вид:

$$u_2 = (S_0 / k_2) \cdot e^{-i\omega t} \operatorname{tg} k_2 h_2.$$

### Обсуждение и заключения

В статье получены точные аналитические решения уравнения Бринкмана для двух задач о внутренних поперечных волнах в вязкой жидкости, находящейся на пористом основании. На границе пористой среды и твердого тела учитывается возможное скольжение жидкости.

Данные исследования направлены на изучение свойств гидроупругости в сферах ракетно-космической, авиационной и транспортной техники, а также для моделирования биологических систем.

В рамках будущих исследований можно рассмотреть колебательные движения пористого шара с твердым непроницаемым ядром в вязкой жидкости.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Слезкин Н. А. О влиянии пористости дна на плоскую стоячую волну в тяжелой жидкости // Известия АН СССР. МЖГ. 1984. № 4. С. 160–163.
2. Столяров И. В., Тактаров Н. Г. Распространение поверхностных волн в слое жидкости на пористом основании // Известия АН СССР. МЖГ. 1987. № 5. С. 183–186.
3. Ханукаева Д. Ю., Филиппов А. Н. Фильтрация вязкой жидкости через среду Бринкмана, ограниченную непроницаемыми стенками // Труды РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. 2014. Т. 276, № 3. С. 145–155. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22742022>
4. Егерева Э. Н., Рунова О. А., Тактаров Н. Г. Неустойчивость и распад столба магнитной жидкости, окружающей длинное пористое ядро // Известия РАН. 2015. № 1. С. 153–162. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23284009>
5. Бочкарев А. А., Волков В. И. Модель Бринкмана с учетом неравномерной пористости // Известия Алтайского государственного университета. 2002. С. 99–100. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20407818>



6. **Трифонов Т. А., Шеремет М. А.** Сравнительный анализ моделей Дарси и Бринкмана при исследовании нестационарных режимов сопряженной естественной конвекции в пористой цилиндрической области // Компьютерные исследования и моделирование. 2013. Т. 5, № 4. С. 623–634. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21160592>

7. **Мосина Е. В.** Численное исследование течения на границе жидкость – пористая среда // Теоретические основы химической технологии. 2010. Т. 44, № 5. С. 536–542. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15249478>

8. **Ochoa-Tapia J. A., Whitaker S.** Momentum transfer at the boundary between a porous medium and a homogeneous fluid – I. Theoretical development // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 1995. Vol. 38. P. 2635–2646. DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(94\)00346-W](https://doi.org/10.1016/0017-9310(94)00346-W)

9. **Леонтьев Н. Е.** Течения в пористой среде вокруг цилиндра и сферы в рамках уравнения Бринкмана с граничным условием Навье // Известия РАН. 2014. № 2. С. 107–112. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21472629>

10. **Brinkman H. C.** A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles // Appl. Sci. Res. 1947. Vol. 1, no. 1. P. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02120313>

11. **Haber S., Mauri R.** Boundary conditions for Darcy’s flow through porous media // Int. J. Multiphase Flow. 1983. Vol. 9, no. 5. P. 561–574. DOI: [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(83\)90018-6](https://doi.org/10.1016/0301-9322(83)90018-6)

12. **Harris S. D., Ingham D. B., Pop I.** Mixed convection boundary-layer flow near the stagnation point on a vertical surface in a porous medium: Brinkman model with slip // Transp. Porous Med. 2009. Vol. 77, no. 2. P. 267–285. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10485-011-1526-x>

*Поступила 24.11.2017; принята к публикации 24.04.2018; опубликована онлайн 29.06.2018*

*Об авторах:*

**Егерев Эльвира Николаевна**, доцент кафедры прикладной математики, дифференциальных уравнений и теоретической механики, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), кандидат физико-математических наук, ResearcherID: F-9071-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5474-924X>, [egerevaen@mail.ru](mailto:egerevaen@mail.ru)

**Егерев Артем Юрьевич**, бакалавр, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”» (101000, Россия, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20), ResearcherID: F-8420-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6928-3764>, [ayegerev@yandex.ru](mailto:ayegerev@yandex.ru)

**Зубов Александр Олегович**, магистрант, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (129337, Россия, г. Москва, Ярославское ш., д. 26), ResearcherID: F-7655-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4909-228X>, [finist94@yandex.ru](mailto:finist94@yandex.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

Е. Н. Егерев – анализ теоретического материала, анализ полученных результатов, написание первоначального варианта статьи; А. Ю. Егерев – обработка числовых данных и доработка текста; А. О. Зубов – вычитка текста статьи, анализ научных источников.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Slezkin N. A. [On the influence of the porosity of the bottom on a flat standing wave in a heavy fluid]. *Izvestiya AN SSSR. MZhG* = USSR Academy of Sciences Bulletin. Mechanics of Liquid and Gas. 1984; 4:160–163. (In Russ.)

2. Stolyarov I. V., Taktarov N. G. [Propagation of surface waves in a layer of fluid on a porous base]. *Izvestiya AN SSSR. MZhG* = USSR Academy of Sciences Bulletin. Mechanics of Liquid and Gas. 1987; 5:183–186. (In Russ.)

3. Hanukaeva D. Yu., Filippov A. N. Filtration of viscous fluid through Brinkman media limited by impermeable walls. *Trudy RGU nefti i gaza imeni I. M. Gubkina* = Works of Gubkin Russian State University of Oil and Gas. 2014; 276(3):145–155. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22742022> (In Russ.)
4. Egereva E. N., Runova O. A., Taktarov N. G. Instability and disintegration of a magnetic fluid column that surrounds a long porous core. *Fluid Dynamics*. 2015; 50(1):164–172. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24010576>
5. Bochkarev A. A., Volkov V. I. Model of the Brinkman with the account of non-uniform the porosity. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta* = Altay State University Bulletin. 2002; 1:99–100. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20407818> (In Russ.)
6. Trifonova T. A., Sheremet M. A. Comparative analysis of Darcy and Brinkman models at studying of transient conjugate natural convection in a porous cylindrical cavity. *Kompyuternyye issledovaniya i modelirovaniye* = Computer Studies and Modeling. 2013; 5(4):623–634. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21160592> (In Russ.)
7. Mosina E. V. Numerical study of flow at a liquid-porous medium interface. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2010; 44(5):679–685. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16670164>
8. Ochoa-Tapia J. A., Whitaker S. Momentum transfer at the boundary between a porous medium and a homogeneous fluid – I. Theoretical development // *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 1995. Vol. 38. P. 2635–2646. DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(94\)00346-W](https://doi.org/10.1016/0017-9310(94)00346-W)
9. Leont'ev N. E. Flow past a cylinder and a sphere in a porous medium within the framework of the Brinkman equation with the Navier boundary condition. *Fluid Dynamics*. 2014; 49(2):232–237. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21875223>
10. Brinkman H. C. A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles. *Appl. Sci. Res.* 1947; 1(1):27–34. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02120313>
11. Haber S., Mauri R. Boundary conditions for Darcy's flow through porous media. *Int. J. Multiphase Flow*. 1983; 9(5):561–574. DOI: [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(83\)90018-6](https://doi.org/10.1016/0301-9322(83)90018-6)
12. Harris S. D., Ingham D. B., Pop I. Mixed convection boundary-layer flow near the stagnation point on a vertical surface in a porous medium: Brinkman model with slip. *Transp. Porous Med.* 2009; 77(2):267–285. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10485-011-1526-x>

*Received 24.11.2017; revised 24.04.2018; published online 29.06.2018*

*About authors:*

**Elvira N. Egereva**, Associate Professor, Chair of Applied Mathematics, Differential Equations and Theoretical Mechanics, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia) Ph.D. (Physics and Mathematics), ResearcherID: F-8420-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5474-924X>, [egerevaen@mail.ru](mailto:egerevaen@mail.ru)

**Artem Yu. Egerev**, Student, National Research University Higher School of Economics, (20 Myasnitskaya St., Moscow 101000, Russia), ResearcherID: F-8420-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6928-3764>, [ayegerev@yandex.ru](mailto:ayegerev@yandex.ru)

**Alexander O. Zubov**, Master's Student, National Research University of Civil Engineering (26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow 129337, Russia), ResearcherID: F-7655-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4909-228X>, [finist94@yandex.ru](mailto:finist94@yandex.ru)

*Authors' contribution:*

E. N. Egereva – collection and analysis of theoretical material, analysis of the results obtained, writing the draft; A. Yu. Egerev – numerical data processing of and revision of the text; A. O. Zubov – word processing, analysis of literature data.

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



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

УДК 004.3

DOI: 10.15507/0236-2910.028.201802.175-180



## Structuring of Logistics Management Organizational-Technological System

**S. Al Salaimeh\*, A. Miqdadi***Aqaba University of Technology (Aqaba, Jordan)**\*safwan670@yahoo.com*

*Introduction.* The task of the synthesis of the rational structure of logistics management, organizational and technical systems, belongs to the class of poorly formalized. The solution of such task is dependent on specific statement structuring, subject area, and applied formalized, heuristic or intellectual procedures.

*Materials and Methods.* The task of structuring is to develop a mathematical model, methods selection and rational analysis algorithms and synthesis of the structure of the logistics and organizational technological system based on the principles of decomposition and aggregation, identification, optimization and coordination of the rational decision to achieve the overall effect of systems, the excess amount of effects, receipts from each component to the logistics systems separately.

*Results.* This paper presents the structuring of logistics management organizational-technological system. The tasks of constructing an integrated structure of the organizations functional technological management system belongs to class of nonlinear stochastic programming.

*Conclusions.* The solution allow to achieve the overall effect of systems, the excess amount of effects, receipts from each component to the logistics systems separately.

**Keywords:** organizational structure, organizational-technological system, logistics, logistics management, non-linear stochastic programming

**For citation:** Al Salaimeh S., Miqdadi A. Structuring of Logistics Management Organizational-Technological System. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(2):175–180. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.175-180>

## Структурирование организационно- технологической системы управления логистикой

**С. Аль-Салаймех\*, А. Мигдади***Технологический университет Акабы (г. Акаба, Иордания)**\*safwan670@yahoo.com*

*Введение.* Задача синтеза рациональной структуры управления логистикой, организационными и техническими системами принадлежит к классу недостаточно формализованных. Решение такой задачи зависит от специфического структурирования

положений, предметной области и применяемых формализованных, эвристических или интеллектуальных процедур.

*Материалы и методы.* Задачей структурирования является разработка математической модели, выбора методов и алгоритмов рационального анализа и синтеза структуры логистической и организационной технологической системы на основе принципов декомпозиции и агрегации, идентификации, оптимизации и координации рационального решения для достижения общего эффекта систем, избыточного количества эффектов, поступления от каждого компонента к логистическим системам отдельно.

*Результаты исследования.* В данной статье представлено структурирование организационно-технологической системы управления логистикой. Задачи построения интегрированной структуры функциональной технологической системы управления организациями относятся к классу нелинейного стохастического программирования.

*Обсуждение и заключения.* Решение описанной задачи позволяет достичь общего эффекта систем, избыточного количества эффектов, поступлений от каждого компонента к системам логистики отдельно.

**Ключевые слова:** организационная структура, организационно-технологическая система, логистика, управление логистикой, нелинейное стохастическое программирование

**Для цитирования:** Аль-Салаймех С., Мигдади А. Структурирование организационно-технологической системы управления логистикой // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 2. С. 175–180. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.175-180>

## Introduction

The logistics management system is created to coordinate production, economic activities, financial, and economic support, and information services of a set of interrelated units of integration of organizational technological systems. The first production transport logistic systems appeared during the Second World War to solve the tasks of strategic interaction of the defense industry, material and technical supply, and transport with the purpose of timely provision of the USA army with weapons, combustible lubricating material and food [1–3].

A logistic system of organizational technological type include material technical supply, storage of raw materials and computers, manufacture of finished products, sending goods to the interim storage warehouse, final sale, and consumption the finished products. Information and computer support of these systems act as two hypostases as information or computer support for decision making by a specific type of logistics system and as an independent logistics information management system (IMS). In the second case

IMS constructed on the basic of special software, turns the information from a servant factor into an independent productive force. Able to significantly increase labor productivity and minimize production costs, so significantly increases the efficiency of the functioning of the logistics management organizational technological systems (LMOTS) [4–6].

## Materials and Methods

The quality of organizational and technological management largely depends on the structure of the organizational and technical system of the conditions its operation. Structures mean many elements (production units, subsystems organizational technological systems and information management systems, and tasks), being form a certain integrity. The structure in narrow sense reflects a relatively stable one and invert regularities which relate to the internal structure and organization of the system. In a broad sense, these concepts are supplemented by features of functioning, reflecting the specific of the relationship between parts, the patterns of distribution of material and information flows and so on [9–10].



The task of structuring is to develop a mathematical model, methods selection and rational analysis algorithms and synthesis of the structure of the logistics and organizational technological system based on the principles of decomposition and aggregation, identification, optimization and coordination of the rational decision to achieve the overall effect of systems, the excess amount of effects, receipts from each component to the logistics systems separately.

Logistic management organizational technological systems are properly applied in a number of industries and non-productive sphere. These systems already formed industrial, constructional, commercial, information, and computer logistic. The solution of poorlyformed tasks of computer logistics often rests with specialized experts system or not a computer network administrator, server without data, electronic communication nodes.

Computerized logistic system is a kind of administrator coordinator organization of rational work of a set of interconnected information management systems.

In the world market of computer technology and the logistics system of the industrial trading, transports are quite fully represented. So that, the universal enterprise management was designed by the Rational Rose, it is equipped with models of logistics and the following functions:

- management of material flows;
- planning the needs of enterprise in the materials;
- market analysis of supplies;
- warehouse management;
- partners of the operation;
- account control;
- inventory.

The concepts of openness of information provide the possibility decentralized self-control at level of user department and units [11–14].

As a result of construction of the organizational and technological systems, rational logistical solution can also be obtained for the logistic systems, finance

systems, system of analysis of activities, and personnel management systems.

### Results

A wide range of function of organizational and technological management determines the variety of tasks to be accomplished. All the tasks of planning and controlling and management production and sight and divisions and in particular can be divided into direct and back. In direct tasks for a given set of factors, you need to determine the value of objective function. In back tasks, a set of factors corresponding to the optimal value of the objective function or optimal in some sense conditions.

Bellow, we consider a number of aspects related to the features of the solution of the revers optimization tasks of production planning and management. The tasks of constructing an integrated structure of the organizations functional technological management system belongs to class of nonlinear stochastic programming [15–19]:

$$S^* = \underset{s \in S_D}{\operatorname{argext}} E \left\{ \sum_{j=1}^K \lambda_j [Q_j(S) - Q_j^*] / Q_j^* \right\} \zeta, \quad (1)$$

where  $S_D$  – area of admissible solutions. (Structures), satisfied equation of the material balance of the sequence of information transformation, stage of development of quasi optimal plans and management decision;  $Q_{1\zeta}, Q_{2\zeta}, Q_{3\zeta}$  – indicators, respectively, the quality of the performance of the functions assigns to the system, completeness and reliability and timely receipt of information for management purpose; the total cost of creating and operating a particular type of structure;  $\lambda_j$  – weight criterion, and  $\sum_j \lambda_j = 1$ ;  $E\{*\}$  the operator of the mathematical expectation.

Formalization of the task (1) requires additional information about the parameters and characteristics of the synthesized structure.

The parameters are necessary for the specification of constrains the totality of which determines the area of admissible solutions  $S_D$ . Observing the performance characteristics are necessary to find the em-

pirical distribution density and taking the operator of mathematical exception  $E\{*\}$ .

Replacement of actual parameters and characteristics of initial data for design can lead to unpredictable results.

Therefore, in the synthesis of structures, management the formulation of the task, for the solution of which you can use heuristics and procedures.

Integral multi-level structure and functioning of the organizational-technological management system is presented as

$$S_{OTC} = S_{pr}, S_{or}, S_{in}, S_{Al},$$

where  $S_{pr}$  – the production structure reflects the composition and interrelationships of the parts of the units and other units and in closed production;  $S_{org}$  – an organizational structure that establishes a link between the various management functions and activities within the system;  $S_{int}$  – technical structure that reflects the location and operation of the meant of collection, transmission, and processing of information;  $S_{alg}$  – algorithmic structure reflecting the mathematical description of the task and the functions and their decision.

The production structure  $S_{pr}$  – is built a technical principle, reflecting the sequence of transformation of material resources into finished products. One of the options  $S_{pr}$ :

$$S_{pr} = S_{MTS}, S_{Bp}, S_{Mar}, \quad (3)$$

where  $S_{MTS}$ ,  $S_{Mp}$ ,  $S_{Mar}$  – the structure of the material and technical supply; main production; and sales of products.

The organization structure  $S_{org}$  reflects the composition and subordination between governing bodies of organizational and technological systems; its units production; officials in the decision making process. It assigns other functions to the subdivisions of the administrative apparatus,  $S_{org}$  it is multi-level and the relationship can be represented

$$S_{pr} = S_{MTS}, S_{Bp}, S_{Mar}, \quad (4)$$

where  $S_{pp}$ ,  $S_{OC}$ ,  $S_{Om}$  – the structure of the production planning according; operational control; and operational management.

Information technical structure  $S_{iTec}$  intended for the modern, fully and qualities provision of information to officials and technical means, participating in the development of solutions, can be represented by the ratio:

$$S_{iTec} = S_{ctd}, S_{in}, S_{Tc}, \quad (5)$$

where  $S_{ctd}$ ,  $S_{icn}$ ,  $S_{Tc}$  – the structure is correspondingly to the system for collecting the transmission and processing of data; information networks; and technical controls.

Algorithmic structure  $S_{Alg}$ , reflecting the mathematical explanation of the problem and ways of the relation:

$$S_{Alg} = S_{cr}, S_m, S_{Alg}, S_P, \quad (6)$$

where  $S_{cr}$ ,  $S_M$ ,  $S_{Alg}$ ,  $S_P$  – the structure accordingly criteria of efficiency of solved problems; mathematical models; mathematical; algorithms; and software.

From the set of permissible structure of the functioning of the organizational technical system should choose the most preferable and the aggregate of technical indicators according to the expression (1). The chosen structure should be economical to ensure efficient production management in real time and minimum costs. Exclude an unreasonable multistage management. Change the production structure requirement of the perfection of the organizational, information, technical, and algorithmic structure.

### Conclusions

The task of the synthesis the rational structure of logistics, organizational and technical systems, in the general case belongs to the class of poorly formalized. The solution of such task is dependent on their specific statement structuring, subject area, and applied formalized, heuristic or intellectual procedures are decide. This paper demonstrated the structuring of logistics management organizational – technological system. The task of



structuring is to develop a mathematical model, methods selection and rational analysis algorithms and synthesis of the structure of the logistics and organizational technological system based on the principles of decomposition and aggre-

gation, identification, optimization and coordination of the rational decision to achieve the overall effect of systems, the excess amount of effects, receipts from each component to the logistics systems separately.

## REFERENCES

1. Al Salaimeh S. The optimal management of information servicing logistics system. *Leonardo Journal of Sciences*. 2007; 10:47–54. Available at: [http://ljs.academicdirect.org/A10/047\\_054.pdf](http://ljs.academicdirect.org/A10/047_054.pdf)
2. Al Salaimeh S. Information technologies of distributed applications design. *Leonardo Journal of Sciences*. 2007; 10:41–46. Available at: [http://ljs.academicdirect.org/A10/041\\_046.pdf](http://ljs.academicdirect.org/A10/041_046.pdf)
3. Al Salaimeh S., Makadmeh Z. Multi-criteria synthesis of logistics systems through the hierarchy analysis. *Journal of Cybernetics and Informatics*. 2006; 6:15–25. Available at: [http://www.sski.sk/journal/sites/default/files/v6\\_2\\_Safwan\\_Al\\_Salaimeh.pdf](http://www.sski.sk/journal/sites/default/files/v6_2_Safwan_Al_Salaimeh.pdf)
4. Al Salaimeh S., Batiha K. Business process simulation with algebra event regular expression. *Information Technology Journal*. 2006; 5(3):583–589. DOI: <https://doi.org/10.3923/itj.2006.583.589>
5. Batiha K., Al Salaimeh S. E-Learning. *Information Technologies and Knowledge*. 2007; 1:76–77. Available at: <http://sci-gems.math.bas.bg:8080/jspui/bitstream/10525/108/1/ijtk01-1-p14.pdf>
6. Batiha K., Al Salaimeh S., Al Besoul K. Digital art and design. *Leonardo Journal of Science*. 2006; 9:1–8. Available at: [http://ljs.academicdirect.org/A09/001\\_008.pdf](http://ljs.academicdirect.org/A09/001_008.pdf)
7. Al Salaimeh S., Jabber H. Weights adjustment neural networks. *European Journal of Scientific Research*. 2008; 21(2):314–318.
8. Al Salaimeh S. Quality assurance of logistics information system. *American Journal of Scientific Research*. 2009; 1:34–36.
9. Al Salaimeh S., Abu Zaher A. Developing enterprise system with CORBA and JAVA integrated technologies. *Annals. Computer Science Series*. 2011; 9(1):215–220. Available at: <http://anale-informatica.tibiscus.ro/download/lucrari/9-1-18-Safwan.pdf>
10. Al Salaimeh S., Abu Zaher A. Using JAVA technologies in developing enterprise systems. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2011; 5:1407–1410. Available at: [https://www.researchgate.net/profile/Safwan\\_Al\\_Salaimeh/publication/296954039\\_Using\\_java\\_technologies\\_in\\_developing\\_enterprise\\_systems/links/5a4c8c3baca2729b7c8a0847/Using-java-technologies-in-developing-enterprise-systems.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Safwan_Al_Salaimeh/publication/296954039_Using_java_technologies_in_developing_enterprise_systems/links/5a4c8c3baca2729b7c8a0847/Using-java-technologies-in-developing-enterprise-systems.pdf?origin=publication_detail)
11. Al Salaimeh S. A new model for information logistics system architecture. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2011; 28(1):39–47 Available at: [https://www.researchgate.net/profile/Safwan\\_Al\\_Salaimeh/publication/298012715\\_A\\_new\\_model\\_for\\_information\\_logistics\\_system\\_architecture/links/5a4c85cda6fdcc3e99d02187/A-new-model-for-information-logistics-system-architecture.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Safwan_Al_Salaimeh/publication/298012715_A_new_model_for_information_logistics_system_architecture/links/5a4c85cda6fdcc3e99d02187/A-new-model-for-information-logistics-system-architecture.pdf?origin=publication_detail)
12. Al-Shatnawi A. M., Zawaideh F., Al Salaimeh S., Omar K. Offline arabic text recognition : An overview. *World of Computer Science and Information Technology Journal*. 2011; 1(5):184–192. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/9138/e10f91a2cfdb0717bf301d5f592062e8eefc.pdf>
13. Al Salaimeh S., Albesoul K., Batiha K. Combined method of routing multimedia data in computer networks. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*. 2011; 2(5). DOI: <http://dx.doi.org/10.26483/ijarcs.v2i5.788>
14. Al Salaimeh S., Pushkarev A. N. Preliminary assessment for the effectiveness of the principles of logistics information management system. *International Journal of Computer Science and Telecommunications*. 2011; 2(9). Available at: [http://www.ijcst.org/Volume2/Issue9/p6\\_2\\_9.pdf](http://www.ijcst.org/Volume2/Issue9/p6_2_9.pdf)

15. Al Salaimeh S., Makadmeh Z., Avramenko V. P. Shtangee S. V. Optimal resource allocation under bad compatibility of functional limitations. International Journal of Computer Science and Technology. 2012; 3(1):210–212. Available at: <http://www.ijest.com/vol31/2/safwan.pdf>

16. Al Salaimeh S., Younes M. B. Functional structure of special computerized information system. Journal of Environmental Science, Computer Science and Engineering & Technology. 2014; 4(1):52–56. Available at: [https://www.jecet.org/download\\_frontend.php?id=36&table=Section%20B:%20Computer%20Science](https://www.jecet.org/download_frontend.php?id=36&table=Section%20B:%20Computer%20Science)

17. Younes M. B., Al Salaimeh S. The optimal allocation of simulation resource in logistics information systems. International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. 2015; 2(2). Available at: [http://ijiset.com/vol2/v2s2/IJISSET\\_V2\\_I2\\_05.pdf](http://ijiset.com/vol2/v2s2/IJISSET_V2_I2_05.pdf)

18. Al Salaimeh S., Al Saraireh Z., Al Rawashdeh J. H. Design a model of language identification tool. International Journal of Information & Computation Technology. 2015; 5(1):11–18. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/3470/1f1665b7ebfcb8d688f12d868000a208a3e7.pdf>

19. Batiha K., Al Salaimeh S. Development sustainable algorithm optimal resource allocation in information logistics systems. International Journal of Computer Applications. 2016; 137(14):8–9. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/e997/0d222f4050a817b229403493e97e03a4eeb4.pdf>

*Received 15.01.2018; revised 04.04.2018; published online 29.06.2018*

*About authors:*

**Safwan Al Salaimeh**, Professor, Software Engineering Department, Aqaba University of Technology (79 Wasfi al-Tal Street (Gardens), Amman 11191, Jordan), Ph.D., [ssalaimeh@aut.edu.jo](mailto:ssalaimeh@aut.edu.jo)

**Amjad Miqdadi**, Assistant Professor, Business Administration Department, Aqaba University of Technology (79 Wasfi al-Tal Street (Gardens), Amman 11191, Jordan), Ph.D. (Business Administration), [amiqdadi@aut.edu.jo](mailto:amiqdadi@aut.edu.jo)

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

*Поступила 15.01.2018; принята к публикации 04.04.2018; опубликована онлайн 29.06.2018*

*Об авторах:*

**Сафван Аль-Салаймех**, профессор департамента инженерного программного обеспечения, Технологический университет Акабы (11191, Иордания, г. Амман, ул. Васфи Аль-Таль (Гарденс), д. 79), доктор философии, [ssalaimeh@aut.edu.jo](mailto:ssalaimeh@aut.edu.jo)

**Амджад Мигдади**, доцент департамента делового управления, Технологический университет Акабы (11191, Иордания, г. Амман, ул. Васфи Аль-Таль (Гарденс), д. 79), доктор философии (по деловому управлению), [amiqdadi@aut.edu.jo](mailto:amiqdadi@aut.edu.jo)

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*



## Interdisciplinary Modelling of Robots Using CAD/CAE Technology

**M. V. Chugunov\*, I. N. Polunina**

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

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

*Introduction.* The paper describes an interdisciplinary approach that integrates physical and virtual (3D) modelling methods and tools in a high industrial undergraduate engineering school research environment and in an industrial design. The CAD/CAE procedures were connected directly with physical modelling for robotic systems of various types: mobile robots, manipulators etc. Thus, the design problems for the robot are solved in the both environments: physical and virtual.

*Materials and Methods.* The approach includes three separate parts: 1) SolidWorks; 2) Arduino, Fischertechnik and RoboRobo sets; 3) MS Visual Studio C++, COM technology SolidWorks and a POSIEX socket API (Application Program Interface). API and COM are used as the integration tools for physical and virtual parts. Corresponding Add-In or Stand-Alone applications extract the model features used for determining the necessary kinematic and dynamic parameters for robotics control. Robot webcams, sensors and feedback allow to establish a bidirectional connection between the behaviours of the 3D (virtual) and the physical models.

*Results.* The developed virtual (3D), physics models and software for the robots represent the integrated framework used in industrial design and research process. This interdisciplinary approach is realized as project-based learning in the educational and research process and in the industrial design practice.

*Conclusions.* The modern industry design is the interdisciplinary field with high level of integration between the disciplines. This research demonstrated that the developed integrated framework is effective for both industry design practice and engineering research.

**Keywords:** integrated interdisciplinary model, CAD/CAE-system, 3D modeling, virtual model, physical model, project-based learning, API programming, robotics systems, industrial design

**For citation:** Chugunov M. V., Polunina I. N. Interdisciplinary Modelling of Robots Using CAD/CAE Technology. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(2):181–190. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.181-190>

## Междисциплинарное моделирование роботов с использованием систем автоматизированного проектирования

**М. В. Чугунов\*, И. Н. Полунина**

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

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

*Введение.* В статье представлен междисциплинарный подход, интегрирующий методы и средства натурального и виртуального (3D) моделирования как в исследовательском процессе технического вуза, так и в практике промышленного проектирования.

CAD/CAE-модели и технологии напрямую связаны с натурными моделями робототехнических систем различного типа: мобильными роботами, манипуляторами и т. д. Таким образом, задача проектирования решается в двух взаимосвязанных средах: натурной и виртуальной.

*Материалы и методы.* Интегрированная платформа, основанная на междисциплинарном подходе, включает в себя три части: 1) SolidWorks; 2) Arduino, Fischertechnik и RoboRobo конструкторы; 3) MS VisualStudio C++, COM технологии, SolidWorks и POSIEX socket API (Application Program Interface). API и COM используются как инструменты интеграции натуральных и виртуальных моделей. Соответствующие Add-In или Stand-Alone приложения импортируют необходимые свойства виртуальной модели, которые используются для определения кинематических и динамических параметров управления роботом. Сенсоры робота, вебкамера, Wi-Fi, Bluetooth и радиосвязь позволяют создать двунаправленные связи между виртуальной и натурной моделью.

*Результаты исследования.* На основе междисциплинарного подхода разработаны натурные и виртуальные (3D) модели, а также программное обеспечение, интегрированное в единую платформу проектирования объектов робототехники. Подход реализован как метод проектов в учебном и исследовательском процессе технического вуза, а также в практике промышленного проектирования.

*Обсуждение и заключения.* Современное промышленное проектирование является междисциплинарной областью с высокой степенью интеграции дисциплин. В исследовании показано, что разработанная интегрированная платформа эффективна как при использовании в сфере промышленного проектирования, так и в образовательном и исследовательском процессе технического вуза.

**Ключевые слова:** интегрированная междисциплинарная модель, система автоматизированного проектирования, 3D-моделирование, виртуальная модель, натурная модель, метод проектов, API-программирование, робототехника, промышленное проектирование

*Для цитирования:* Чугунов М. В., Полунина И. Н. Междисциплинарное моделирование роботов с использованием систем автоматизированного проектирования // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 2. С. 181–190. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.181-190>

## Introduction

The product development, manufacturing, using and servicing in the industry has been realized in digital environments, enabled by integrated CAD/CAM/CAE/PLM tools.

The core idea is to integrate features of mechanical CAD, CAE and robotics software into the same platform to facilitate the development process through the designed user friendly interface. The integrated platform includes various 3D models of the robotized production work cell: the robot and an environment area, in which the robot moves. This idea was realized, for example, in SolidWorks software [1] and PLM Siemens NX systems [2]. Integrated software and virtual control system ensure that reaching the

given positions by the robot is realized without the occurrence of a collision between the robot and the elements of its environment. At the same time all 3D models are defined or exported from the design environment to the simulation environment.

The next step is to integrate of real world simulation (physical models) with the virtual environment, increasing flexibility in robot design. The interactions between real robot (slave) and environment can be attained in advance in a 3D virtual environment (master) [3]. Alternatively, virtual robots in software can be made available so that they can be integrated and controlled by physical device<sup>1</sup>.

The problem in general is commonly decomposed on four stages:

<sup>1</sup> Mehta I., Bimraw K., Chittawadigi R. G., Saha S. K. A teach pendant to control virtual robots in roboanalyzer. In: Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation for Humanitarian Applications, RAHA. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/RAHA.2016.7931881>



- robot designing and building (physical and 3D modeling are realized as parallel process),
- environment 3D model implementation and reconstruction,
- simulation: obstacle detection, collision avoidance and motion planning,
- integration: physical and virtual control, multisensory feedback implementation under virtual (3D) models.

One of the key sub-problems is to define virtual environment. For this purpose laser range scanner is an important modality to generate the highly accurate 3D model of the environment in robotics for the perception of an environment such as object classification, map generation, navigation, etc<sup>2</sup>. Recent tools like 3D laser scanners have been more and more improved and are now able to rapidly generate an accurate dense point clouds<sup>3</sup>. The methods for 3D model generation from measurements, collected by cooperative multiple robots [4]. 3D model of area was created [5] using ultrasonic signal etc. But if the CAD-model for the environment is already defined, so sensor data tracked in real-time by feedback system and are matched to the CAD-model [6].

### Literature Review

The integration process in industry is one of the reasons that modern engineering education and research have preceded more towards the interdisciplinary process. This interdisciplinary field is a cross between mathematics, physics, computer sciences and engineering with high level of integration between the disciplines.

However, the integration of digital and physical models in real-time feedback interaction is relatively new, especially regarding CAD/CAE-systems. However, achieving a balance between digital and

physical worlds is important for both industry and research.

However, this paper aims at infusing the integrated CAD tools (following to paper [7]) into basic engineering courses, using feedback with the physical environment. In this aspect, prior research [8] explored the educational and research framework of mixing physical and CAE environments with haptic devices for Finite Element Method (FEM) learning and research. An additional study [9] examined where contextual real-world modelling exercises have been implemented into CAD courses.

Among educational technologies, in our opinion, project-based learning (PBL) is the best suitable technology for assisting the implementation of our framework into the educational and research process. The paper [10] is a systematic review of PBL as an innovative approach to science and technology teaching. An effective project-oriented approach has been adopted for training mechanical engineers [11].

The purpose of this research is three-fold: (1) to identify a range of methods which will be used to implement the interdisciplinary (physical and virtual) integrated models, (2) to develop the integrated modeling framework, using the interdisciplinary methods, and (3) to apply the mentioned framework for both industry design practice and engineering academia.

### Materials and Methods

Our project encapsulates basic PBL properties and allows students and engineers to see connections among disciplines and to integrate multidisciplinary/interdisciplinary knowledge and methods by using a multi model framework [12].

Therefore, this project has three parts for the student: physical and 3D model-

<sup>2</sup> Singh M. K., Venkatesh K. S., Dutta A. A new method for calibration of range sensor and terrain classification. In: Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Conference on Image Information Processing, ICIIIP. 2015; 520–525. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIIIP.2015.7414828>

<sup>3</sup> Crombez N., Caron G., Mouaddib E. M. Using dense point clouds as environment model for visual localization of mobile robot. In: Proceedings of 12<sup>th</sup> International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, URAI. 2015; 40–45. DOI: <https://doi.org/10.1109/URAI.2015.7358924>

ling, mathematical, algorithmic and program modelling, and the development of the integrated model.

The following aspect of this project consists that the models considered by students have to be directly connected with industrial systems [13–14].

The models and applications of fischertechnik, RoboRobo and Arduino are widely used. Combined with production practice, these models are used to establish the structure of the 3D manipulator system [15]. The results of model meet design requirements. Practice shows that the application of fischertechnik creative integrated model [15–16] and Arduino based<sup>4</sup> are quickly and easily to build medium-sized machinery and equipment. These models significantly reduce the build cycle and system debug, which could help designers quickly implement a variety of design ideas and improvements. Fischer, RoboRobo and Arduino creative integrated models play an impor-

tant role in teaching experiment and engineering applications.

Fig. 1 shows the hierarchical system of the models and metamodels created in an electric car designing process. This mode system includes: 3D virtual model for the electric car, FEM-model [13] for the car frame and the program and physical model for the pilotless control of the mobile robot.

*Problem formulation, physical and 3D modelling*

Let us review two examples and some important facts. First, the framework for physical modelling gives ample opportunities for various tasks and multiple formulations concerning general designing plus the mechanical, mathematical and algorithmic properties of the model. Second, the task formulation substantially extends the basic functionality of the construction sets.

Physical and 3D modelling is implemented by the parallel assembly processes

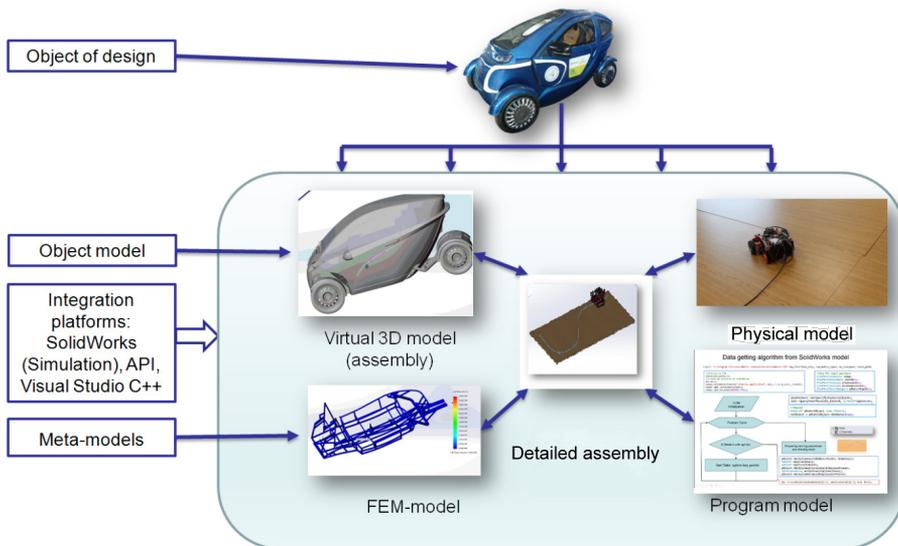


Fig. 1. Integrated model for electric car<sup>5</sup>

<sup>4</sup> Stuja K., Bruqi M., Markl E., Aburaia M. Lightweight educational scara robot for palletizing of USB sticks. Paper presented at the Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium. 2016; 27(1):102–108. DOI: <https://doi.org/10.2507/27th.daaam.proceedings.015>

<sup>5</sup> URL: <https://drive.google.com/file/d/1S8q-9SKehAvEmfeuJ-QFdP3UumvNCROS/view?usp=sharing>



based either the on construction sets from Fischertechnik or RoboRobo in SolidWorks software. Defining the structure of the design solution is a very important and creative process.

*Example 1*

Mobile robot (physical and 3D modelling). The task is formulated as follows: design mobile robot that is tasked with moving along desired path, defined in some environment. A 3D model of the environment for the robot was built previously as part of a common assembly. The results of the first stage of the project are illustrated in fig. 2 for the Fischertechnik construction set as an assembly, created by 2Dvia Composer, as a physical model, photo-view image. The path can be defined in the form of a curve (spline) or as part of free space with a tunnel for the movement in the common 3D model, including this environment and the robot. In this case the desired path is the spline, defined on the desk top model.

*Example 2*

Pitching robot (physical and 3D modelling). The task is formulated as follows: design a pitching robot, tasked with

launching a ball into a ring (a basketball for example). The results of the first stage of the project are illustrated in fig. 3 for the RoboRobo construction set as a physical model and in the form of the PhotoView 3D SolidWorks model image. The model includes a mobile platform, the launching equipment, a homemade range finder based on webcam and a laser pointer.

The range-finder (fig. 3) establishes the distance to the target using the input parameters of velocity of the acceleration disks and the launching angle. The program for the processes of the ball movement is executed both for the virtual and physical balls.

*Mathematical, algorithmic and program modelling*

It is common for well-known mathematical and algorithmic models of geometry and mechanics to be used, including Non-Uniform Rational B-Spline (NURBS)<sup>7</sup>, Solid Mechanics Theory (SMT), FEM, in addition to others. The specified models and methods serve as a basic function of the implemented software (SolidWorks Simulation uses FEM, and SolidWorks Motion uses SMT) and

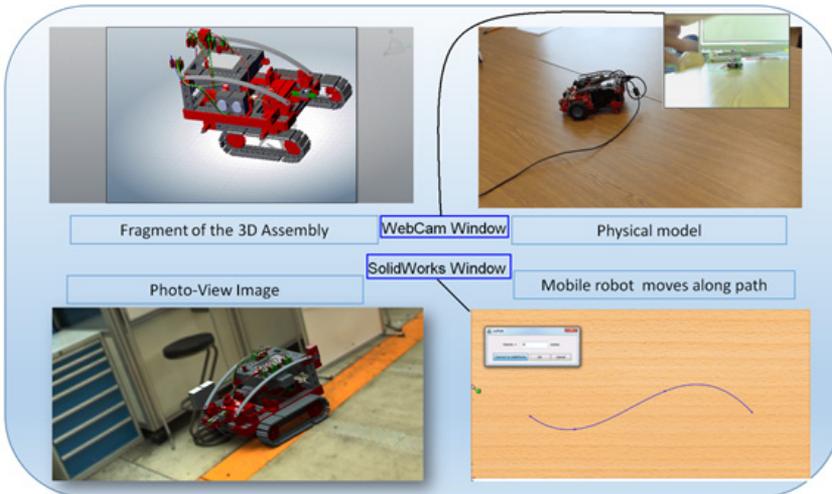


Fig. 2. Integrated model for mobile robot<sup>6</sup>

<sup>6</sup> URL: <https://drive.google.com/file/d/1RrOPWvKsw7j3TadxFZLGO11Ud-ITe6zP/view?usp=sharing>

<sup>7</sup> Reiter A. Time-optimal trajectory planning for redundant robots. Chapter 2, NURBS Curves. Berlin: Springer Verlag, 2016.

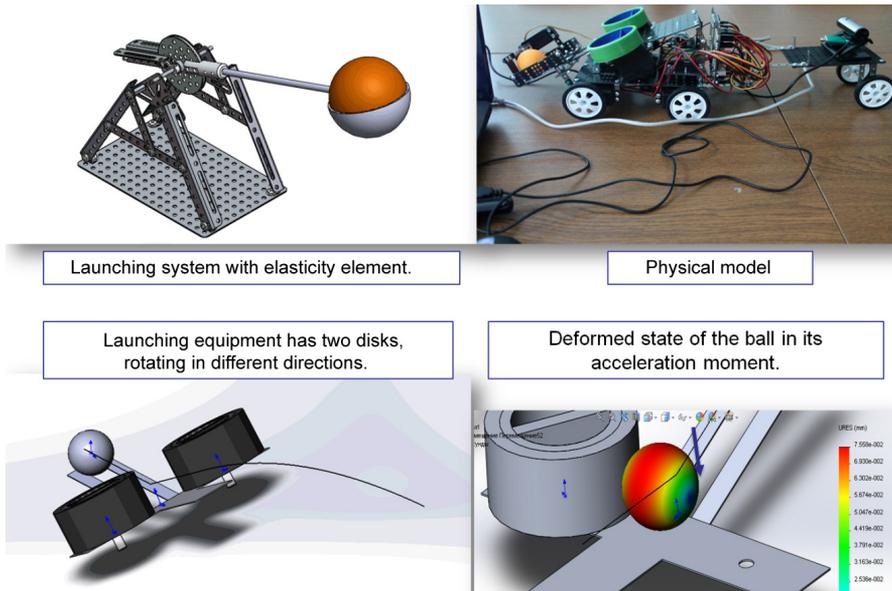


Fig. 3. Integrated model for pitching robot<sup>8</sup>

are provided in the software developed by the authors of this project.

*Example 1*

Mobile robot (mathematical, algorithmic and program modelling). The kinematic scheme of the robot can be either wheeled or tracked. A scheme consists of a platform (frame) with two wheels with independent actuators and two wheels, which are free spinning (fig. 4, a). Our control program is executed through a connection with a Fischertechnik TXT controller via USB, Wi-Fi or Bluetooth, using POSIX sockets (fig. 4, a).

The challenge is to extract the desired path that is defined by NURBS with fixed key points in the SolidWorks sketch (fig. 4, b). To accomplish this, coordinates of the points on the curve are computed using analytical definition of the NURBS-curve<sup>9</sup> by our Stand-Alone or Add-In application and SolidWorks API functions. The program realization of this problem is in detail presented in paper [17], devel-

opment environment is MS Visual Studio 2015 C++, MFC. If the path is known (NURBS curve), a sliding mode control is used to define inputs values of the velocity for the both wheels [18].

*Example 2*

Pitching robot (mathematical, algorithmic and program modelling). The launching equipment has two disks, rotating in different directions, which aim to accelerate the ball at the necessary velocity and at the correct initial launching angle to reach the target (fig. 3). There are two main requirements for the mathematical model, which happen to contradict each other: adequacy (accuracy) and simplicity. Through 3D model and SolidWorks Motion software the students can easily prove their choice of which model to use.

Fig. 3 illustrates the numerical results (SolidWorks Motion): if the disk mass is higher in comparison to the ball mass, the interval of acceleration time for the ball is very small. In this condition, it is possible

<sup>8</sup> URL: <https://drive.google.com/file/d/1agLo8xT0XIJ76EantHMwmAeQnrNRmuRL/view?usp=sharing>

<sup>9</sup> Reiter A. Time-optimal trajectory planning for redundant robots.

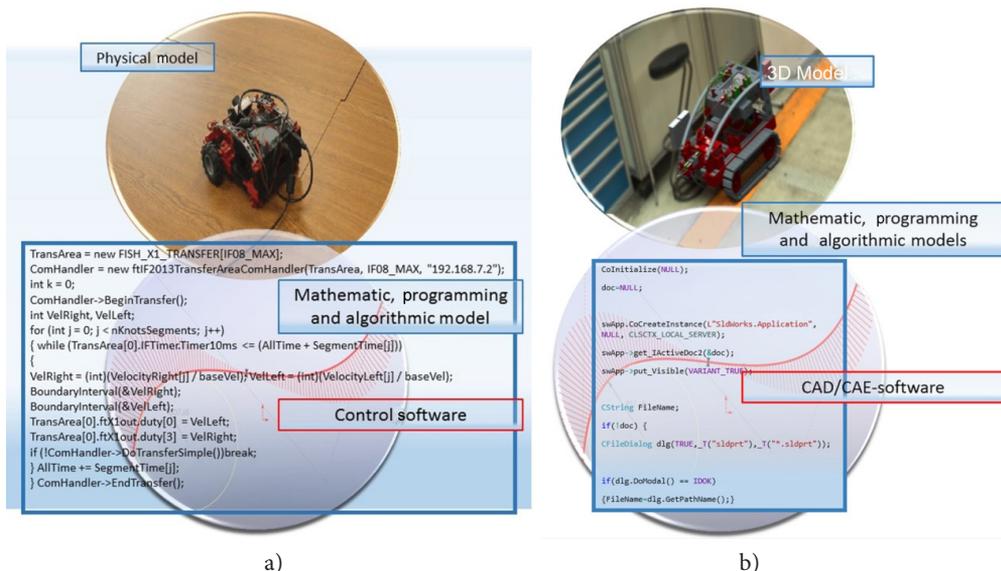


Fig. 4. Physical (a) and 3D (b) models integrated with math and program models

to formulate the mechanics problem only in kinematic terms, with the assumption that the initial velocity of the ball after the disk acceleration is equal to the constant tangent velocity of the disk rim. The parabola trajectory of the ball and the necessary initial parameters have been defined very simply, through the elementary usage of the SMT equation. Additionally, fig. 3 shows the deformed state of the ball in its acceleration moment.

#### *Development of the integrated model*

The main problem is how to develop an integrated system of the models and meta-models, which would provide an opportunity to solve multidisciplinary engineering problems.

Fig. 5 illustrates this approach on example 1 for the mobile robot. The behaviours of the physical and virtual robots are synchronized. The path (SolidWorks spline) is extracted from the complex common model. The control program defines input commands for the movement of both the virtual and the physical robots in a parallel manner. Two windows are used (see example 1, fig. 2): the first is the window corresponding to the webcam of the moving robot; the second is the

window of the SolidWorks software (see animation). Both correspond to moving along a spline that is drawn on the wooden desktop model in the complex 3D assembly. The first case accomplishes this in the SolidWorks Motion software; the second case uses physics calculated by the TXT controller. The path is reconstructed, if the contact sensor data or the webcam red signal has been tracked in real-time by feedback system.

Integrated CAD/CAE tools allow for user to create FEM and kinematic meta-models that help to optimize the design solution (fig. 5). Fig. 6 illustrates this approach for the robot manipulator (the physic model, the 3D model, MS dialog based application controlling the robot by buttons and sliding controls on the dialog panel).

#### **Results**

1. The integrated modeling framework is developed, using the interdisciplinary methods.

2. Mentioned framework has been applied for both industry design practice and engineering academia.

The considered research and design framework is put into practice at the National Research Mordovia State University

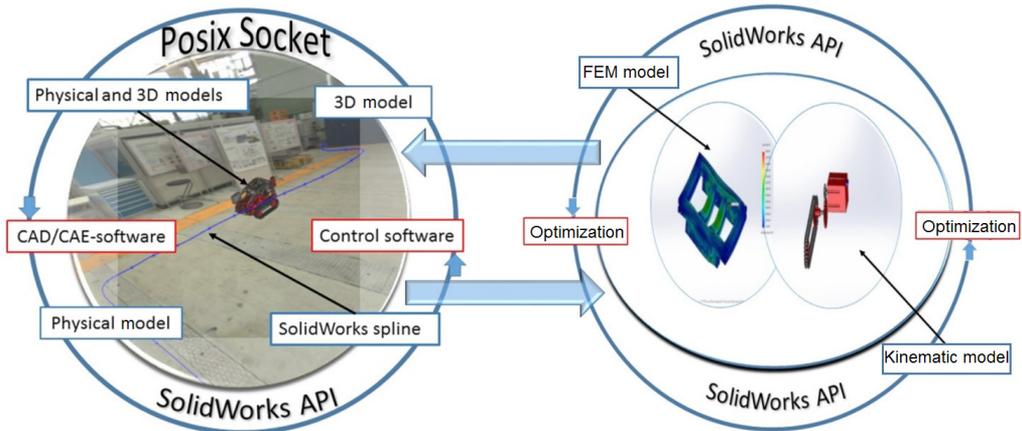


Fig. 5. Integrated model

for the last five years, realized modelling for robotic systems of various types: mobile robots, manipulators etc. (Fig. 6, see animation by referenced link). Among positive results of this approach are the following: an increase in effectiveness of the design process, extending of the designer competences, especially regarding the CAD/CAE-modelling and programming. The actual criterion of the efficiency of this approach is the increasing of number of the users who have successfully passed CSWP certifica-

tion examination SolidWorks Corp. (near 20 percent versus 5 percent before); reducing time spent for development of the project process for the industrial design practice (electric car project, for example, fig. 1).

**Conclusions**

In this paper we study the problem of developing integrated virtual and real world models without web service programming tools.

The modern industrial design and the authorized corporate self-training have

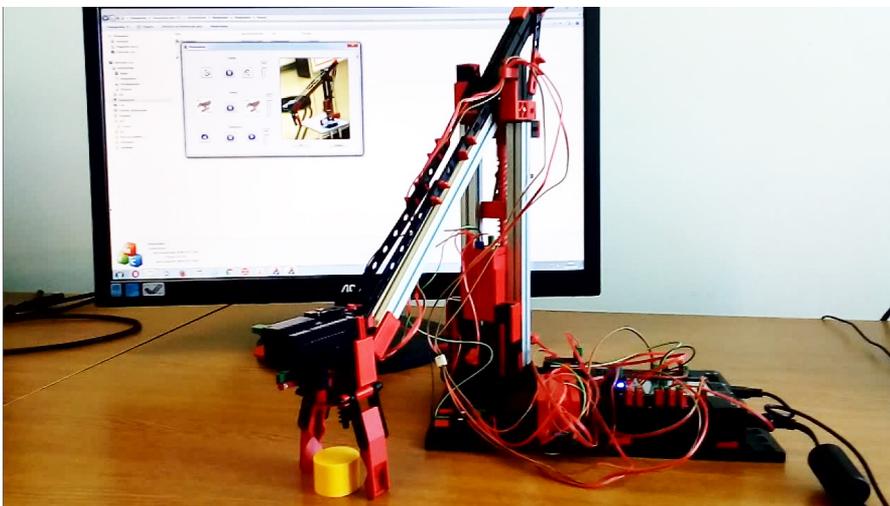


Fig. 6. Integrated educational framework<sup>10</sup>

<sup>10</sup> URL: <https://www.youtube.com/watch?v=8ox0olh8WUU>



proceeded toward the interdisciplinary process and active network interaction. In this regard, the way to extend this research is to use the framework in educa-

tion process such as the learning management system component (LMS, blend form), and in the design process using cloud management systems.

## REFERENCES

1. Baizid K., Ćuković S., Iqbal J., Yousnadj A., Chellali R., Meddahi A., et al. IROSim: Industrial robotics simulation design planning and optimization platform based on CAD and knowledgeware technologies. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2016; 42:121–134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.06.003>
2. Herbuś K., Ociepka P. Determining of a robot workspace using the integration of a CAD system with a virtual control system. Paper Presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016; 145:5. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/145/5/052010>
3. Zhu B., Song A., Xu X., Li S. Research on 3D virtual environment modeling technology for space tele-robot. Paper Presented at the Procedia Engineering. 2015; 99:1171–1178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.700>
4. Kurazume R., Oshima S., Nagakura S., Jeong Y., Iwashita Y. Automatic large-scale three dimensional modeling using cooperative multiple robots. *Computer Vision and Image Understanding*. 2017; 157:25–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2016.05.008>
5. Popelka M., Struska J., Struska M. Using ultrasonic sensors to create 3D navigation model of area with ultrasonic sensors. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*. 2016; 10:82–87. Available at: <http://www.naun.org/main/NAUN/circuitssystemssignal/2016/a222005-251.pdf>
6. Gasteratos A., Beltran C., Metta G., Sandini G. PRONTO: A system for mobile robot navigation via CAD-model guidance. *Microprocessors and Microsystems*. 2002; 26(1):17–26. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0141-9331\(01\)00142-9](https://doi.org/10.1016/S0141-9331(01)00142-9)
7. Peng X., Lin S. B., Zhou J., Kelley J. Infusing computational engineering tools in engineering design sequence curricula. *Computer-Aided Design and Applications*. 2010; 7(2):183–194. DOI: <https://doi.org/10.3722/cadaps.2010.183-194>
8. Ferrise F., Bordegoni M., Marseglia L., Fiorentino M., Uva A. E. Can interactive finite element analysis improve the learning of mechanical behavior of materials? A case study. *Computer-Aided Design and Applications*. 2015; 12(1):45–51. DOI: <https://doi.org/10.1080/16864360.2014.949573>
9. Liu K., Peng X., McGary P., Yalvac B., Ozturk E., Johnson M. D., Valverde L. Integration of contextual exercises in computer-aided design education. *Computer-Aided Design and Applications*. 2015; 12:13–21. DOI: <https://doi.org/10.1080/16864360.2015.1077071>
10. Hasni A., Bousadra F., Belletête V., Benabdallah A., Nicole M., Dumais N. Trends in research on project-based science and technology teaching and learning at K–12 levels: A systematic review. *Studies in Science Education*. 2016; 52(2):199–231. DOI: <https://doi.org/10.1080/03057267.2016.1226573>
11. Cheng W., Wu X., Zhang Z., Liu F., Zhang M., Guo P. Effective project-oriented approach for training professional mechanical engineers in undergraduate education. *International Journal of Mechanical Engineering Education*. 2013; 41(4):289–296. DOI: <https://doi.org/10.7227/IJMEE.41.4.3>
12. Zheng C., Hehenberger P., Le Duigou J., Bricogne M., Eynard B. Multidisciplinary design methodology for mechatronic systems based on interface model. *Research in Engineering Design*. 2017; 28(3):333–356. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00163-016-0243-2>
13. Chugunov M. V., Kechemaykin V. N., Panin M. V., Polunina I. N., Makhrov G. A. Static strength and stiffness analysis for bearing structure elements of electro car BravoEgo. *Naukovedeniye = Scientific Knowledge*. 2016; 8(3):1–22. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/134TVN316.pdf> (In Russ.)
14. Leitão P., Barbosa J. Building a robotic cyber-physical production component. 2016. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-30337-6\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-319-30337-6_27).

15. Tao Z., Wu T., He C. H. Research on mechanical manufacturing with creative design and combination of 3D mechanical manipulator based on Fischer technik. 2014. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.910.366>.

16. Kaneps J., Gerina-Ancane A. Perfection of learning methods for mechatronics basic in mechanical engineering and industrial design studies. Engineering for Rural Development. 2016; 1:597–605. Available at: <http://tf.llu.lv/conference/proceedings2016/Papers/N109.pdf>

17. Chugunov M. V., Schekin A. V. Practical aspects for development of Add-In SolidWorks applications on example of optimization problems. International Journal of Applied Sciences and Engineering Research. 2015; 4(4):494–499.

18. Bessas A., Benalia A., Boudjema F. Integral sliding mode control for trajectory tracking of wheeled mobile robot in presence of uncertainties. Journal of Control Science and Engineering, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/7915375>

*Received 07.12.2017; revised 29.03.2018; published online 29.06.2018*

*About authors:*

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

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

*Authors' contribution:*

M. V. Chugunov – development of technique and software for integrated mechatronics systems building; I. N. Polunina – computer processing, text and graphics editing.

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

*Поступила 07.12.2017; принята к публикации 29.03.2018; опубликована онлайн 29.06.2018*

*Об авторах:*

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

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

*Заявленный вклад соавторов:*

M. V. Чугунов – разработка методики и программного обеспечения для решения задач построения интегрированных моделей мехатронных систем; И. Н. Полунина – расчетные процедуры, компьютерное редактирование текста и графики.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*



## Исследование информативности признаков при распознавании состояний рельсовых линий

Е. М. Тарасов\*, В. Л. Герус, А. Е. Тарасова

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

\*[tarasov53em@yandex.ru](mailto:tarasov53em@yandex.ru)

*Введение.* Многомерность пространства состояний рельсовых линий, близость границ классов из-за воздействия внешних возмущений существенно усложняют задачу распознавания и классификации данных состояний, вследствие чего ее возможно решить только с использованием множества информативных признаков. Вместе с тем расширение априорного алфавита признаков приводит к существенному увеличению экономических потерь для создания сложной системы распознавания, появлению ошибок измерения множества признаков, увеличению времени обработки информации, что отрицательно отражается на распознавании в реальном времени. В работе рассмотрена задача уменьшения размерности пространства признаков распознающей системы состояний рельсовых линий и формирования рабочего множества признаков с определением наиболее информативных сочетаний.

*Материалы и методы.* Оценка информативности признаков осуществлялась методом корреляционных коэффициентов, а также с помощью обученного классификатора с решающей функцией, аргументами которой являлись входные и выходные электрические параметры четырехполосника рельсовой линии. В качестве решающей функции был использован полином Колмогорова-Габора второй степени сложности, обученный решением несовместной системы уравнений. Математические и технические расчеты проводились в программе Mathcad.

*Результаты исследования.* Наиболее информативными первичными признаками для надежной классификации состояний рельсовых линий являются входные и выходные параметры четырехполосника рельсовой линии. При использовании данных признаков все классы надежно распознаются, а функции качества распознавания превышают 1,2.

*Обсуждение и заключения.* Результаты, полученные в ходе исследования, подтверждают возможности подходов при формировании рабочего множества признаков и могут быть использованы при разработке обучаемых классификаторов состояний. Сочетание двух методов позволяет синтезировать сложные, многоуровневые системы распознавания, что является основным вкладом данной работы в развитие принципов распознавания образов.

**Ключевые слова:** информативность признаков, корреляционная функция, критерии качества, решающая функция, рельсовая линия

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

## Study of Informative Value of Features in Rail Condition Monitoring

E. M. Tarasov\*, V. L. Gerus, A. E. Tarasova  
Samara State Transport University (Samara, Russia)

\*tarasov53em@yandex.ru

*Introduction.* The multidimensionality and the proximity of class boundaries due to external disturbances significantly complicate rail condition monitoring. Many informative signs are taken into account during the monitoring. Expansion of the a priori character alphabet in complex recognition system leads to a significant increase in economic losses. The emergence of measurement errors of many features and an increase in the processing time of information worsen the real time monitoring of railways. The article deals with the diminution of the dimensionality of the feature space of the recognizing system in rail condition monitoring and facilitates the formation of a working set of characteristics with the indication of the most informative combinations.

*Materials and Methods.* The informativeness evaluation of the signs was carried out with the help of correlation coefficients and a trained classifier with a decisive function. The arguments of the classifier were the input and output electrical parameters of the four-pole of the rail line. The Kolmogorov-Gabor polynomial of the second degree of complexity, trained by solving an incompatible system of equations, was used as a decisive function. Mathematical and technical calculations were carried out in Mathcad programming.

*Results.* In summary, these results show that the most informative indicators for a reliable classification of rail condition are input and output parameters of the four-port network of the rail line. All classes are reliably recognized. The recognition quality functions exceed 1.2.

*Conclusions.* The results obtained in the study confirm the feasibility of approaches in forming a work set of features. The findings of this article can be used in the development of the principles of pattern recognition.

**Keywords:** informativity of features, correlation function, quality criteria, decisive function, rail line

**For citation:** Tarasov E. M., Gerus V. L., Tarasova A. E. Study of Informative Value of Features in Rail Condition Monitoring. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(2):191–206. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.191-206>

### Введение

Выделение наиболее информативных признаков – одна из важнейших задач при построении распознающих систем. Размерность признакового пространства зависит от разделяющих свойств признаков: чем информативнее признаки для конкретного образа или класса, тем меньше размерность признакового пространства [1].

Однако до настоящего времени отсутствует формальное решение задачи формирования множества признаков, полностью удовлетворяющее высоким требованиям к распознающим системам в транспорте. Процедура формирования информативного множества признаков

иногда затрудняется зашумленностью некоторых наиболее информативных признаков или невозможностью измерить их прямыми методами. Поэтому в неформальных подходах при формировании множества рассматривается несколько путей решения проблемы. Согласно одному из них, информативность признаков для распознавания состояний объектов определяется через исследование качества распознавания, проведенного с использованием выбранных признаков<sup>1</sup>. Согласно другому, качество признаков определяется исходя из свойств признаков, составляющих образы, без учета распознающих свойств классификатора. Существует два пути формирования множества:

<sup>1</sup> Robust recognition via information theoretic learning / R. He [et al.]. Cham : Springer, 2014. 120 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07416-0>



1) с самого начала ведется поиск малого числа признаков с большей информативностью;

2) из большого числа исходных признаков отбираются наиболее полезные для распознавания признаки, и размерность существенно уменьшается.

Ценным свойством описанных подходов является возможность снизить размерность вектора измерений при удачном выборе первичного алфавита признаков [2].

Итак, формально поставленная задача выбора признаков трактуется следующим образом: имеется первичный алфавит признаков  $X = R^N$ , на его основе требуется построить рабочее множество признаков  $X' = R^n$  размерности  $n$  и отображение  $F: X \rightarrow X'$ , обладающие требуемыми свойствами или являющиеся в каком-то смысле оптимальными<sup>2</sup>.

Обозначенная проблема минимизации множества признаков особенно ярко проявляется при построении классификаторов состояний рельсовых линий с множеством информативных признаков и решающих функций.

Приведем наиболее распространенную в настоящее время классификацию рельсовых состояний<sup>3</sup>:

– I класс (нормальный режим) соответствует свободному и исправному состоянию рельсовых линий участка контроля;

– II класс (шунтовой режим) соответствует занятому поездом состоянию рельсовых линий участка контроля;

– III класс (контрольный режим) соответствует свободному, но неисправному состоянию рельсовых линий участка контроля.

Для построения эффективной системы распознавания состояний рельсовых линий образы, описывающие каждый класс в любой момент времени, должны быть схожими между собой и иметь достаточно близкие значения, но из-за воздействия внешних факторов значения некоторых признаков в образах различных классов могут быть почти идентичными [3–4]. Поэтому предпочтительными будут признаки, индивидуально сгруппированные для каждого класса образов. Другими словами, признаки  $i$ -го класса должны существенно отличаться от признаков  $j$ - и  $k$ -го классов, а этого при классификации состояний рельсовых линий возможно добиться увеличением размерностей алфавита первичных признаков.

Важнейшей особенностью при разработке распознающего устройства состояний рельсовых линий является то, что значения измеренных признаков, составляющих вектор или образ состояний  $X_i = x_1, x_2, \dots, x_p$ , неизбежно подвержены влиянию изменений первичных параметров рельсовых линий вследствие механических и электромагнитных воздействий. Данные воздействия искажают информацию признаков, и это сказывается на всех стадиях процесса, от формирования результатов измеренных значений до классификации состояний решающими функциями  $d_i = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{pn})^{4-5}$  [5].

<sup>2</sup> **Потапов А. С.** Распознавание образов и машинное восприятие: общий подход на основе принципа минимальной длины описания. СПб. : Политехника, 2007. 548 с. URL: [http://aideus.com/research/doc/2007\\_Polytech\\_MDL-book.pdf](http://aideus.com/research/doc/2007_Polytech_MDL-book.pdf)

<sup>3</sup> **Тарасов Е. М.** Инвариантные классификаторы состояний рельсовых линий для систем интервального управления движением поездов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Самара, 2004. 32 с. URL: <http://www.dissercat.com/content/invariantnye-klassifikatory-sostoyanii-relovykh-linii-dlya-sistem-intervalnogo-upravleniya->

<sup>4</sup> **Dougherty G.** Pattern recognition and classification: an introduction. New York : Springer, 2013. 207 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5323-9>

<sup>5</sup> **Бузенков И. И., Тюфанова А. А., Чернышева Е. М.** Применение метода многопараметрического распознавания образов для диагностики технического состояния радиорелейного оборудования системы управления движением судов // Технические науки в России и за рубежом : матлы VII Междунар. науч. конф. М. : Буки-Веди, 2017. С. 115–120. URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/286/13067>

Поэтому при формировании множества необходимо учесть особенность различной реакции первичных информативных признаков на внешние воздействия, а при синтезе классификатора состояний рельсовых линий – в первую очередь определить оптимальный набор признаков, квазиинвариантных к внешним воздействиям и обеспечивающих максимальное качество распознавания.

Целью работы является разработка методики анализа информативности признаков на содержательном уровне без учета системы распознавания, а также с учетом обученной системы распознавания с решающими функциями и рекомендациями по формированию рабочего множества признаков.

### **Обзор литературы**

Одной из основных задач при формировании рабочего множества признаков является преобразование первичной информации для удобства кластеризации. В результате такого преобразования расстояния между образами (кластерами) максимизируются, а между значениями признаков внутри классов – минимизируются, т. е. образы становятся более компактными и обладающими более четкими границами классов [6]. При этом, как правило, стремятся также уменьшить размерность пространства признаков, исключая межклассовые признаки, не несущие полезной информации для классификации [7]. В интуитивном понимании образы одного класса должны быть идентичны или иметь практически одинаковые значения ряда признаков. Однако при этом могут присутствовать признаки, довольно сильно отличающиеся внутри образов и поразному характеризующие различные классы образов.

Для количественных признаков характерна погрешность измерения, поэтому признакам присваиваются коэффициенты, максимизирующие средние расстояния между образами различных классов и минимизирующие расстоя-

ния между образами одного и того же класса [8]. При статистической и вероятностной оценке информативности и кластеризации интересны методики, раскрытые в работах [9–10], суть которых заключается в оценке плотности распределения. Находятся пики плотности, которые принимаются за центры кластеров или образов, и вокруг данных пиков группируются остальные признаки. Представляет определенный интерес статья [11], где рассматривается адаптивный алгоритм формирования признаков, полученный за счет развития теории распознавания информации на основе модифицированного метода Хаусдорфа путем коррекции координат шаблонов подсистемы формирования образов (кластеров).

Вместе с тем, несмотря на множество методик и алгоритмов группировки признаков, а также способов первичного преобразования исходных данных, при решении практических задач распознавания классов, не допускающих ошибки распознавания, их применимость ограничена, поскольку для построения системы классификации или обучения классификаторов требуются огромные массивы данных.

Решение задачи оценки информативности признаков должно включать также ранжировку признаков. Если признаки независимые, то вычисляя ошибку распознавания для группы  $N$  признаков, включающей  $i$ -ый признак, а затем для группы без этого признака и сравнивая полученные вероятности ошибок, можно определить, следует ли использовать данный признак. После подобного определения информативности каждого признака выбираются признаки с большей информативностью.

Если признаки зависимые, то процесс ранжировки признаков выполняется по следующему алгоритму:

1) все  $N$  признаков исключаются поочередно, как в процедуре, описанной выше;



2) в оставшемся пространстве ( $N-1$ ) признаков исследуется критерий качества распознавания;

3) исключается признак, отсутствие которого оказывает наименьшее влияние на величину критерия;

4) в результате поочередного исследования остальных ( $N-1$ ) признаков исключается следующий признак;

5) процесс ранжировки повторяется ( $N-1$ ) раз.

В качестве меры информативности в алгоритме могут использоваться системные энтропийные меры оценки информативности признаков распознавания<sup>6</sup> [12–13]. Признаки, уменьшающие неопределенность заданной ситуации, считаются более информативными, чем признаки, которые приводят к увеличению неопределенности распознавания или никак на нее не влияют. Поэтому энтропию можно считать мерой неопределенности, и предпочтительным правилом является выбор признаков, обеспечивающих минимум энтропии границ рассматриваемых классов [14].

Для решения вопросов пренебрежения некоторыми признаками из множества (отнесенными к помехам) предложен ряд способов «элиминирования» признаков.

Согласно [15–16], селекция признаков осуществляется в результате анализа коэффициента корреляции между значением признака и некоторым порогом класса, заданным ранее. По величине коэффициента корреляции элиминируются второстепенные, незначительные признаки. Е. А. Патрик в фундаментальной работе<sup>7</sup> предложил 6 способов понижения размерности пространства признаков: рассмотрение

локального понижения размерности в подпространствах, составляющих образы некоторого класса, изменение проекции пространства признаков, линейное преобразование и др. Однако из-за большого разнообразия операций преобразования приемы не вписываются в единую формализованную математическую процедуру. А. Г. Ивахненко<sup>8</sup> предложил осуществлять упорядочение признаков оценкой дисперсии: чем больше дисперсия признака, тем меньше надежность распознавания, и наоборот, поэтому признаки с малой дисперсией более ценны для распознавания.

В работе И. А. Борисова<sup>9</sup> процесс селекции осуществляется по следующему алгоритму:

1) формируются классы;

2) на основе экспертного анализа составляется первоначальное множество признаков;

3) оцениваются ошибки классификации;

4) из признакового пространства исключаются поочередно признаки и по величине ошибки формируется рабочее множество признаков.

В статье [17] рассмотрено преобразование признаков путем бинаризации по порогу. Величина порога задается видом самого процесса, и как правило, бинаризация происходит при алгоритме аддитивного выбора порога. Например, в качестве алгоритма предлагается выбор математического ожидания или моды, а также наибольшего пика гистограммы признака.

Результаты анализа научных источников свидетельствуют о недостаточной проработанности вопросов в об-

<sup>6</sup> Tou J. T. Advances in information system science. New York : Plenum Press, 1970. Vol. 3. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4615-8243-4>

<sup>7</sup> Patrick E. A. Fundamentals of pattern recognition. New Jersey : Prentice-Hall, 1972. 408 p.

<sup>8</sup> Ивахненко А. Г. Самообучающиеся системы распознавания и автоматического управления. Киев : Техника, 1969. 392 с. URL: <http://urss.ru/cgi-bin/db.pl?lang=Ru&blang=ru&page=Book&id=118407>

<sup>9</sup> Сходство и компактность / И. А. Борисова [и др.] // Математические методы распознавания образов : доклады XIV Всерос. конф. М. : МАКС Пресс, 2009. С. 89–92. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004396120>

ласти исследования информативности первичных признаков и формирования множества образов, не допускающих пересечения классов; в области исследования информативных признаков при распознавании состояний рельсовых линий исследования практически отсутствуют.

### **Материалы и методы**

В современных системах распознавания состояния рельсовых линий классифицируются по информации одного признака, уровню напряжения на выходе рельсового четырехполюсника или уровню тока на его входе. Поскольку системы классификации состояний рельсовых линий функционируют в условиях воздействия значительных динамических нагрузок и индустриальных помех, классификация по значению одного признака приводит к ошибкам распознавания. Неисправное состояние (например, лопнувший рельс) из-за высокой проводимости изоляции рельсовых линий приводит к ложной классификации, т. е. возможно определение состояния рельсовой линии как исправного и свободного при фактически неисправном [18]. Поэтому прежде чем приступить к построению решающей функции классификатора, необходимо значительно расширить множество признаков для распознавания состояний рельсовых линий, но при этом решить задачу выделения наиболее информативных признаков, инвариантных к воздействию возмущений.

Существует два основных метода к оценке информативности (полезности) признаков, приемлемых для синтеза классификаторов состояний рельсовых линий<sup>10</sup>. В одном из них выбор признаков осуществляется безотносительно к тому, где и как эти признаки в даль-

нейшем будут использоваться, т. е. вне системы распознавания. Другой метод предполагает оценку информативности с участием системы распознавания, т. е. обучение классификатора осуществляется с использованием набора признаков, после чего с помощью определенного критерия оценивается информативность каждого из этих признаков.

Данные подходы не противоречат, а дополняют друг друга, поскольку на первом этапе считается, что принадлежность признаков к классам неизвестна, и селекция признаков для формирования множества осуществляется по степени их идентичности или взаимосвязи, т. е. происходит элиминирование (первичная обработка) признаков, которые затем, на втором этапе, могут использоваться при распознавании. Для этого применяется обучающая выборка образов, составленная из прошедших селекцию признаков. Данный подход практикуется в сложных, многоуровневых системах распознавания.

Поскольку признаки, вошедшие в текущие образы состояний, могут иметь различную физическую природу и диапазоны изменений (например, при распознавании состояний рельсовых линий используются амплитуды напряжений и токов, фазы токов и напряжений с различными диапазонами изменений), то в целях удобства работы с решающими функциями значения признаков необходимо нормировать, т. е. выразить через безразмерные величины по формуле<sup>11</sup>:

$$\hat{x}_i^j = \frac{x_i^j}{\bar{x}_i}, \quad (1)$$

где  $\hat{x}_i^j$  – нормированное  $i$ -ый признак;  $\bar{x}_i$  – среднее значение признака.

<sup>10</sup> Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. М. : Мир, 1978. 412 с. URL: <https://www.twirpx.com/file/30410>

<sup>11</sup> Ивахненко А. Г. Самообучающиеся системы распознавания и автоматического управления. Киев : Техника, 1969. 392 с. URL: <http://urss.ru/cgi-bin/db.pl?lang=Ru&blang=ru&page=Book&id=118407>



При реализации первого метода оценки информативности (полезности) признаков в качестве меры использованы корреляционные функции<sup>12</sup> [15; 19], которые позволяют установить взаимосвязь пар признаков  $x_{1i}$  и  $x_{2i}$  из множества  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ . С этой целью необходимо рассмотреть попарную комбинацию признаков в каждой строке матрицы (2), составленную из значений признаков путем моделирования или измерения:

$$\widehat{X} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Сочетания пар признаков представлены на рис. 1.

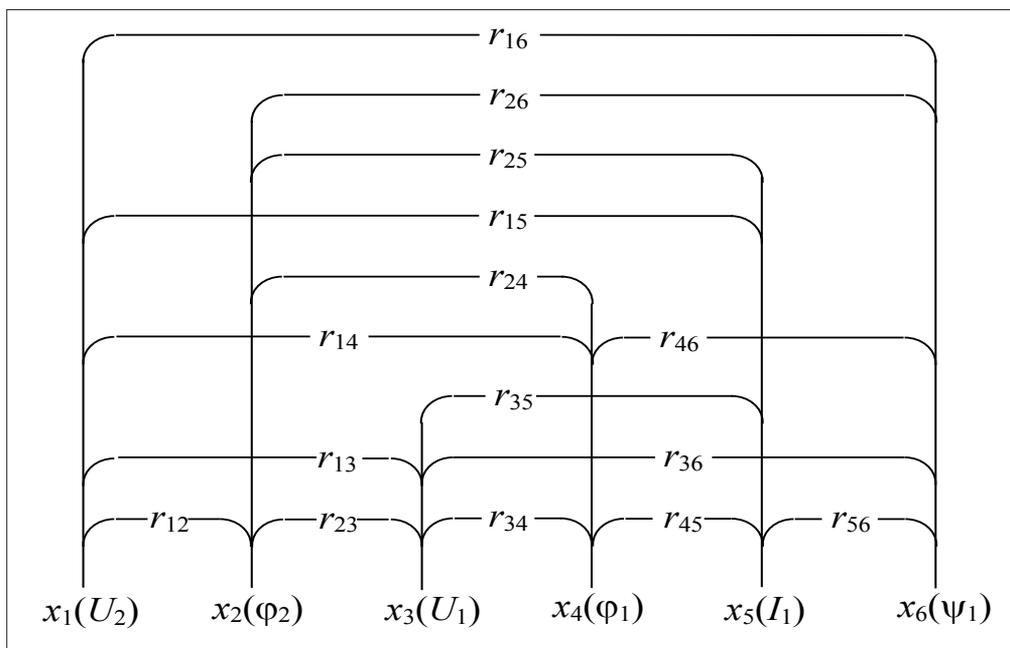
Коэффициентом корреляции двух рассмотренных последовательностей является величина<sup>13</sup>:

$$r_{x_1 x_2} = \frac{1}{n\sigma_{x_1}\sigma_{x_2}} \sum_{i=1}^n (x_{1i} - \bar{x}_1)(x_{2i} - \bar{x}_2), \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4)$$

где  $n$  – количество признаков в рассматриваемой последовательности;  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение;  $\bar{x}$  – среднее значение признаков.

Значение  $r_{ij} \approx 1$  указывает на однозначную детерминированную зависимость между рассматриваемыми признаками, причем один из признаков не несет информации о распознаваемом образе. Другими словами, данный признак является лишним во множестве, а при



Р и с. 1. Комбинация попарного сочетания признаков

F i g. 1. Combination of pairwise conjunction of signs

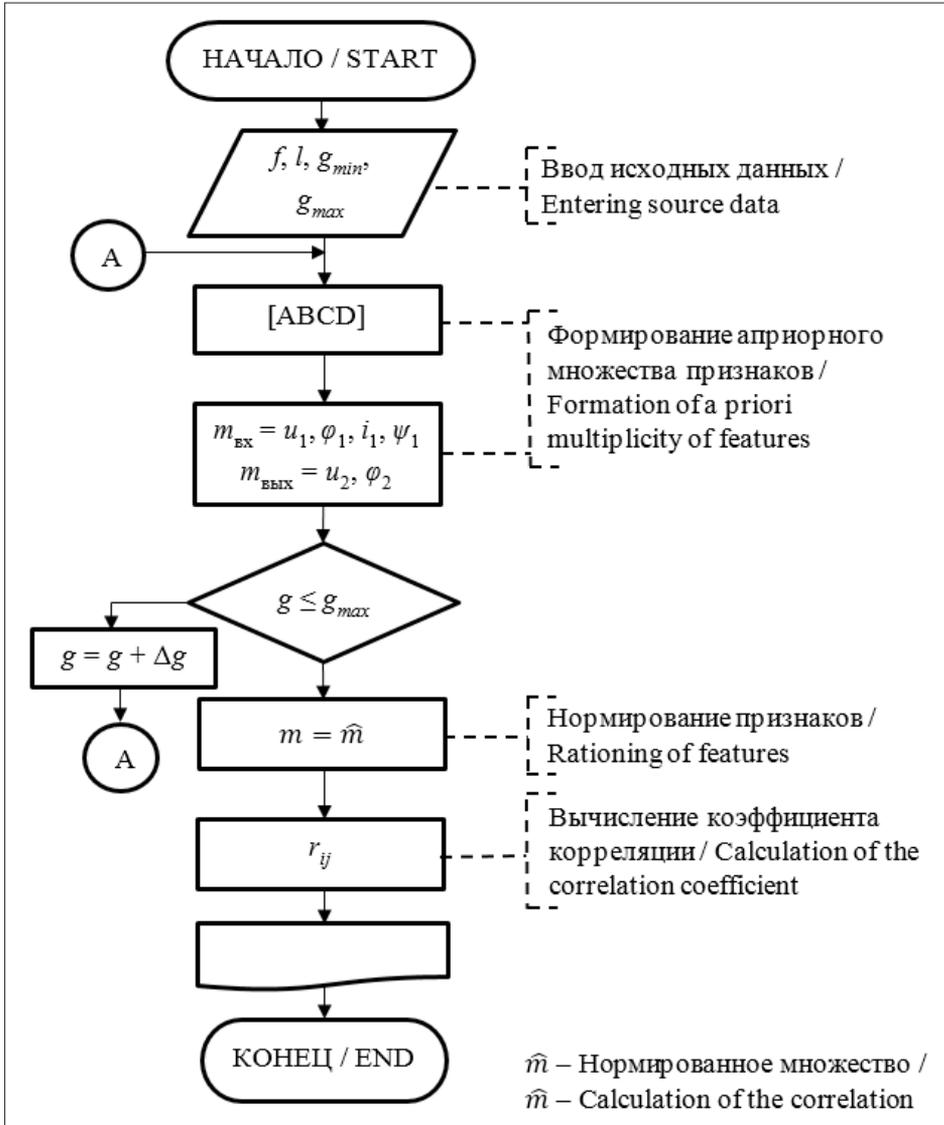
<sup>12</sup> Там же.

<sup>13</sup> Там же.

$r < 1$  указывает на отсутствие зависимости между признаками, и пара признаков включается во множество<sup>14</sup>. При этом в последовательностях  $\{x_1\}$

и  $\{x_2\}$  не исключаются повторяющиеся значения.

На рис. 2. представлена блок-схема машинной программы исследования се-



Р и с. 2. Алгоритм исследования корреляционной связи информативных признаков  
 F i g. 2. The algorithm of the correlation of informative features research

<sup>14</sup> Тарасов Е. М. Инвариантные классификаторы состояний рельсовых линий для систем интервального управления движением поездов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Самара, 2004. 32 с. URL: <http://www.dissercat.com/content/invariantnye-klassifikatory-sostoyanii-relsovykh-linii-dlya-sistem-intervalnogo-upravleniya->



лекции, реализованная в среде MATLAB и состоящая из следующих последовательностей:

- определение коэффициентов  $[A]$  матрицы рельсового четырехполюсника;
- формирование информационной матрицы  $(X)$  первичных признаков;
- нормирование коэффициентов матрицы;
- вычисление коэффициента взаимной корреляции.

Второй метод формирования множества признаков, как указывалось выше, предлагает осуществлять оценку информативности с помощью решающих функций и процедуры обучения<sup>15</sup>. Для этого выбирается минимальное количество признаков  $n = 2$ , вид решающей функции, ее сложность (для практической цели – полином второй степени), производится обучение решающей функции, после чего осуществляется оценка качества распознавания. Затем меняется один из используемых признаков, и процедура повторяется. Если качество распознавания с использованием первой пары признаков выше, чем со второй, то первая пара включается во множество, а процедура повторяется до тех пор, пока не произойдет перебор всего первичного алфавита признаков.

Покажем эффективность подхода с использованием первичного алфавита признаков, состоящего из комплексных амплитуд токов и напряжений на входе и выходе рельсового четырехполюсника. Необходимо учесть, что комплексные амплитуды выходного тока исключаются из рассмотрения, поскольку четырехполюсник рельсовой линии нагружен на входной импеданс классификатора, имеющий постоянную величину, поэтому характер изменения комплексной амплитуды напряжения и тока на выходе рель-

сового четырехполюсника совпадает [20–21].

В качестве решающей функции во втором методе использовался полином Колмогорова-Габора, который в общем случае имеет вид<sup>16</sup>:

$$d(X) = C_0 + \sum_{i=1}^n C_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n C_{ijk} x_i x_j x_k + \dots, \quad (5)$$

где  $C_0, C_i, C_{ij}, C_{ijk}$  – коэффициенты полинома;  $x_i, x_j, x_k$  – информативные признаки.

Количество парных сочетаний из обозначенных шести признаков  $X = \{U_1, \varphi_1, I_1, \psi_1, U_2, \varphi_2\}$  равно:

$$C_N^n = \frac{N!}{n!(N-n)!} = \frac{6!}{2!(6-2)!} = 15. \quad (6)$$

Следовательно, на основании (5) и рис. 3, а также с учетом  $x_1 \rightarrow U_2, x_2 \rightarrow \varphi_2, x_3 \rightarrow U_1, x_4 \rightarrow \varphi_1, x_5 \rightarrow I_1, x_6 \rightarrow \psi_1$  решающие функции при всех сочетаниях имеют вид:

$$f_1(U_2, \varphi_2) = C_0 + C_1 U_2 + C_2 \varphi_2 + C_3 U_2 \varphi_2 + C_4 U_2^2 + C_5 \varphi_2^2 + C_6 U_2^2 \varphi_2 + C_7 U_2 \varphi_2^2 + C_8 U_2^2 \varphi_2^2;$$

$$f_2(U_2, U_1) = C_0 + C_1 U_2 + C_2 U_1 + C_3 U_2 U_1 + C_4 U_2^2 + C_5 U_1^2 + C_6 U_2^2 U_1 + C_7 U_2 U_1^2 + C_8 U_2^2 U_1^2;$$

$$f_3(U_2, \varphi_1) = C_0 + C_1 U_2 + C_2 \varphi_1 + C_3 U_2 \varphi_1 + C_4 U_2^2 + C_5 \varphi_1^2 + C_6 U_2^2 \varphi_1 + C_7 U_2 \varphi_1^2 + C_8 U_2^2 \varphi_1^2;$$

$$f_4(U_2, I_1) = C_0 + C_1 U_2 + C_2 I_1 + C_3 U_2 I_1 + C_4 U_2^2 + C_5 I_1^2 + C_6 U_2^2 I_1 + C_7 U_2 I_1^2 + C_8 U_2^2 I_1^2;$$

$$f_5(U_2, \psi_1) = C_0 + C_1 U_2 + C_2 \psi_1 + C_3 U_2 \psi_1 + C_4 U_2^2 + C_5 \psi_1^2 + C_6 U_2^2 \psi_1 + C_7 U_2 \psi_1^2 + C_8 U_2^2 \psi_1^2;$$

<sup>15</sup> Bishop C. Pattern recognition and machine learning. New York : Springer, 2006. 738 p. URL: <http://www.springer.com/us/book/9780387310732>

<sup>16</sup> Tarasov E. M., Isaicheva A. G. Technique of measurement of ultralow resistance of current conductive junction of rail lines as the problem of states object identification // Proceedings of Information Technology and Nanotechnology, CEUR Workshop Proceedings. 2015. P. 397–401. DOI: <https://doi.org/10.18287/1613-0073-2015-1490>

$$f_6(\varphi_2, U_1) = C_0 + C_1\varphi_2 + C_2U_1 + C_3\varphi_2U_1 + C_4\varphi_2^2 + C_5U_1^2 + C_6\varphi_2^2U_1 + C_7\varphi_2U_1^3 + C_8\varphi_2^2U_1^2;$$

$$f_7(\varphi_2, \varphi_1) = C_0 + C_1\varphi_2 + C_2\varphi_1 + C_3\varphi_2\varphi_1 + C_4\varphi_2^2 + C_5\varphi_1^2 + C_6\varphi_2^2\varphi_1 + C_7\varphi_2\varphi_1^2 + C_8\varphi_2^2\varphi_1^2;$$

$$f_8(\varphi_2, I_2) = C_0 + C_1\varphi_2 + C_2I_1 + C_3\varphi_2I_1 + C_4\varphi_2^2 + C_5I_1^2 + C_6\varphi_2^2I_1 + C_7\varphi_2I_1^2 + C_8\varphi_2^2I_1^2;$$

$$f_9(\varphi_2, \psi_1) = C_0 + C_1\varphi_2 + C_2\psi_1 + C_3\varphi_2\psi_1 + C_4\varphi_2^2 + C_5\psi_1^2 + C_6\varphi_2^2\psi_1 + C_7\varphi_2\psi_1^2 + C_8\varphi_2^2\psi_1^2;$$

$$f_{10}(U_1, \varphi_1) = C_0 + C_1U_1 + C_2\varphi_1 + C_3U_1\varphi_1 + C_4U_1^2 + C_5\varphi_1^2 + C_6U_1^2\varphi_1 + C_7U_1\varphi_1^2 + C_8U_1^2\varphi_1^2;$$

$$f_{11}(U_1, I_1) = C_0 + C_1U_1 + C_2I_1 + C_3U_1I_1 + C_4U_1^2 + C_5I_1^2 + C_6U_1^2I_1 + C_7U_1I_1^2 + C_8U_1^2I_1^2;$$

$$f_{12}(U_1, \psi_1) = C_0 + C_1U_1 + C_2\psi_1 + C_3U_1\psi_1 + C_4U_1^2 + C_5\psi_1^2 + C_6U_1^2\psi_1 + C_7U_1\psi_1^2 + C_8U_1^2\psi_1^2;$$

$$f_{13}(\varphi_1, I_1) = C_0 + C_1\varphi_1 + C_2I_1 + C_3\varphi_1I_1 + C_4\varphi_1^2 + C_5I_1^2 + C_6\varphi_1^2I_1 + C_7\varphi_1I_1^2 + C_8\varphi_1^2I_1^2;$$

$$f_{14}(\varphi_1, \psi_1) = C_0 + C_1\varphi_1 + C_2\psi_1 + C_3\varphi_1\psi_1 + C_4\varphi_1^2 + C_5\psi_1^2 + C_6\varphi_1^2\psi_1 + C_7\varphi_1\psi_1^2 + C_8\varphi_1^2\psi_1^2;$$

$$f_{15}(I_1, \psi_1) = C_0 + C_1I_1 + C_2\psi_1 + C_3I_1\psi_1 + C_4I_1^2 + C_5\psi_1^2 + C_6I_1^2\psi_1 + C_7I_1\psi_1^2 + C_8I_1^2\psi_1^2.$$

(7)

Количественная оценка качества распознавания, а следовательно, информативность участвующей пары признаков, составляющих образы состояний по второму методу, включаемому в анализ систему распознава-

ния, осуществляется с использованием функции качества разделения классов<sup>17-18</sup> [3]:

$$K_{NS} = \frac{\inf d(x_1, x_2, \dots, x_n)_N}{\sup d(x_1, x_2, \dots, x_n)_S} \Big|_{P_N > P_S},$$

$$\forall (x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где  $K_{NS}$  – критерий распознавания I и II классов;  $\inf d(x_1, x_2, \dots, x_n)_N$  – минимальное пороговое значение решающей функции I класса;  $\sup d(x_1, x_2, \dots, x_n)_S$  – максимальное пороговое значение решающей функции II класса.

$$K_{SK} = \frac{\inf d(x_1, x_2, \dots, x_n)_S}{\sup d(x_1, x_2, \dots, x_n)_K} \Big|_{P_S > P_K},$$

$$\forall (x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где  $K_{SK}$  – критерий распознавания II и III классов;  $\inf d(x_1, x_2, \dots, x_n)_S$  – минимальное пороговое значение решающей функции II класса;  $\sup d(x_1, x_2, \dots, x_n)_K$  – максимальное пороговое значение решающей функции III класса.

### Результаты исследования

С помощью Mathcad были проведены исследования взаимокорреляционных коэффициентов пар признаков. При моделировании и исследовании были приняты следующие допущения: длина рельсовой линии – 2 км, частота сигнального тока опроса рельсовых линий – 25 Гц. Результаты исследований представлены на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что взаимокорреляционный коэффициент пар признаков  $r_{12}$  ( $U_2$  и  $\varphi_2$ ) имеет наименьшую величину, равную 0,42, поэтому данная пара считается наиболее информативной, и при создании системы распоз-

<sup>17</sup> Тарасов Е. М. Инвариантные классификаторы состояний рельсовых линий для систем интервального управления движением поездов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Самара, 2004. 32 с. URL: <http://www.disscat.com/content/invariantnye-klassifikatory-sostoyanii-relsovykh-linii-dlya-sistem-intervalnogo-upravleniya>

<sup>18</sup> Ивахненко А. Г. Самообучающиеся системы распознавания и автоматического управления. Киев : Техника, 1969. 392 с. URL: <http://urss.ru/cgi-bin/db.pl?lang=Ru&blang=ru&page=Book&id=118407>



навания рационально использовать сочетание признаков  $U_2$  и  $\varphi_2$ . Следующей парой признаков, имеющей наименьший коэффициент корреляции, является фаза тока на входе и напряжения на выходе рельсовой линии, у которой значение взаимокорреляционного коэффициента равно 0,48. При синтезе более сложной решающей функции с тремя признаками – аргументами, следовательно, необходимо использовать амплитуды и фазы напряжения на выходе рельсовой линии, а также фазы тока на ее входе. Остальные сочетания, как видно на рис. 3, имеют высокий коэффициент корреляции  $\approx 1$ , поэтому их следует исключить из множества.

Рассмотренный подход осуществляет классификацию на первичном, признаком уровне. Более сложные системы и алгоритмы распознавания предполагают использование решающих функций и обучение классификатора.

При исследовании информативности вторым методом с использованием

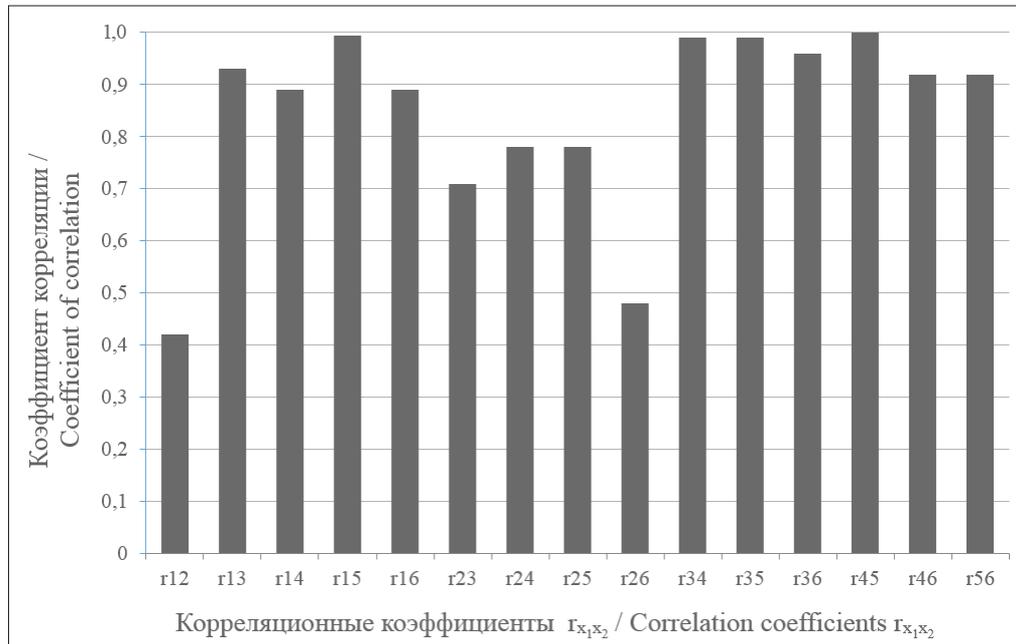
решающих функций, согласно (7), парное сочетание признаков имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} d_1 &= f(U_2, \phi_2); & d_2 &= f(U_1, U_2); & d_3 &= f(U_2, \phi_1); \\ d_4 &= f(U_2, \psi_1); & d_5 &= f(U_2, I_1); & d_6 &= f(\phi_2, U_1); \\ d_7 &= f(\phi_2, \phi_1); & d_8 &= f(\phi_2, I_1); & d_9 &= f(\phi_2, \psi_1); \\ d_{10} &= f(U_1, \phi_1); & d_{11} &= f(U_1, I_1); & d_{12} &= f(U_1, \psi_1); \\ d_{13} &= f(\phi_1, I_1); & d_{14} &= f(\phi_1, \psi_1); & d_{15} &= f(I_1, \psi_1). \end{aligned} \right\}$$

Решающее правило при оценке информативности по второму методу звучит следующим образом: те сочетания признаков, при использовании которых решающая функция имеет максимальное значение критериев качества распознавания, являются наиболее информативными.

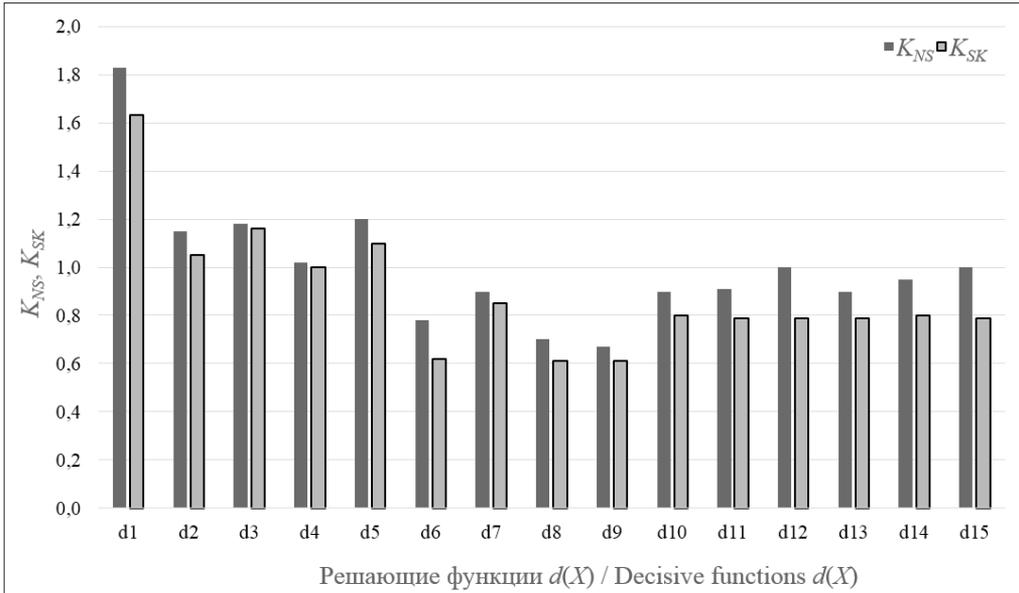
На рис. 4. представлены результаты анализа качества распознавания классов двумерными образами с использованием полинома Колмогорова-Грабара в качестве решающей функции.

Согласно требованиям обеспечения безопасности движения поездов,



Р и с. 3. Значения взаимокорреляционного коэффициента

F i g. 3. Values of the correlation coefficient



Р и с. 4. Значения функций качества разделения двумерными образами  
F i g. 4. Values of separation quality functions by two-dimensional images

критерий разделения классов должен иметь значения  $K_{NS}$  и  $K_{SK} \geq 1,1-1,2$ , т. е. границы классов должны быть четкими, и классы никогда не должны пересекаться. И сочетания признаков, используемые в решающей функции обученного классификатора и позволяющие правильно распознавать классы, обладают характерными свойствами и наиболее информативны. Такими сочетаниями при распознавании I и II классов, согласно рис. 4, являются  $d_1$  ( $K_{NS} = 1,8638$ ;  $K_{SK} = 1,4799$ ) и  $d_3$  ( $K_{NS} = 1,1637$ ;  $K_{SK} = 1,1170$ ). Данные сочетания обеспечивают инвариантность к возмущающим воздействиям, поскольку диапазон изменения проводимости изоляции рельсовых линий, принятый при моделировании, составляет от 4 до 0,02 см/км, что в 4 раза больше нормативного, принятого при проектировании классификаторов. Во всех парах признаков присутствует амплитуда напряжения на выходе рельсовой линии, и это указывает на ее наибольшую информативность. Также во множество предпочтительно включить

амплитуду и фазу напряжения на входе рельсовой линии и фазу на ее выходе.

При распознавании II и III классов наиболее информативны сочетания признаков, входящие в решающие функции  $d_{10}-d_{15}$ , которые обладают приемлемым качеством распознавания. Это связано с зависимостью фазы тока на входе рельсовой линии от неисправности рельсовой линии:  $d_{10}$  ( $K_{SK} = 0,9145$  при  $K_{NS} = 0,6575$ ),  $d_{11}$  ( $K_{SK} = 0,9438$  при  $K_{NS} = 0,6125$ ),  $d_{12}$  ( $K_{SK} = 0,9815$  при  $K_{NS} = 0,5584$ ),  $d_{13}$  ( $K_{SK} = 0,9214$  при  $K_{NS} = 0,6203$ ),  $d_{14}$  ( $K_{SK} = 0,9615$  при  $K_{NS} = 0,6184$ ),  $d_{15}$  ( $K_{SK} = 0,9807$  при  $K_{NS} = 0,5825$ ).

Путем оптимизации значений элементов устройств согласования аппаратуры классификатора с рельсовой линией в начале и в конце участка контроля можно добиться увеличения значений критериев  $K_{NS}$  и  $K_{SK}$  до  $\geq 1,2$ , что благоприятно скажется на обеспечении безопасности движения поездов.

#### Обсуждение и заключения

Одной из важнейших задач при распознавании состояний различных объектов является формирование ра-



бочего алфавита признаков, имеющего меньшую размерность, чем априорный словарь признаков. Это позволяет уменьшить экономические потери при создании сложной системы распознавания, минимизировать ошибки при измерении множества признаков, уменьшить время обработки информации, которое особенно важно при распознавании состояний рельсовых линий в реальном времени. Данная проблема особенно актуальна при распознавании состояний рельсовых линий с распределенными параметрами, поскольку объект распознавания находится под непрерывным воздействием механических, электромагнитных и климатических воздействий, оказывающих существенное влияние на измеряемые первичные признаки. Более того, системы распознавания распределены вдоль железнодорожных путей, решающие устройства реализованы на промышленных микропроцессорах, которые должны обеспечить процесс распознавания в реальном времени, и от размерности множества первичных информативных признаков зависит время обработки информации и классификации состояний рельсовых линий. В работе рассмотрены два под-

хода к оценке информативности признаков: с участием обученной решающей функции и вне системы распознавания на первичном уровне. Сравнение результатов исследований корреляционными функциями и обученными решающими функциями подтверждает гипотезу о том, что подходы не противоречат друг другу: как в первом, так и во втором случае наиболее информативны амплитуды и фазы напряжений на выходе рельсовой линии, а также амплитуд напряжений на ее входе ( $r_{u,\varphi} \rightarrow \min; K_{NS}, K_{SK} \rightarrow \max$ ).

Результаты, полученные в ходе исследования информативности признаков для распознавания состояний рельсовых линий корреляционным анализом и с использованием решающей функции классификатора, подтверждают возможности подходов при формировании рабочего множества признаков и могут быть использованы при разработке обучаемых классификаторов состояний.

Сочетание двух методов позволяет синтезировать сложные, многоуровневые системы распознавания, что является основным вкладом данной работы в развитие принципов распознавания образов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Разработка обучаемого классификатора состояний рельсовых линий с многомерными информативными признаками / Д. В. Железнов [и др.] // Труды СПИИРАН. 2017. Т. 50, № 1. С. 32–54. URL: <http://proceedings.spiiras.nw.ru/ojs/index.php/sp/article/view/3436>
2. Robust model fitting using higher than minimal subset sampling / B. B. Tennakoon [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2016. Vol. 38, no. 2. P. 350–362. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2015.2448103>
3. **Zheleznov D. V., Tarasov E. M.** Development of an intelligent system of determining the coordinates and the speed of the train // Transport and Telecommunication. 2016. Vol. 17, no. 6. P. 138–143. URL: [https://www.researchgate.net/publication/302065698\\_Development\\_of\\_an\\_Intelligent\\_System\\_of\\_Determinating\\_the\\_Coordinates\\_and\\_the\\_Speed\\_of\\_the\\_Train](https://www.researchgate.net/publication/302065698_Development_of_an_Intelligent_System_of_Determinating_the_Coordinates_and_the_Speed_of_the_Train)
4. **Худайберганов Т. Р., Адинаев Х. С., Артикаев М. А.** Математические методы распознавания образов // Техника. Технологии. Инженерия. 2017. Т. 4, № 2.1. С. 45–47. URL: <https://moluch.ru/th/8/archive/62/2318/?flavour=full>
5. **Ailem M., Role F., Nadif M.** Model-based co-clustering for the effective handling of sparse data // Pattern Recognition. 2017. Vol. 72. P. 108–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2017.06.005>
6. Linear classifiers and selection of informative features / Yu. I. Zhuravlev [et al.] // Pattern Recognition and Image Analysis. 2017. Vol. 27, no. 3. P. 426–432. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1054661817030336>

7. **Зенин А. В.** Анализ методов распознавания образов // Молодой ученый. 2017. № 16. С. 125–130. URL: <https://moluch.ru/archive/150/42393>
8. **Кулбараков М. А.** К задаче распознавания образов без учителя в технической диагностике // Молодой ученый. 2014. № 18. С. 55–57. URL: <https://moluch.ru/archive/77/13273>
9. Fast density clustering strategies based on the k-means algorithm / L. Bai [et al.] // Pattern Recognition. 2017. Vol. 71. P. 375–386. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/journal/00313203/71>
10. Support vector clustering / A. Ben Hur [et al.] // J. of Machine Learning Research. 2001. Vol. 2. P. 125–137. URL: <http://www.jmlr.org/papers/volume2/horn01a/horn01a.pdf>
11. **Kazanskiy N. L., Popov S. B.** Integrated design technology for computer vision systems in railway transportation // Pattern Recognition and Image Analysis. 2015. Vol. 25, no. 2. P. 215–219. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1054661815020133>
12. **Myasnikov E. V.** Analysis of approaches to feature space partitioning for nonlinear dimensionality reduction // Pattern Recognition and Image Analysis. 2016. Vol. 26, no. 3. P. 474–482. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1054661816030147>
13. **Dokukin A. A., Ryazanov V. V., Shut O. V.** Multilevel models for solution of multiclass recognition problems // Pattern Recognition and Image Analysis. 2016. Vol. 26, no. 3. P. 461–473. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1054661816030044>
14. **Машкин А. В.** Использование энтропийных мер в задачах оценки информативности признаков распознавания образов // Программные продукты и системы. 2009. № 4. С. 79–80. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-entropiynyh-mer-v-zadachah-otsenki-informativnosti-priznakov-raspoznavaniya-obrazov>
15. **Бартенев В. Г.** Анализ эффективности обнаружителей коррелированных сигналов в шуме для малых выборок наблюдений // Цифровая обработка сигналов. 2016. № 4. С. 35–39. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27721342>
16. **Erdogmus D., Principe J. C.** Information theoretic learning [Electronic resource]. URL: [http://www1.coe.neu.edu/~erdogmus/publications/BC05\\_EncyclopediaofAI\\_ITL.pdf](http://www1.coe.neu.edu/~erdogmus/publications/BC05_EncyclopediaofAI_ITL.pdf)
17. **Черногорова Ю. В.** Методы распознавания образов // Молодой ученый. 2016. Т. 132, № 28. С. 40–43. URL: <https://moluch.ru/archive/132/36964>
18. **Полевой Ю. И.** Классификация адаптивных рельсовых цепей // Мир транспорта. 2011. № 1. С. 124–129. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16350859>
19. **Бобков А. В.** Нормирование пространства признаков при использовании обобщенного преобразования Хафа // Наука и образование : научное издание. 2014. № 2. С. 286–295. DOI: <http://dx.doi.org/10.7463/0214.0697554>
20. Разработка инвариантного обучаемого идентификатора координаты поезда / Д. В. Железнов [и др.] // Вестник СамГУПС. 2017. № 2. С. 100–112. URL: [https://www.samgups.ru/science/nauchnye\\_izdaniya/vestnik-samgups/arkhiv/element.php?SECTION\\_CODE=vestnik\\_samgups&ELEMENT\\_CODE=vestnik\\_samgups\\_-2\\_2017](https://www.samgups.ru/science/nauchnye_izdaniya/vestnik-samgups/arkhiv/element.php?SECTION_CODE=vestnik_samgups&ELEMENT_CODE=vestnik_samgups_-2_2017)
21. On ensuring invariance in problems of control of rail-line conduction / E. M. Tarasov [et al.] // Russian Electrical Engineering. 2017. Vol. 88, no. 3. P. 105–108. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068371217030166>

*Поступила 29.01.2018; принята к публикации 26.03.2018; опубликована онлайн 29.06.2018*

*Об авторах:*

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

**Герус Владимир Леонидович**, аспирант кафедры автоматизации, телемеханики и связи, ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения» (443066, Россия, г. Самара, ул. Свободы, д. 2В), ResearcherID: C-2513-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9559-0458>, [vl-gerus@mail.ru](mailto:vl-gerus@mail.ru)



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

*Заявленный вклад соавторов:*

Е. М. Тарасов – постановка задачи, консультирование по теоретической части, анализ полученных данных; В. Л. Герус – анализ предметной области, анализ алгоритмов исследований, работа с литературой; А. Е. Тарасова – разработка и реализация алгоритма, проведение исследований с использованием программного средства Mathcad, анализ результатов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Zheleznov D. V., Tarasov E. M., Isaycheva A. G., Mikheeva T. I. Development of the learning classifier of rail lines states with multivariate informative features. *Trudy SPIIRAN* = Works of St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences. 2017; 50(1):32–54. DOI: <https://doi.org/10.15622/SP.50.2> (In Russ.)
2. Tennakoon R. B., Bab-Hadiashar A., Cao Z., Hoseinnezhad R., Suter D. Robust model fitting using higher than minimal subset sampling. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2016; 38(2):350–362. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2015.2448103>
3. Zheleznov D. V., Tarasov E. M. Development of an intelligent system of determining the coordinates and the speed of the train. *Transport and Telecommunication*. 2016; 17(6):138–143. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/302065698\\_Development\\_of\\_an\\_Intelligent\\_System\\_of\\_Determinating\\_the\\_Coordinates\\_and\\_the\\_Speed\\_of\\_the\\_Train](https://www.researchgate.net/publication/302065698_Development_of_an_Intelligent_System_of_Determinating_the_Coordinates_and_the_Speed_of_the_Train)
4. Khudayberganov T. R., Adinayev Kh. S., Artikbayev M. A. [Mathematical methods of pattern recognition]. *Tekhnika. Tekhnologii. Inzheneriya* = Technics. Technologies. Engineering. 2017; 4(2.1):45–47. Available at: <https://moluch.ru/th/8/archive/62/2318/?flavour=full> (In Russ.)
5. Ailem M., Role F., Nadif M. Model-based co-clustering for the effective handling of sparse data. *Pattern Recognition*. 2017; 72:108–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2017.06.005>
6. Zhuravlev Yu. I., Laptin Yu. P., Vinogradov A. P., Zhurbenko N. G., Lykhovyd O. P., Berzovskyi O. A. Linear classifiers and selection of informative features. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2017; 27(3):426–432. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1054661817030336>
7. Zenin A. V. [Analysis of methods of pattern recognition]. *Molodoy uchenyy* = Young Scientist. 2017; 16:125–130. Available at: <https://moluch.ru/archive/150/42393> (In Russ.)
8. Kulbarakov M. A. [To the question of pattern recognition without a teacher in technical diagnostics]. *Molodoy uchenyy* = Young Scientist. 2014; 18:55–57. Available at: <https://moluch.ru/archive/77/13273> (In Russ.)
9. Bai L., Cheng X., Liang J., Shen H., Guo Y. Fast density clustering strategies based on the k-means algorithm. *Pattern Recognition*. 2017; 71:375–386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2017.06.023>
10. Ben-Hur A., Horn D., Siegelmann H. T., Vapnik V., Liu Z. Support vector clustering. *J. of Machine Learning Research*. 2001; 2:125–137. Available at: <http://www.jmlr.org/papers/volume2/horn01a/horn01a.pdf>
11. Kazanskiy N. L., Popov S. B. Integrated design technology for computer vision systems in railway transportation. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2015; 25(2):215–219. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1054661815020133>
12. Myasnikov E. V. Analysis of approaches to feature space partitioning for nonlinear dimensionality reduction. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2016; 26(3):474–482. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1054661816030147>

13. Dokukin A. A., Ryazanov V. V., Shut O. V. Multilevel models for solution of multiclass recognition problems. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2016; 26(3):461–473. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1054661816030044>
14. Mashkin A. V. [The use of entropy measures in problems of assessing the informativeness of characters for pattern recognition]. *Programmnyye produkty i sistemy* = Software Products and Systems. 2009; 4:79–80. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-entropiynyh-mer-v-zadachah-otsenki-informativnosti-priznakov-raspoznavaniya-obrazov> (In Russ.)
15. Bartenev V. G. [Analysis of the efficiency of detectors of correlated signals in noise for small samples of observations]. *Tsifrovaya obrabotka signalov* = Digital Signal Processing. 2016; 4:35–39. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27721342> (In Russ.)
16. Erdogmus D. P., Principe J. C. Information theoretic learning. Available at: [http://www1.coe.neu.edu/~erdogmus/publications/BC05\\_EncyclopediaofAI\\_ITL.pdf](http://www1.coe.neu.edu/~erdogmus/publications/BC05_EncyclopediaofAI_ITL.pdf)
17. Chernogorova Yu. V. [Methods of pattern recognition]. *Molodoy uchenyy* = Young Scientist. 2016; 28:40–43. Available at: <https://moluch.ru/archive/132/36964> (In Russ.)
18. Polevoy Yu. I. Classification of adaptive rail track circuits. *Mir transporta* = World of Transport. 2011; 1:124–129. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16350859> (In Russ.)
19. Bobkov A. V. Parameter space normalization in General Hough transform. *Nauka i obrazovaniye* = Science and Education. 2014; 2:286–295. DOI: <http://dx.doi.org/10.7463/0214.0697554> (In Russ.)
20. Zhelezov D. V., Kotenko A. G., Mikheeva T. I., Gerus V. L., Tarasova A. E. Development of invariant trainable identifier of train coordinate. *Vestnik SamGUPS* = Samara State Transport University Bulletin. 2017; 2:100–112. Available at: [https://www.samgups.ru/science/nauchnye\\_izdaniya/vestnik-samgups/arkhiv/element.php?SECTION\\_CODE=vestnik\\_samgups&ELEMENT\\_CODE=vestnik\\_samgups\\_-2\\_2017](https://www.samgups.ru/science/nauchnye_izdaniya/vestnik-samgups/arkhiv/element.php?SECTION_CODE=vestnik_samgups&ELEMENT_CODE=vestnik_samgups_-2_2017) (In Russ.)
21. Tarasov E. M., Teplyakov V. B., Gumennikov V. B., Tretyakov G. M., Isaicheva A. G. On ensuring invariance in problems of control of rail-line conduction. *Russian Electrical Engineering*. 2017; 88(3):105–108. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068371217030166>

*Received 29.01.2018; revised 26.03.2018; published online 29.06.2018*

*About authors:*

**Evgeniy M. Tarasov**, Vice Rector, Samara State Transport University (2V Svobody St., Samara 443066, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: C-2505-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2717-7343>, [tarasov53em@yandex.ru](mailto:tarasov53em@yandex.ru)

**Vladimir L. Gerus**, Postgraduate Student, Automation, Telemechanics and Communication Chair, Samara State Transport University (2V, Svobody St., Samara 443066, Russia), ResearcherID: C-2513-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9559-0458>, [vl-gerus@mail.ru](mailto:vl-gerus@mail.ru)

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

*Authors' contribution:*

E. M. Tarasov – formulating the problem, theoretical consulting, data analysis; V. L. Gerus – analysis of subject area and research algorithms, reviewing the literature; A. E. Tarasova – development and implementation of algorithm, data processing using Mathcad software, data analysis.

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



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

УДК 631.879.34

DOI: 10.15507/0236-2910.028.201802.207-221



## Адсорбционно-окислительная технология переработки сточных вод предприятий агропромышленного комплекса

**А. Ю. Измайлов, Я. П. Лобачевский\*, А. В. Федотов,  
В. С. Григорьев, Ю. С. Ценч**

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

*\*vim@vim.ru*

*Введение.* В процессе производства и переработки на предприятиях агропромышленного комплекса сельскохозяйственной продукции образуется большое количество отходов, в частности сточных вод. Практически все компоненты этих стоков, имеющие органическую природу, можно эффективно перерабатывать в условиях сверхкритического водного окисления с получением тепловой и электрической энергии. Для этого требуется предварительное концентрирование органических примесей, осуществить которое можно адсорбционным методом. Целью работы является исследование адсорбционной очистки сточных вод с применением наноструктурного бемита и отходов предприятий агропромышленного комплекса с последующей переработкой полученного осадка в условиях сверхкритического водного окисления. Такая технология очистки является новшеством и в отличие от традиционных методов обеспечивает более эффективную переработку сточных вод.

*Материалы и методы.* Для проведения эксперимента в качестве адсорбентов использовали наноструктурный бемит и отходы предприятий агропромышленного комплекса (лузга гречихи и риса) и коксового производства. Поровую структуру адсорбентов исследовали методом низкотемпературной адсорбции азота. Содержание органических веществ оценивали по показателю химического потребления кислорода. Размер кристаллитов и фазовый состав бемита определяли методом рентгено-скопии. Адсорбцию органических примесей исследовали на пробах кислой молочной сыворотки и образцах стоков фермы крупного рогатого скота и свинофермы, а также спиртовой барды.

*Результаты исследования.* Экспериментальные исследования показали, что лузга гречихи, риса и отходы коксового производства являются наноструктурными материалами. Наиболее эффективной для измельчения данных материалов является ножевая мельница. Получены изотермы адсорбции органических примесей сточных вод на гречневой лузге и отходах коксового производства. Установлено, что качество очистки стоков возрастает с увеличением площади удельной поверхности и содержания частиц порошка бемита и времени его перемешивания.

*Обсуждение и заключения.* Исследованные наноструктурные порошки обладают сорбционной емкостью по отношению к растворенным органическим веществам и могут быть эффективно использованы для очистки сточных вод сельскохозяй-

ственных и перерабатывающих предприятий и концентрирования загрязняющих веществ. Последующее окисление насыщенного органикой адсорбента в условиях сверхкритического водного окисления обеспечивает полную регенерацию бемита и переработку органических веществ с получением очищенной воды и избыточной энергии, что перспективно для решения проблемы энергоэффективной очистки стоков предприятий агропромышленного комплекса.

**Ключевые слова:** органические примеси, наноструктурный бемит, адсорбция, сточные воды, молочная сыворотка, суспензия, гречишная лузга, отходы коксового производства, сверхкритическое водное окисление

**Для цитирования:** Адсорбционно-окислительная технология переработки сточных вод предприятий агропромышленного комплекса / А. Ю. Измайлов [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 2. С. 207–221. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.207-221>

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по Соглашению о предоставлении субсидии № 14.607.21.0126 от 27.10.2015; уникальный идентификатор соглашения RFMEFI60715X0126.

## Adsorption-Oxidation Technology of Wastewater Recycling in Agroindustrial Complex Enterprises

A. Yu. Izmaylov, Ya. P. Lobachevskiy\*, A. V. Fedotov,  
V. S. Grigoryev, Yu. S. Tsench

*Federal Scientific Agro-Engineering Center VIM  
(Moscow, Russia)*

\*[vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru)

**Introduction.** A large amount of wastewater is generated in processing of agricultural produce at agroindustrial enterprises. Almost all components of these effluents have an organic nature and can be efficiently processed under supercritical water oxidation to produce thermal and electrical energy. This requires a preliminary concentration of organic impurities, which can be carried out by adsorption method. This paper explores the possibility of adsorption wastewater treatment with nano-structured boehmite and wastes of agricultural enterprises with subsequent processing of the resulting sludge under supercritical water oxidation. Such a combination of adsorption purification of waste water from organic contaminants and their subsequent utilization in conditions of supercritical water oxidation has not been practiced before, and this is the novelty of the study. Unlike existing methods, this approach ensures efficient wastewater treatment with excess energy production.

**Materials and Methods.** Nano-structured boehmites from different manufacturers and waste from agricultural enterprises (buckwheat hull, rice), coke production waste are used as adsorbents. The pore structure of the adsorbents was studied by low-temperature nitrogen adsorption. Microscopic examination was performed using an optical microscope. The content of organic substances was estimated by the index of chemical oxygen consumption. Crystallite size and phase composition were determined by x-ray method. Adsorption was studied on experimental samples of sour whey, sewage farms for growing cattle and pig farms, as well as waste of ethanol production.

**Results.** Experimental studies demonstrated that buckwheat husks, rice and coke waste are nanostructured materials. A knife mill is the most effective for grinding waste. Isotherms of adsorption of organic impurities of waste waters on buckwheat husks and waste products of coke production are obtained. The quality of wastewater treatment increases with the raise in the specific surface area and the content of particles of the boehmite powder and the time of its mixing.



**Conclusions.** The nanostructured powders have a sorption capacity in relation to dissolved organic substances and can be used for wastewater treatment of agricultural and processing enterprises and concentration of pollutants. Subsequent oxidation of saturated organic adsorbent in the conditions of supercritical water oxidation provides a full regeneration of the boehmite and the processing of organic matter to produce clean water and excess energy. This idea is promising to solve the problem of energy-efficient wastewater treatment agricultural enterprises.

**Keywords:** organic impurities, nano-structured boehmite, adsorption, waste water, whey, suspension, buckwheat hull, coke production wastes, supercritical water oxidation

**For citation:** Izmaylov A. Yu., Lobachevskiy Ya. P., Fedotov, A. V., Grigoryev V. S., Tsench Yu. S. Adsorption-Oxidation Technology of Wastewater Recycling in Agroindustrial Complex Enterprises. *Vestnik mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(2):207–221. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.207-221>

**Acknowledgements:** The article is based on materials made with financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Grant Agreement no. 14.607.21.0126 of 27 October 2015, ID: PNIER RFMEF160715X0126).

## Введение

Отрицательное воздействие сельскохозяйственной деятельности на окружающую среду связано не только с возрастающим потреблением природных ресурсов, но и, в большей степени, с образованием жидких и твердых отходов предприятий сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности. В частности, выращивание животных, переработка мясомолочной продукции, производство пива, сахара, крахмала и др. сопровождаются образованием большого количества сточных вод [1]. Все компоненты стоков, имеющие органическую природу, можно эффективно перерабатывать в условиях сверхкритического водного окисления (СКВО) с получением тепловой и электрической энергии [1–5]. К преимуществам такой технологии переработки органических отходов в сверхкритической воде относится то, что вследствие низкой температуры окисления отходов не происходит образование токсичных оксидов азота и серы, диоксинов и фуранов [4–5]. Органосодержащие отходы могут быть использованы как возобновляемые источники энергии, и создание технологии их переработки

является актуальной задачей в решении энергетических проблем.

Жидкие продукты переработки многих предприятий агропромышленного комплекса (АПК) (например, животноводческих) содержат до 98 % воды, и для их энергоэффективной переработки требуется предварительное концентрирование органических примесей до 10–30 %, которое можно осуществить адсорбционным методом. Данный метод не только позволяет обеспечить более эффективную очистку (80–95 %) отходов, особенно слабоконцентрированных стоков, содержащих несколько органических веществ, но и возможность рекуперации адсорбентов.

В качестве адсорбентов предложено использовать наноструктурные порошки оксигидроксида алюминия (бемит) [9–10] и тонкоизмельченные твердые сельскохозяйственные отходы органической природы<sup>1</sup> [11–12]. Полученные суспензии адсорбентов с органическими загрязнениями легко утилизируются в условиях СКВО, где в присутствии окислителя происходит деструкция органических веществ с образованием высокоэнтальпийной парогазовой сме-

<sup>1</sup> Василенко Л. В., Никифоров А. Ф., Лобухина Т. В. Методы очистки промышленных сточных вод : учеб. пособие. Екб. : Урал. гос. лесотехн. университет, 2009. 174 с. URL: <http://www.amac.mtd/Biblioteca/data/17/08/Vasilenco.pdf>

си. При этом наноструктурный бемит может быть регенерирован и использован повторно.

### Обзор литературы

СКВО позволяет обеспечить эффективное обезвреживание сточных вод загрязненных органическими примесями [14–16]. В качестве окислителя при утилизации органосодержащих отходов наиболее часто используется воздух и перекись водорода при коэффициенте избытка 1,4–1,6 по сравнению со стехиометрическим соотношением [8; 16]. Как правило, СКВО проводят при рабочих температурах в диапазоне 400–650 °С и давлении 22–30 МПа. Такие условия способствуют окислению органических примесей, имеющих в сточных водах, до оксида углерода и воды на 99 % за 1–2 мин. Содержащиеся в стоках минеральные вещества выпадают в осадок в виде солей и оксидов. При переработке азотсодержащих органических веществ в парогазовых выбросах отсутствуют опасные оксиды азота, т. к. деструкция в сверхкритической водной среде происходит с образованием молекулярного азота.

В настоящее время активно проводятся исследования по разработке конструкции реакторов СКВО и применению сверхкритической воды в качестве среды для химических реакций окисления токсичных стойких органических загрязнителей [2; 6–7], синтеза наноструктурных оксидов алюминия и водорода [17–21], эффективной утилизации низкосортных органических топлив и отходов [22–23]. Для энергоэффективной реализации СКВО и обеспечения автотермичности процесса (без подачи энергии) требуется концентрация сточных вод в диапазоне 10–30 % или введение в состав стоков дополнительного топлива (органики).

Одним из возможных способов повышения содержания органических веществ в низкоконцентрированных

стоках является использование различных адсорбционных методов, широко применяемых в водоподготовке и водоочистке. Целесообразность их использования обусловлена высокой эффективностью при малом удельном расходе адсорбента. Универсальными адсорбентами являются активированные угли, обладающие высокой адсорбционной способностью благодаря развитой поверхности и пористости<sup>2</sup> [11; 24]. Недостатком применения активированных углей является необходимость регенерации, уменьшение их адсорбционной емкости со временем, а также высокая стоимость.

Технология деструктивной адсорбционной очистки сточных вод, при которой извлеченные органические загрязняющие вещества уничтожаются вместе с адсорбентом, в отличие от регенеративной, применяется сравнительно редко, поскольку используемые минеральные сорбенты (глины, опоки, силикагели, алюмогели и др.) являются химически стойкими и обычно подлежат захоронению, либо их регенерируют разными способами. Поэтому разработка и производство дешевых и эффективных адсорбентов, особенно на основе отходов, также подлежащих утилизации, являются актуальными направлениями в рамках защиты и охраны окружающей среды от токсичных и вредных веществ.

Растительные отходы (опилки, щепа, овсяная, гречишная, подсолнечная и рисовая лузга, кукурузные кочерыжки, фруктовые косточки и др.) представляют собой вторичные материальные ресурсы, не подлежащие регенерации, и в отличие от других видов отходов они постоянно пополняются. Можно прогнозировать, что окисление растительных отходов в сверхкритических условиях вместе с адсорбированными органическими загрязнителями сточных вод положительно повлияет на

<sup>2</sup> Там же.



энергетическую составляющую способа и будет способствовать достижению как экологического, так и экономического положительного эффекта.

Цель исследования – изучение возможности адсорбционной очистки сточных вод наноструктурным бемитом и отходами предприятий АПК с последующей переработкой полученного осадка в условиях СКВО.

### Материалы и методы

Содержание органических веществ в стоках и жидких продуктах переработки на установке СКВО оценивали по показателю химического потребления кислорода (ХПК). Сущность метода определения ХПК заключается в обработке исследуемой пробы серной кислотой и бихроматом калия в присутствии сульфата серебра (катализатора окисления). ХПК определяли по оптической плотности исследуемого раствора при заданном значении длины волны с использованием градуировочной зависимости оптической плотности раствора от значения ХПК [6].

Поровую структуру адсорбентов исследовали методом низкотемпературной адсорбции азота на анализаторе удельной поверхности Autosorb-1 [7]. Микроскопические исследования проб молотых отходов проводили с помощью микроскопа Levenhuk 40L NG.

Размер области когерентного рассеивания (ОКР) определяли дифракционным методом по уширению пиков на рентгенограммах с помощью формулы Сельякова-Шеррера [8].

В качестве адсорбентов использовались порошки бемита, лузга гречихи, риса и отходы коксового производства. Основные характеристики бемита-А (производитель – АО «Ангарский завод катализаторов и органического синтеза», г. Ангарск), бемита-В (производитель – ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва) и других исследуемых адсорбентов приведены в табл. 1. Бемит-А был получен методом переосаждения из тригидроксида алюминия, бемит-В – гидротермальным синтезом из промышленных порошков алюминия [9].

Размер кристаллитов (ОКР) порошков бемита не превышает 100 нм, и по определению такие порошки являются наноструктурными. Благодаря малому размеру кристаллиты сростаются. Конечная структура представляет собой агрегаты микронного размера с неупорядоченной структурой пор нанометрового диапазона (для бемита-В преимущественный размер пор составляет 2,5 нм). Поэтому порошки являются также нанопористыми с высокой удельной поверхностью (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

### Некоторые характеристики адсорбентов

#### Some characteristics of the adsorbents

Адсорбент / Adsorbent	Фазовый состав и размер агрегатов, мкм / The phase composition and size of the aggregates, mcm	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г / Specific surface area, m <sup>2</sup> /g	Размер кристаллитов (ОКР), нм / The size of the crystallites (RCS), nm	Объем пор фракций до 60 нм, см <sup>3</sup> /г / Pore size up fraction to 60 nm, cm <sup>3</sup> /g
1	2	3	4	5
Бемит-В / Boehmite-B	Бемит, агрегаты: 0,5–2,0 / Boehmite, aggregates: 0,5–2,0	80,0	30	0,170
Бемит-А / Boehmite-A	Псевдобемит, байерит, агрегаты: 1–4 / Pseudoboehmite, bayerite, aggregates: 1–4	200,0	7	–

Окончание табл. 1 / End of table 1

1	2	3	4	5
Лузга гречихи (порошок) / Buckwheat husk (powder)	–	10,6	–	0,014
Лузга риса (порошок) / Rice husk (powder)	–	20,8	–	0,018
Отходы коксового производства / Coke production waste	–	4,0	–	0,006

Эксперименты проводили на образцах стоков предприятия по производству творожной продукции (кислая молочная сыворотка), фермы по выращиванию крупного рогатого скота (КРС) и свинофермы, а также на образцах спиртовой барды. Адсорбционные свойства бемита исследовали после введения коагулянта в стоки (120 мг сульфата алюминия на 1 л стока) и флокулянта марки К4034 (0,5 мг на 1 л стока) с удалением образовавшегося осадка. Адсорбент вводили в стоки, и образовавшуюся суспензию перемешивали на магнитной мешалке. После перемешивания ее фильтровали и определяли ХПК в фильтрате, предварительно проверив влияние фильтрования на показатель ХПК.

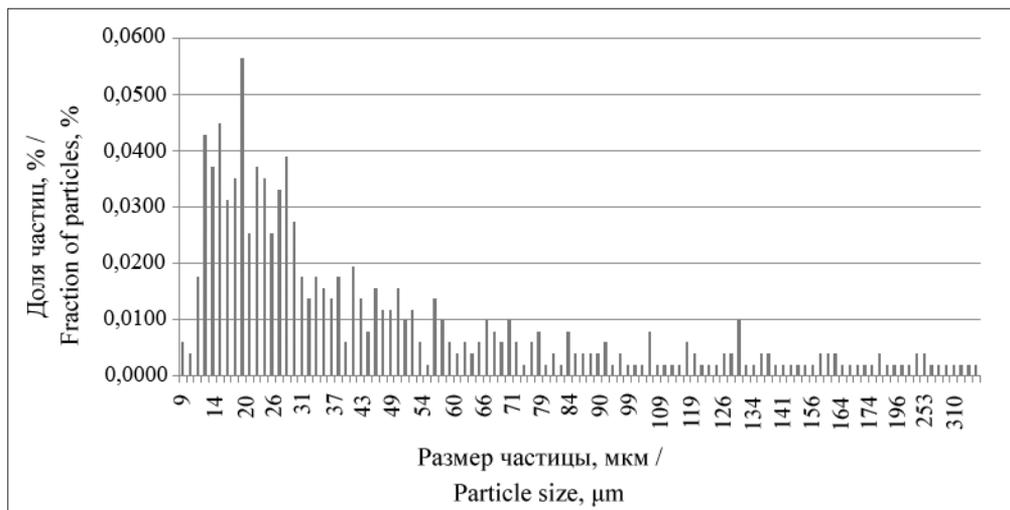
Полученные суспензии бемита и твердых органических отходов с адсорбированными ими органическими веществами обрабатывали в условиях СКВО при избытке окислителя 20 % по сравнению со стехиометрическим соотношением в периодическом режиме. С этой целью в реакторе предварительно создавали сверхкритические условия для воды, после чего в него одновременно вводили суспензию с отходами и 50%-ный раствор перекиси водорода.

#### Результаты исследования

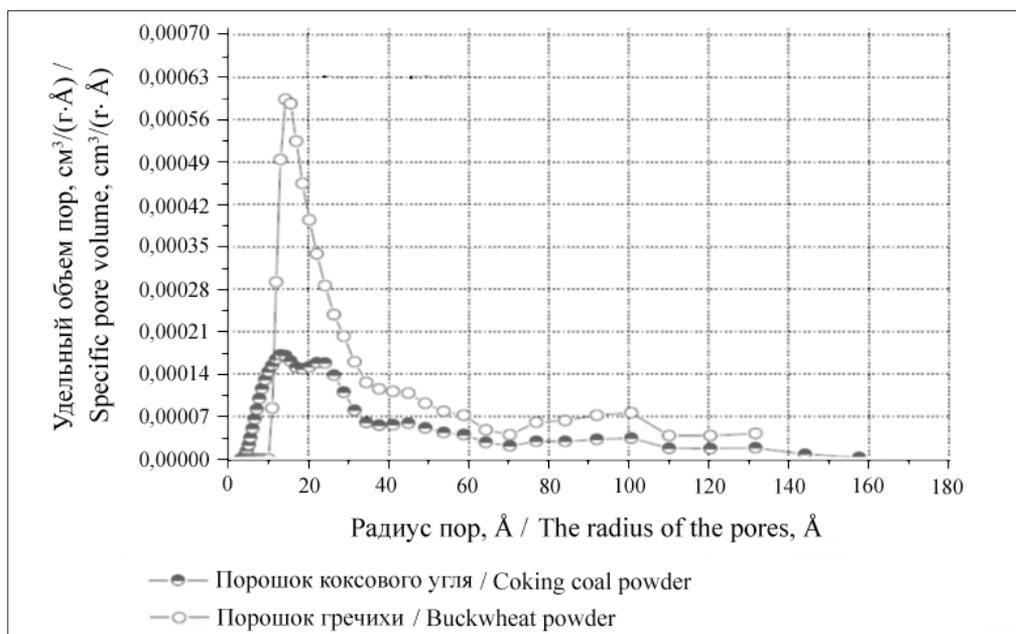
Лузгу гречихи, риса и отходы коксового производства предварительно измельчали в валковой, ножевой и шаровой

мельницах соответственно. Эксперименты проводили на исходной гречишной лузге с размером частиц 3–5 мм и подсолнечной лузге с размером частиц 10–12 мм. Благодаря плоской форме частиц и толщине < 1 мм не происходило их разрушения на валковой мельнице даже при зазоре между валками 1 мм. Лузга гречихи или риса является мягким, эластичным и волокнистым материалом, и ее измельчение наиболее эффективно проводить на ножевой мельнице при помоле в водной среде (за 30 мин измельчения фракция частиц гречишной лузги < 100 мкм составила 57 %; в шаровой мельнице за 1 ч фракция частиц < 100 мкм не превысила 40 %).

В дальнейшей работе использовали фракцию частиц лузги и отходов коксового производства < 100 мкм, отсеянную на сите 01 с квадратными ячейками. Благодаря неправильной форме, через сито проходили удлиненные частицы, размер которых составлял > 100 мкм. Зависимость доли частиц лузги гречихи, полученных при измельчении, от их размера напоминает логарифмически нормальное распределение (рис. 1), что характерно для процесса измельчения. В частицах риса, лузги гречихи и коксовой пыли (рис. 2) преимущественный размер пор составил 1–2 нм. По размеру пор отходы относятся к наноструктурным материалам с порами нанометрового диапазона.



Р и с. 1. Зависимость доли частиц лузги гречихи от их размера  
F i g. 1. Dependence of the share of buckwheat husk particles on their size

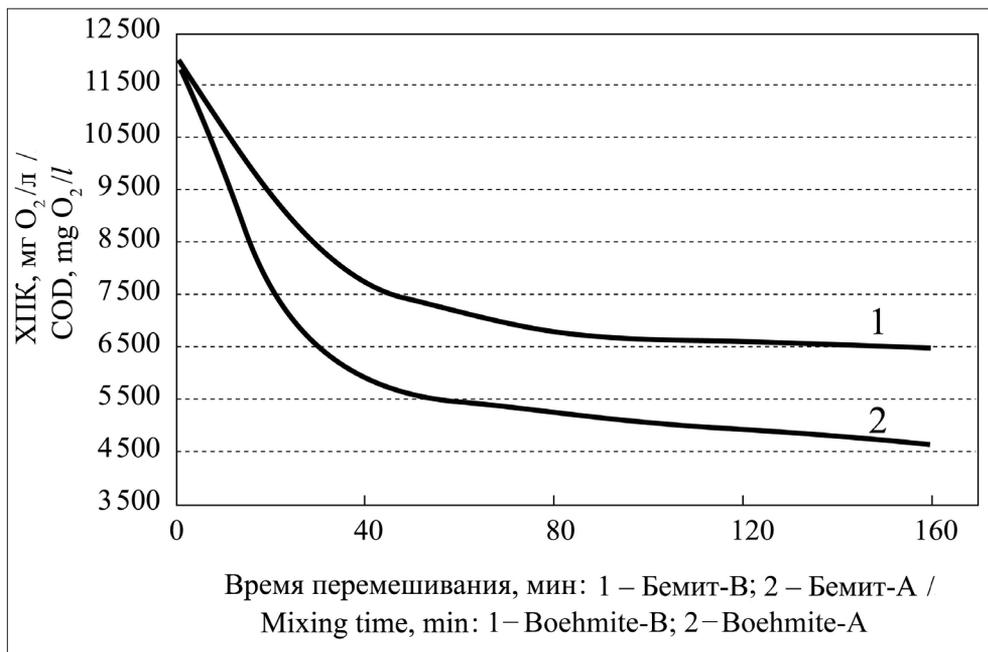


Р и с. 2. Удельный объем пор в зависимости от их радиуса в лузге гречихи и отходах коксового угля  
F i g. 2. Specific volume of pores depending on their radius in buckwheat husk and coking coal waste

Объем пор и удельная поверхность лузги приблизительно на порядок меньше соответствующих характеристик бемитных образцов (табл. 1). Удельная поверхность частицы лузги не увели-

чивается при измельчении и определяется внутривидовой, а не внешней геометрической поверхностью частиц.

Как видно на рис. 3, время перемешивания пробы свиного стока и увели-



Р и с. 3. Изменение ХПК бемита-А и бемита-В (при концентрации 20 г/100 мл) в зависимости от времени перемешивания

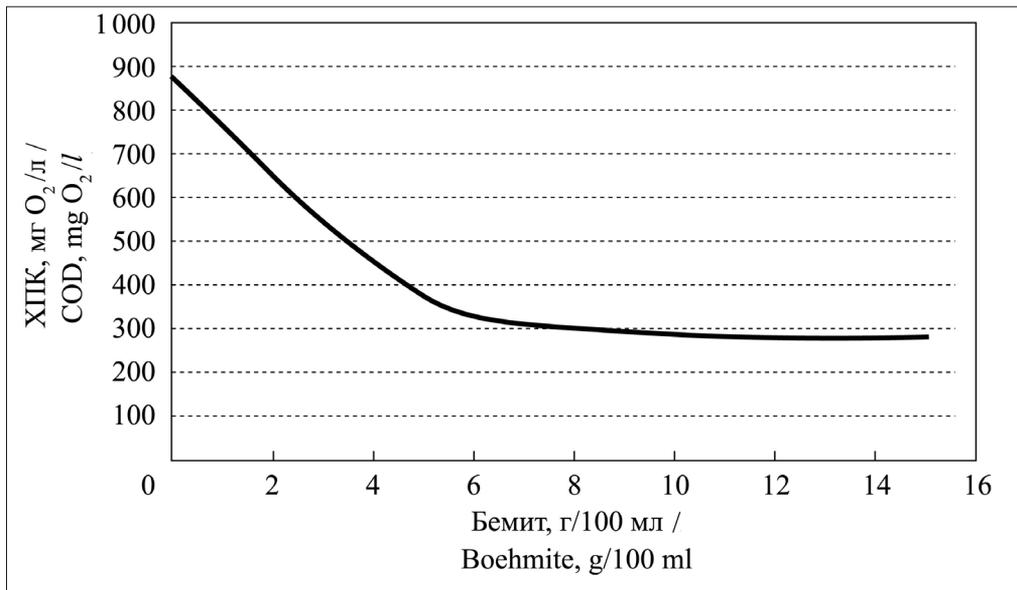
Fig. 3. Changing chemical oxygen demand boehmite-A and boehmite-B (concentration of 20 g/100 ml) depending on mixing time

чение удельной поверхности порошка бемита закономерно увеличивает адсорбцию органических веществ. Скорость процесса с течением времени затухает, что характерно для кинетики адсорбции и обусловлено образованием слоя молекул органических загрязнений на поверхности адсорбента. Увеличению качества очистки стоков способствует предварительная ультразвуковая обработка суспензии бемита, которая разбивает агрегаты и, соответственно, увеличивает поверхность адсорбента. Воздействие ультразвуком в течение 1 ч уменьшает показатель ХПК до 3 000–3 500 мгO<sub>2</sub>/л. Отмечено влияние ультразвука на фазовую перестройку бемита (по границам агрегатов наблюдали аморфную фазу оксида алюминия в количестве ~ 10 % для всех концентраций суспензии). Фильтрация суспензии и повторная обработка способствует снижению величины ХПК

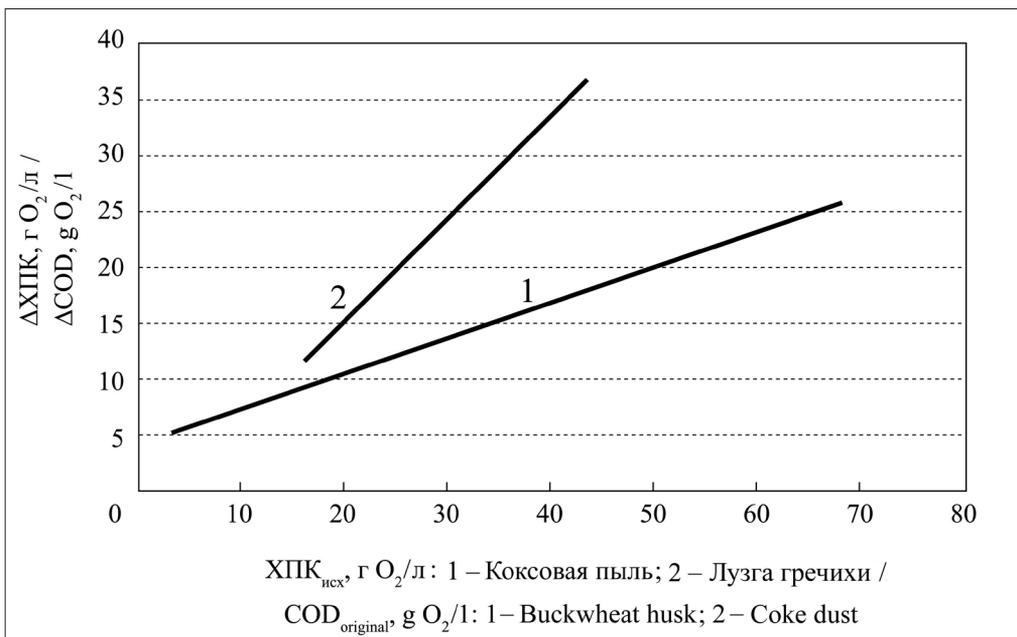
исследуемых стоков до оптимальных значений, допускающих сброс в канализацию.

При высоком значении показателя ХПК стока (~ 900 мгO<sub>2</sub>/л) добавление бемита в соотношении 10 г на 100 мл обеспечивает его снижение до 283 мгO<sub>2</sub>/л, т. е. до значений, приближенных к нормальным (285 мгO<sub>2</sub>/л), при которых допускается сброс отходов в канализацию (рис. 4). Целесообразно в начале процесса очистки сточных вод уменьшать значение ХПК за счет применения коагулянтов и флокулянтов, а на последних стадиях использовать бемит.

Зависимость изменения значения ХПК от исходного показателя для лузги гречихи и отхода коксового производства носит прямолинейный характер (рис. 5). Зависимости представляют типичные изотермы адсорбции, угол наклона которых характеризует адсорбционную емкость пористого вещества.



Р и с. 4. Изменение ХПК в зависимости от концентрации бемита в пробе стока фермы КРС  
 F i g. 4. Change of chemical oxygen demand in dependence the concentration of boehmite in the sample of cattle farm drain



Р и с. 5. Изменение ХПК раствора молочной сыворотки (концентрация адсорбента – 100 г на 500 мл стока, время перемешивания – 20 мин) при адсорбции на лузге гречихи и коксовой пыли

F i g. 5. The change in COD of the solution of whey (concentration of adsorbent: 100 g per 500 ml of drain, mixing time: 20 min) adsorption on buckwheat husk and coke dust

Из графика видно, что в качестве адсорбента гречишная лузга более эффективна, чем коксовая пыль (это обусловлено разной поровой структурой материалов). При близком размере пор объем и удельная поверхность пор частиц лузги гречихи больше в 2 раза, чем у коксовой пыли (табл. 1, рис. 2).

Измельченная рисовая лузга обладает достойными адсорбционными свойствами по отношению к органическим веществам, содержащимся в спиртовой барде. После 90 мин перемешивания на магнитной мешалке показатель ХПК уменьшился с 11,2 гО<sub>2</sub>/л до 3,4 гО<sub>2</sub>/л.

Отфильтрованный осадок, содержащий бемит или отходы с сорбированными органическими веществами, подвергали гидротермальной деструкции в присутствии окислителя при сверхкритических параметрах водной среды. После введения суспензии комнатной температуры в разогретый реактор первоначально наблюдалось падение температуры и давления, затем ее значительный рост за счет эк-

зотермической реакции окисления. Процесс окисления проходит с высокой скоростью: в течение 60–90 с показатель ХПК снижается до значений < 250 мгО<sub>2</sub>/л, при которых допускается сброс образующегося конденсата в канализацию (табл. 2). Следует отметить, что эффективно проходит окисление как жидких и твердых отходов (молочная сыворотка и лузга гречихи), так и адсорбированных загрязнений. При этом адсорбционная способность бемита после обработки в СКВО практически не изменилась.

На основании проведенных исследований была разработана методика автотермической деструкции органических отходов предприятий АПК при сверхкритических параметрах водной среды. Методика позволяет на основе данных входного контроля жидких отходов и водных суспензий твердых органических отходов по показателю ХПК рассчитать необходимое количество окислителя, подготовить исходную водно-органическую смесь

Таблица 2  
Table 2

**Сравнительные результаты окисления органических отходов**  
**Comparative results of organic waste oxidation**

№ п/п / Serial number	Исходный материал / Source material	ХПК, мгО <sub>2</sub> /л / Chemical oxygen demand, mgO <sub>2</sub> /l	
		Исходная суспензия, раствор / Initial suspension, solution	Конденсат / Condensate
1	Бемит-В после адсорбции в стоках КРС / Boehmit-B after adsorption in the drain of cattle	30 200	150
2	Отходы коксового производства / Coke production waste	120 000	170
3	Гречишная лузга / Buckwheat husks	16 800	200
4	Молочная сыворотка / Milk whey	20 200	150
5	Гречишная лузга после адсорбции в молочной сыворотке / Buckwheat husks after adsorption of the whey	68 100	220



для подачи в реактор, определить начало реакций окисления, конечное значение ХПК конденсата и эффективность переработки отходов.

#### Обсуждение и заключения

Измельчение лuzги гречихи, риса на валковой, шаровой и ножевой мельницах показали наибольшую эффективность последней, что характерно для мягких волокнистых материалов. Порошки бемита разных производителей, молотая лuzга гречихи, риса и отходы коксового производства являются наноструктурными материалами. Благодаря высокой удельной поверхности наноструктурный бемит, лuzга гречихи, риса, отходы коксового производства могут эффективно использоваться для очистки сточных вод сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий до содержания органических веществ, допускающих их сброс в канализацию.

Реализация сверхкритического водного окисления отходов является самодостаточным тепловым процессом с получением энергетических высокоэнтальпийных газов с избыточным давлением 220–250 атм и температурой 400–500 °С. Исследования и реализация процессов деструкции органосодержащих отходов в режимах окисления (автотермический процесс) являются перспективными для создания когенерационных автономных установок гидротермальной переработки отходов АПК. Образующиеся при окислении отходов парогазовая смесь является рабочим телом парогазовых мини-турбин для выработки электроэнергии с утилизацией тепла отходящих газов, что перспективно в решении проблемы энергоэффективной очистки стоков предприятий АПК с получением очищенной воды и избыточной энергии.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Koda S.** Oxidation reactions of solid carbonaceous and resinous substances in supercritical water // *J. Supercritical Fluids*. 2009. Vol. 47. P. 400–406. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2008.08.006>
2. Calculation of critical and engineering parameters for a supercritical water oxidation reaction system / A. E. Rozen [et al.] // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2015. Vol. 9, no. 3. P. 481–489. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1990793115030185>
3. **Vostrikov A. A., Dubov D. Y., Psarov S. A.** Pyrolysis of eicosane in supercritical water // *Russian Chemical Bulletin*. 2001. Vol. 50. P. 1478–1480. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1012761829425>
4. **Henrikson J. T., Savage P. E.** Water-density effects on phenol oxidation in supercritical water // *American Institute Chemical Engineers J.* 2003. Vol. 49, no. 3. P. 718–226. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/aic.690490315>
5. **Onwudili J. A., Williams P. T.** Reaction mechanisms for the hydrothermal oxidation of petroleum derived aromatic and aliphatic hydrocarbons // *J. Supercritical Fluids*. 2007. Vol. 43. P. 81–90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2007.04.011>
6. Preparation and characterization of  $\gamma$ -AlOOH nanotubes and nanorods / H. Hou [et al.] // *Nanotechnology*. 2005. Vol. 16, no. 6. P. 741–745. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/16/6/019>
7. **Федяева О. Н., Востриков А. А.** Утилизация токсичных органических веществ в сверхкритической воде // *Сверхкритические флюиды: теория и практика*. 2012. Т. 7, № 1. С. 64–88. URL: [http://scf-tp.ru/articles/2012\\_01/download/scf-tp\\_v007\\_01\\_2012\\_pp\\_64-88.pdf](http://scf-tp.ru/articles/2012_01/download/scf-tp_v007_01_2012_pp_64-88.pdf)
8. **Prosmans P. I., Luan L., Buelow S. J.** Hydrothermal oxidation of organic wastes using ammonium nitrate // *Industrial Engineering Chemistry Research*. 1997. Vol. 36. P. 1559–1566. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie9601716>
9. Морфология и размерные параметры нанокристаллов бемита, полученных в гидротермальных условиях / С. А. Кириллова [и др.] // *Наносистемы: физика, химия, математика*. 2012. № 4. С. 101–113. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/morfologiya-i-razmernye-parametry-nanokristallov-bemita-poluchennyh-v-gidrotermalnyh-usloviyah>

10. Электроповерхностные свойства и агрегативная устойчивость водных дисперсий  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\gamma$ - $\text{AlO}(\text{OH})$  / Е. В. Голикова [и др.] // Поверхность. 1995. № 9. С. 78–79.
11. Долгих О. Г., Овчаров С. Н. Использование углеродных адсорбентов на основе растительных отходов для очистки нефтезагрязненных сточных вод // Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета. 2010. № 1. С. 6–12.
12. Toor S. S., Rosendahl L., Rudolf A. Hydrothermal liquefaction of biomass : A review of sub-critical water technologies // Energy. 2011. Vol. 36, no. 5. P. 2328–2342. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.013>
13. The experimental research on independent starting and autonomous operation of HDTB considered as a basic block of AES based on supercritical hydrothermal destruction / A. D. Vedenin [et al.] // Proceedings of the Scientific-Practical Conference «Research and Development-2016». Moscow, 2016. P. 171–178. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-62870-7\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-62870-7_19)
14. Очистка сточных вод производства целлюлозы из соломы рапса окислением в сверхкритической водной среде / Э. Ш. Гаязова [и др.] // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2014. Т. 9, № 1. С. 40–47. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21368868>
15. The effect of supercritical water on coal pyrolysis and hydrogen production: A combined ReaxFF and DFT study / J. Zhang [et al.] // Fuel. 2013. Vol. 108. P. 682–690. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.064>
16. Combustion of coal particles in  $\text{H}_2\text{O}/\text{O}_2$  supercritical fluid / A. A. Vostrikov [et al.] // Industrial Engineering Chemistry Research. 2007. Vol. 46. P. 4710–4716. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie0703686>
17. Hydrogen production by sewage sludge gasification in supercritical water with a fluidized bed reactor / Y. Chen [et al.] // Int. J. Hydrogen Energy. 2013. Vol. 38. P. 12991–12999. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.03.165>
18. Образование наночастиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при окислении алюминия водой при суб- и сверхкритических параметрах / А. А. Востриков [и др.] // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2010. Т. 5, № 1. С. 12–25. URL: [http://www.scf-tp.ru/articles/2010\\_01/download/scf-tp\\_v005\\_01\\_2010\\_pp\\_12-25.pdf](http://www.scf-tp.ru/articles/2010_01/download/scf-tp_v005_01_2010_pp_12-25.pdf)
19. Vostrikov A. A., Fedyaeva O. N. Mechanism and kinetics of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles formation by reaction of bulk Al with  $\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$  at sub- and supercritical conditions // J. Supercritical Fluids. 2010. Vol. 55. P. 307–315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2010.05.022>
20. Luminescence of  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\alpha$ - $\text{AlOOH}$  natural mixtures / J. Garcia-Guinea [et al.] // Radiation Measurements. 2001. Vol. 33. P. 653–658. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(01\)00078-6](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(01)00078-6)
21. Ruan H. D., Frost R. L., Klopogge J. T. Comparison of Raman spectra of bayerite, boehmit, diaspore and gibbsite // Journal of Raman Spectroscopy. 2001. Vol. 32, no. 9. P. 745–750. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/jrs.736>
22. Hydrothermolysis of brown coal in cyclic pressurization-depressurization mode / O. N. Fedyaeva [et al.] // J. Supercritical Fluids. 2012. Vol. 62. P. 155–164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2011.11.028>
23. Превращение бурого угля под действием воды при сверхкритических параметрах / А. А. Востриков [и др.] // Химия твердого топлива. 2007. № 5. С. 30–40.
24. Жумаева Д. Ж. Угольные адсорбенты для очистки сточных вод и их вторичное использование // Universum: химия и биология : электрон. науч. журнал. 2016. Т. 29, № 11. URL: <http://7universum.com/ru/nature/archive/item/3851>

*Поступила 27.02.2018; принята к публикации 12.04.2018; опубликована онлайн 29.06.2018*

*Об авторах:*

**Измайлов Андрей Юрьевич**, директор, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, Москва, 1-й Институтский пр., д. 5), доктор технических наук, академик РАН, ResearcherID: H-4602-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1143-7286>, [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru)

**Лобачевский Яков Петрович**, первый заместитель директора по развитию и инновациям, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, Москва,



1-й Институтский пр., д. 5), доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Researcher ID: H-5863-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7863-2962>, [lobachevsky@yandex.ru](mailto:lobachevsky@yandex.ru)

**Федотов Анатолий Валентинович**, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией «Энергоэффективные сверхкритические технологии», ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, Москва, 1-й Институтский пр., д. 5), кандидат технических наук, [fedotov48@list.ru](mailto:fedotov48@list.ru)

**Григорьев Виктор Степанович**, ведущий научный сотрудник лаборатории «Энергоэффективные сверхкритические технологии», ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, Москва, 1-й Институтский пр., д. 5), доктор технических наук, [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru)

**Ценч Юлия Сергеевна**, начальник отдела образования научно-технической информации и редакционно-издательской деятельности, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, Москва, 1-й Институтский пр., д. 5), кандидат педагогических наук, Researcher ID: H-5855-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3214-4725>, [vimas@mail.ru](mailto:vimas@mail.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

А. Ю. Измайлов – научное руководство, формулирование основной концепции исследования и структуры статьи; Я. П. Лобачевский – участие в исследованиях, обработка экспериментальных данных, формирование выводов; А. В. Федотов – участие в исследованиях, подготовка текста статьи; В. С. Григорьев – участие в теоретических и практических исследованиях, доработка текста статьи; Ю. С. Ценч – участие в исследованиях, литературный и патентный анализ.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Koda S. Oxidation reactions of solid carbonaceous and resinous substances in supercritical water. *J. Supercritical Fluids*. 2009; 47(3):400–406. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2008.08.006>
2. Rozen A. E., Roshchin A. V., Grigorev V. S., et al. Calculation of critical and engineering parameters for a supercritical water oxidation reaction system as exemplified by water-aromatic hydrocarbon binary mixtures. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2015; 9(3):481–489. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1990793115030185>
3. Vostrikov A. A., Dubov D. Yu., Psarov S. A. Pyrolysis of eicosane in supercritical water. *Russian Chemical Bulletin*. 2001; 50:1478–1480. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1012761829425>
4. Henrikson J. T., Savage P. E. Water-density effects on phenol oxidation in supercritical water. *American Institute Chemical Engineers J.* 2003; 49(3):718–226. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/aic.690490315>
5. Onwudili J. A., Williams P. T. Reaction mechanisms for the hydrothermal oxidation of petroleum derived aromatic and aliphatic hydrocarbons. *J. Supercritical Fluids*. 2007; 43(1):81–90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2007.04.011>
6. Hou H., Xie Y., Yang Q., Guo Q., Tan Ch. Preparation and characterization of  $\gamma$ -AlOOH nanotubes and nanorods. *Nanotechnology*. 2005; 16(6):741–745. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/16/6/019>
7. Fedyaeva O. N., Vostrikov A. A. Destruction of hazardous organic substances in supercritical water. *Sverkhkritischeskiye flyuidy: teoriya i praktika* = *Supercritical Fluids: Theory and Practice*. 2012; 7(1):64–88. Available at: [http://scf-tp.ru/articles/2012\\_01/download/scf-tp\\_v007\\_01\\_2012\\_pp\\_64-88.pdf](http://scf-tp.ru/articles/2012_01/download/scf-tp_v007_01_2012_pp_64-88.pdf) (In Russ.)
8. Proesmans P. I., Luan L., Buelow S. J. Hydrothermal oxidation of organic wastes using ammonium nitrate. *Industrial Engineering Chemistry Research*. 1997; 36:1559–1566. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie9601716>
9. Kirillova S. A., Smirnov A.V., Fedorov B. A., Krasilin A. A., Bugrov A. N., Gareev K. G., et al. Morphology and dimensional parameters of boehmite nanocrystals obtained under hydrothermal condi-

tions. Nano-Systems: Physics, Chemistry, Mathematics. 2012; 3(4):101–113. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/morfologiya-i-razmerye-parametry-nanokristallov-bemita-poluchennyh-v-gidrottermalnyh-usloviyah>

10. Golikova Ye. V., Jogansson O. M., Fedorova T. G. [Electro-surface properties and aggregative stability of aqueous dispersions of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -AlO(HE)]. *Poverkhnost = Surface*. 1995; 9:78–79. (In Russ.)

11. Dolgikh O. G., Ovcharov S. N. [The use of carbon adsorbents based on vegetable waste for cleaning of oil-contaminated waste waters]. *Vestnik Severo-Kavkazskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = North Caucasus State Technical University Bulletin*. 2010; 1:6–12. (In Russ.)

12. Toor S. S., Rosendahl L., Rudolf A. Hydrothermal liquefaction of biomass: A review of subcritical water technologies. *Energy*. 2011; 36(5):2328–2342. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.013>

13. Vedenin A. D., Grigoryev V. S., Lobachevskiy Ya. P., Nikolaev A. I., Savelyev G. S., Strelets A. V. The experimental research on independent starting and autonomous operation of HDTB considered as a basic block of aes based on supercritical hydrothermal destruction. In: Proceedings of Scientific Practical Conference “Research and Development-2016”, 14–15 December, 2016. Moscow, p. 171–178. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-62870-7\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-62870-7_19)

14. Gayazova E. Sh., Usmanov R. A., Shayhiev I. G., Gumerov F. M., Mousin R. Z., Fridland S. V. Oxidative treatment of waste water formed during cellulose production from rape straw in supercritical conditions. *Sverkhkritischeskiye flyuidy: teoriya i praktika = Supercritical Fluids: Theory and Practice*. 2014; 9(1):40–47. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21368868> (In Russ.)

15. Zhang J., Weng X., Han Y., Li W., Cheng J., Gan Z., Gu J. The effect of supercritical water on coal pyrolysis and hydrogen production: A combined ReaxFF and DFT study. *Fuel*. 2013; 108:682–690. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.064>

16. Vostrikov A. A., Dubov D. Yu., Psarov S. A., Sokol M. Ya. Combustion of coal particles in H<sub>2</sub>O/O<sub>2</sub> supercritical fluid. *Industrial Engineering Chemistry Research*. 2007; 46:4710–4716. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie0703686>

17. Chen Y., Guo L., Cao W., Jin H., Guo S., Zhang X. Hydrogen production by sewage sludge gasification in supercritical water with a fluidized bed reactor. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2013; 38:12991–12999. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.03.165>

18. Vostrikov A. A., Fedyeva O. N., Fadeeva I. I., Sokol M. Ya. Formation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles during aluminum oxidation by water with sub- and supercritical conditions. *Sverkhkritischeskiye flyuidy: teoriya i praktika = Supercritical Fluids: Theory and Practice*. 2010; 5(1):12–25. Available at: [http://www.scf-tp.ru/articles/2010\\_01/download/scf-tp\\_v005\\_01\\_2010\\_pp\\_12-25.pdf](http://www.scf-tp.ru/articles/2010_01/download/scf-tp_v005_01_2010_pp_12-25.pdf) (In Russ.)

19. Vostrikov A. A., Fedyeva O. N. Mechanism and kinetics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles formation by reaction of bulk Al with H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> at sub- and supercritical conditions. *J. Supercritical Fluids*. 2010; 55:307–315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2010.05.022>

20. Garcia-Guinea J., Rubio J., Correcher V., Valle-Fuentes F.-J. Luminescence of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\alpha$ -AlOOH natural mixtures. *Radiation Measurements*. 2001; 33:653–658. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(01\)00078-6](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(01)00078-6)

21. Ruan H. D., Frost R. L., Klopogge J. T. Comparison of Raman spectra in characterizing gibbsite, bayerite, diasporite and boehmite. *Journal of Raman Spectroscopy*. 2001; 32(9):745–750. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/jrs.736>

22. Fedyeva O. N., Vostrikov A. A., Shishkin A. V., Sokol M. Ya., Fedorova N. I., Kashirtsev V. A. Hydrothermolysis of brown coal in cyclic pressurization-depressurization mode. *J. Supercritical Fluids*. 2012; 62:155–164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2011.11.028>

23. Vostrikov A. A., Fedyeva O. N., Psarov S. A., Dubov D. Yu., Sokol M. Ya. [Transformation of brown coal under the action of water under supercritical parameters]. *Khimiya tverdogo topliva = Solid Fuel Chemistry*. 2007; 5:30–40.

24. Zhumaeva D. Zh. Coal adsorbents for wastewater treatment and their secondary use. *Universum: khimiya i biologiya = Universum: Chemistry and Biology*. 2016; 29(11). URL: <http://7universum.com/ru/nature/archive/item/3851> (In Russ.)

Received 27.02.2018; revised 12.04.2018; published online 29.06.2018

*About authors:*

**Andrey Yu. Izmaylov**, Director, Federal Scientific Agro-Engineering Center VIM (5<sup>1st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), D.Sc. (Engineering), Member of RAS, ResearcherID: H-4602-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1143-7286>, [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru)

**Yakov P. Lobachevskiy**, First Deputy Director for Innovation, Federal Scientific Agro-Engineering Center VIM (5<sup>1st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, Member-Correspondent of RAS, Researcher ID: H-5863-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7863-2962>, [lobachevsky@yandex.ru](mailto:lobachevsky@yandex.ru)

**Anatoliy V. Fedotov**, Leading Researcher, Head of Energy-Efficient Supercritical Technologies Laboratory, Federal Scientific Agro-Engineering Center VIM (5<sup>1st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Ph.D. (Engineering), [fedotov48@list.ru](mailto:fedotov48@list.ru)

**Viktor S. Grigoryev**, Leading Researcher, Head of Energy-Efficient Supercritical Technologies Laboratory, Federal Scientific Agro-Engineering Center VIM (5<sup>1st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), D.Sc. (Engineering), [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru)

**Yuliya S. Tsench**, Head of the Department of Education of Scientific and Technical Information and Editorial and Publishing Activities, Federal Scientific Agro-Engineering Center VIM (5<sup>1st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Ph.D. (Education), Researcher ID: H-5855-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3214-4725>, [vimasp@mail.ru](mailto:vimasp@mail.ru)

*Authors' contribution:*

A. Yu. Izmaylov – scientific leadership, formulation of the basic concept of research and the structure of the article; Ya. P. Lobachevskiy – participation in research, processing of experimental data, formation of conclusions; A. V. Fedotov – participation in research, preparation of the article; V. S. Grigoryev – participation in theoretical and practical research, revision of the article; Yu. S. Tsench – participation in research, literary and patent analysis.

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



## Исследование предприятий технического сервиса для обеспечения показателей надежности машин (на примере агропромышленного комплекса Республики Мордовия)

**В. А. Комаров**

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

*komarov.v.a2010@mail.ru*

*Введение.* Большинство существующих планировочных решений, служащих технологической основой для разработки типовых проектов предприятий, обладают рядом недостатков. С одной стороны, они недостаточно учитывают влияние различных факторов на установление строительных норм расстояний; с другой, игнорируют взаимосвязь с управлением техническим состоянием объектов в процессе обслуживания и ремонта. Цель настоящей работы – разработать систему моделей для обеспечения показателей безотказности и долговечности машин в процессе эксплуатации и обслуживания на современных предприятиях технического сервиса с учетом минимизации затрат на строительство и повышения показателей надежности техники.

*Материалы и методы.* Мониторинг фактического состояния ситуационных планов ремонтно-обслуживающих баз предприятий и их соответствия современным требованиям осуществлялся с помощью публичной кадастровой карты Республики Мордовия 2018 г. Зависимости среднего ресурса и наработки на отказ от коэффициентов перепланировки различных видов контрольно-диагностических и ремонтных работ вычислялись на примере трансмиссии автомобилей сельскохозяйственного назначения ГАЗ-САЗ-3507, ГАЗ-САЗ-2506 и ГАЗ-САЗ-2504. В процессе исследования были разработаны многофакторная математическая модель и программное обеспечение, реализованное на ПЭВМ.

*Результаты исследования.* Для минимизации затрат на строительство предприятий была разработана классификация строительных норм расстояний. 1. В интервале 700–3 000 м: а) между единицами оборудования; б) между технологическим оборудованием и различными типами строительных элементов. 2. В интервале 1 200–1 600 м при одностороннем движении внутрицеховых транспортных средств и 2 200–7 000 м – при двустороннем: а) нормы ширины проездов; б) нормы расстояний между двумя рядами оборудования. Анализ зависимостей показал, что уменьшение объема контрольно-диагностических работ (при изменении коэффициента перепланировки контрольно-диагностических работ  $K_{ПК}$  с 0 до 1,8) приводит к уменьшению наработки на устранение последствий отказа в 2,1 раза, а среднего доремонтного ресурса – на 26 %. Уменьшение объема предупредительных ремонтных работ (при изменении коэффициента перепланировки ремонтных работ  $K_{ДПК}$  с 0 до 4,2) приводит к уменьшению наработки на устранение последствий отказа в 1,6 раза, а среднего доремонтного ресурса – на 9 %. Установлены оптимальные величины  $K_{ПК}^{opt} = 0,55$ ;  $K_{ДПК}^{opt} = 1,05$ . Определены два основных направления создания современных проектов предприятий технического сервиса: 1) увеличение масштабов и количества производственных зон и участков по проведению наружной мойки машин, технического обслуживания и диагностирования сложной техники; 2) создание и размещение зон хранения сельскохозяйственной техники и материально-технического обеспечения в одном производственном корпусе, осуществляющем различные виды технического сервиса.



*Обсуждение и заключения.* Исследования процесса перепланировки контрольно-диагностических и ремонтных воздействий, проведенные с помощью математической модели, позволили подтвердить эффективность их совместного применения на современных предприятиях технического сервиса, особенно перед напряженными периодами использования автомобилей в составе машинно-тракторных комплексов. Результаты исследований рекомендуются для ознакомления специалистам в области технического сервиса машин.

**Ключевые слова:** ситуационный план, технический сервис, предприятие, строительные нормы расстояний, показатели надежности, безотказность, долговечность

*Для цитирования:* Комаров В. А. Исследование предприятий технического сервиса для обеспечения показателей надежности машин (на примере агропромышленного комплекса Республики Мордовия) // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 2. С. 222–238. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.222-238>

## Research of Technical Service Enterprises for Promoting Equipment Reliability (Case Study of Agro-Industrial Complex of the Republic of Mordovia)

V. A. Komarov

National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

\*[komarov.v.a2010@mail.ru](mailto:komarov.v.a2010@mail.ru)

*Introduction.* Many planning solutions for the development of enterprise projects are partly defective. On the one hand, the solutions do not take into account the influence of many factors on building regulations; on the other, they ignore the relationship with the monitoring the technical state of objects in the process of maintenance and repair. The purpose of this study is to develop a system of models for promoting equipment reliability in the process of operation and maintenance at technical service enterprises to minimize construction costs and improve the reliability of equipment.

*Materials and Methods.* Monitoring the situational plans of repair and maintenance bases of enterprises and their compliance with modern requirements was carried out using the public cadastral map of the Republic of Mordovia of 2018. Dependencies of the average resource and the operating time on the rejection of the re-planning factors for various types of control and diagnostic and repair work were calculated using the example of the transmission of GAZ-SAZ-3507, GAZ-SAZ-2506 and GAZ-SAZ-2504 agricultural trucks. In the process of research, a multifactor mathematical model and software developed on a PC have been developed.

*Results.* To reduce construction costs of enterprises, a classification of building regulations for distances was developed. 1. In the range of 700–3,000 m: a) between units of equipment; b) between process equipment and various types of building elements. 2. In the range of 1,200–1,600 m with unilateral traffic of internal vehicles and 2,200–7,000 in the case of bilateral: a) the norms of the width of the driveways; b) the norms of the distances between two rows of equipment. Analysis of the dependencies showed that a decrease in the volume of control and diagnostic work (with a change in the redesign of the monitoring and diagnostic work of the  $K_{ПК}$  from 0 to 1.8) leads to a decrease in the time taken to eliminate the consequences of failure by 2.1 times, and the average pre-repair life – by 26 %. Reduction of the volume of preventive maintenance work (if the redevelopment factor of the repair work of the  $K_{ПРК}$  is changed from 0 to 4.2) leads to a decrease in the time taken to eliminate the consequences of a failure by a factor of 1.6, and the average dormant resource by 9 %. Optimal values of the  $K_{ПК}^{opt} = 0.55$  are established;  $K_{ПРК}^{opt} = 1.05$ . Two main directions for development of projects of technical service enterprises were identified: 1) an increase in the scale and number of production zones and sites for outdoor truck wash, maintenance and diagnostics of complex equipment; 2) the development and placement of storage areas for agricultural machinery and logistics in a single production building that carries out various types of technical services.

*Conclusions.* Researches of the process of re-planning of control and diagnostic and repair influences carried out with the help of a mathematical model confirms the effectiveness of their joint application at technical service enterprises, especially before the periods of using cars in the machine and tractor complexes. The results of the research are recommended for specialists in the field of equipment technical service.

**Keywords:** situational plan, technical service, enterprise, building regulations of distances, reliability indicators, reliability, durability

**For citation:** Komarov V. A. Research of Technical Service Enterprises for Promoting Equipment Reliability (Case Study of Agro-Industrial Complex of the Republic of Mordovia). *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(2):222–238. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.222-238>

## Введение

Задачу проектирования современных предприятий технического сервиса агропромышленного комплекса (АПК) невозможно решить без изучения состояния существующей ремонтно-обслуживающей базы (РОБ) сельхозпроизводителей и сервисных предприятий<sup>1–3</sup> [1]. Поэтому в работе приводится анализ состояния ситуационных планов РОБ сельхозпроизводителей различных районов Республики Мордовия<sup>4</sup>.

С помощью ситуационного плана можно предварительно оценить состав генерального плана РОБ в рассматриваемый промежуток времени [2–4]. Их мониторинг позволит получить сведения о рациональности размещения корпусов предприятий, применяемых производственных процессах, коммуникациях между различными

подразделениями, месторасположении машинно-тракторного парка (МТА), особенностях решений, касающихся архитектурных и строительных элементов и параметрам площадки для строительства и реконструкции<sup>5</sup> [5–6]. До настоящего времени мониторинг ситуационных планов предприятий технического сервиса в АПК РМ не проводился. В работе он проведен с помощью гражданских спутников<sup>6</sup>.

Состав основных и вспомогательных подразделений, сооружений, устройств и элементов благоустройства территории для РОБ сельхозпроизводителей и сервисных предприятий подробно описан в работах<sup>7–8</sup>. Современный генеральный план должен основываться на перспективной оптимальной годовой производственной программе РОБ [7–9]. При этом необходимо предусмотреть

<sup>1</sup> Черноиванов В. И., Северный А. Э., Пильщиков Л. М. Система технического обслуживания и ремонта машин в сельском хозяйстве : монография. М. : ГОСНИТИ, 2001. 168 с. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22463793>

<sup>2</sup> Юдина Е. М., Шепелев А. Б. Технический сервис машин и основы проектирования предприятий : учеб. для вузов. Краснодар : Изд-во Краснодар. ГАУ, 2007. 968 с. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=19511212>

<sup>3</sup> Инновационные направления развития ремонтно-эксплуатационной базы для сельскохозяйственной техники : монография / С. А. Соловьев [и др.]. М. : Росинформагротех, 2014. 160 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23881795>

<sup>4</sup> Публичная кадастровая карта Мордовии 2018 года. URL: <https://mordoviya.kdmap.ru>

<sup>5</sup> Модернизация системы технического сервиса аграрного промышленного комплекса : монография / Л. И. Кушнарв [и др.]. М. : МЭСХ, 2015. 440 с. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=29142095>

<sup>6</sup> Публичная кадастровая карта Мордовии 2018 года.

<sup>7</sup> Юдина Е. М., Шепелев А. Б. Технический сервис машин и основы проектирования предприятий : учеб. для вузов.

<sup>8</sup> Инновационные направления развития ремонтно-эксплуатационной базы для сельскохозяйственной техники : монография.



комплексную застройку площадки, учитывающую планировку производственных корпусов и устройств [10–11].

После проведения ремонтно-обслуживающих воздействий (РОВ) период безотказной работы сельскохозяйственной техники должен быть больше наработки в последующий промежуток ее использования в составе МТА [12–13]. При этом главной причиной невысокой наработки на отказ является применение регламентированной стратегии проведения контрольно-диагностических (КДР) и ремонтных работ (РР) [14–15].

В настоящее время способы использования сельскохозяйственной техники имеют прерывно-кратковременный характер [16]: производственные циклы сочетаются с перерывами в работе, объясняемыми применением различных агротехнических технологий. Увеличение объемов РОВ перед напряженным периодом использования МТА должно проводиться дифференцированно с целью увеличения наработки на отказ конкретных узлов машин. При этом необходимо сохранять пропорции трудоемкости РОВ и объемов выполненных агротехнических операций [17]. Целью настоящего исследования является разработка системы моделей для обеспечения показателей безотказности и долговечности машин в процессе эксплуатации и обслуживания на современных предприятиях технического сервиса с учетом минимизации затрат на строительство

и повышения показателей надежности техники.

### Обзор литературы

Исследования взаимозависимости площади пахотных земель, количества условных эталонных тракторов и годового объема РОВ позволил выявить основные характеристики центральных ремонтных мастерских (ЦРМ) для сельхозпроизводителей РФ (табл. 1)<sup>9–11</sup>. Данные характеристики описывают РОБ как крупных агрохолдингов, так и мелких крестьянских фермерских хозяйств. Данные разработки следует использовать в качестве основы создания современных проектов предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей [7–8; 10].

При этом главным дифференциальным признаком ЦРМ является производственная площадь участков и предприятия в целом [2–3]. Нормативные значения площадей производственных участков на одно РОБ, учитывающие трудоемкость работ по техническому обслуживанию (ТО) и ремонту, приведены в работах<sup>12–14</sup>. Также установлены нормативные величины для определения площади участка с учетом значений коэффициента рабочих зон  $\eta_{pz}$  для различных видов работ<sup>15</sup> [3–4]. Он учитывает расстояния между единицами технологического оборудования, между технологическим оборудованием и строительными элементами, размеры проходов и проездов, а также зоны обслуживания и ремонта узлов и агрегатов машин. Од-

<sup>9</sup> Юдина Е. М., Шепелев А. Б. Технический сервис машин и основы проектирования предприятий : учеб. для вузов. Краснодар : Изд-во Краснодар. ГАУ, 2007. 968 с. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=19511212>

<sup>10</sup> Инновационные направления развития ремонтно-эксплуатационной базы для сельскохозяйственной техники : монография / С. А. Соловьев [и др.]. М. : Росинформагротех, 2014. 160 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23881795>

<sup>11</sup> Модернизация системы технического сервиса аграрного промышленного комплекса : монография / Л. И. Кушнарев [и др.]. М. : МЭСХ, 2015. 440 с. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=29142095>

<sup>12</sup> Юдина Е. М., Шепелев А. Б. Технический сервис машин и основы проектирования предприятий : учеб. для вузов.

<sup>13</sup> Инновационные направления развития ремонтно-эксплуатационной базы для сельскохозяйственной техники : монография.

<sup>14</sup> Модернизация системы технического сервиса аграрного промышленного комплекса : монография

<sup>15</sup> Там же.

Т а б л и ц а 1  
Table 1

**Общие характеристики центральных ремонтных мастерских  
сельскохозяйственных предприятий**

**Type of central repair shops of agricultural enterprises**

Количество условных тракторов в хозяйстве / Number of conventional tractors in the farm	Годовой объем работ, чел.-ч / Annual amount of work, man-hours	Мощность мастерской, условных ремонтов / Capacity of the workshop, conditional repairs		Производственная площадь, м <sup>2</sup> / Production area, m <sup>2</sup>	Количество производственных рабочих (списочное), чел. / Number of production workers (list), people	Этажность производственного корпуса / Number of Storeys of the production building
		Расчетная / Calculated	Рекомендуемая / Recommended			
До 25 / Before 25	16 275	54	50	580	11	1
50	25 005	83	100	920	15	2
75	47 086	157	150	1 200	27	2
100	62 474	208	200	1 360	33	2
125	72 028	240	250	1 470	40	2
150	84 014	280	300	1 600	50	2
175	98 830	330	350	1 770	60	2
200 и более / 200 and more	111 886	370	400	1 900	66	2

нако до настоящего времени не было проведено ранжирование весомости факторов, определяющих площади участков.

Таким образом, основным способом сокращения затрат при строительстве предприятия технического сервиса сельхозпроизводителей должно быть обоснованное определение площадей участков с учетом оптимального назначения строительных норм расстановки, которые в настоящее время составляют 50–85 % общей площади<sup>16–18</sup>.

**Материалы и методы**

Анализ фактического состояния схем ситуационных планов РОБ сельскохозяйственных предприятий РМ

и их соответствия современным строительным нормам был проведен с помощью публичной кадастровой карты РМ 2018 г.<sup>19</sup>. В исследование были включены ~ 100 действующих РОБ сельхозпроизводителей в 19 муниципальных районах РМ. При этом было выявлено большое количество нарушений строительных норм и правил размещения производственных корпусов. Дополнительный анализ, проведенный внутри помещений и на участках, также выявил подобные нарушения [18–19].

В связи с этим была разработана классификация групп факторов, в зависимости от которых целесообразно установ-

<sup>16</sup> Юдина Е. М., Шепелев А. Б. Технический сервис машин и основы проектирования предприятий : учеб. для вузов. Краснодар : Изд-во Краснодар. ГАУ, 2007. 968 с. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=19511212>

<sup>17</sup> Инновационные направления развития ремонта-эксплуатационной базы для сельскохозяйственной техники : монография / С. А. Соловьев [и др.]. М. : Росинформагротех, 2014. 160 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23881795>

<sup>18</sup> Модернизация системы технического сервиса аграрного промышленного комплекса : монография / Л. И. Кушнарев [и др.]. М. : МЭСХ, 2015. 440 с. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=29142095>

<sup>19</sup> Публичная кадастровая карта Мордовии 2018 года. URL: <https://mordoviya.kdmmap.ru>



ливать строительные нормы расстояний и проводить окончательный расчет производственных площадей участков и корпусов РОБ сельхозпроизводителей. При этом факторы, влияющие на определение строительных норм расстояний, являются взаимозависимыми. С целью получения оптимальных площадей участков и корпусов была создана многофакторная математическая модель, предусматривающая различные пути модернизации предприятия. Ее решение осуществлялось с помощью моделирующего алгоритма с последующими просчетами совокупности вариантов на ПЭВМ [20–21]. В модель были заложены основные пути модернизации предприятий технического сервиса: размещение в производственных корпусах подразделений, осуществляющих диагностирование и ТО сложных агрегатов и машин; проектирование зон, связанных с непродолжительным хранением техники; разработка подразделений материально-технического обеспечения производства [22–23].

Рассмотрим предпосылки построения системы моделей для обеспечения показателей безотказности и долговечности техники при эксплуатации и обслуживании на современных предприятиях технического сервиса сельхозпроизводителей [24–26]. Совместное проведение предупредительных КДР и РР улучшает показатели безотказности и долговечности узлов машин. В частности, минимальным удельным издержкам на эксплуатацию и обслуживание техники соответствует целесообразный пороговый уровень безотказности по прогнозируемому сложным отказам. Поэтому исследования по совместной оптимизации величины допускаемого отклонения параметра технического состояния элемента машины и системы технического обслуживания и ремонта (ТОР) техники должны проводиться с использованием критерия минимума суммарных удельных затрат  $C_{уд}$  при проведении КДР, текущего ремонта (ТР), капитального ремонта (КР) и устранении последствий

сложных отказов с учетом потерь от вынужденных простоев и ухудшения функционирования машин [20; 22]:

$$C_{уд}(K_{уп}) = \min[(C_0 + U_K(K_{уп}) + U_{PP}(K_{уп}) + C_{зпч}(K_{уп}) + U_{от}(K_{уп}) + C_{сп} \cdot P_{сп} + C_{бж})/T_{сл}], \quad (1)$$

где  $K_{уп}$  – комплекс управляющих параметров системы  $\{S, P, R, П, D\}$ , включающий  $S$  – стратегию РР элементов и узлов машин;  $P$  – содержание и структуру РОВ на узлы машин;  $R$  – правила определения вида РР узлов и критерия, определяющего предельное состояние (КПС) агрегата;  $П$  – правила определения целесообразного объема попутных КДР и РР;  $D$  – технические условия на проведение КДР (допускаемые параметры деталей);  $C_0, C_{сп}$  – средние издержки, определяющие затраты на приобретение и списание исследуемой техники, руб.;  $U_K(K_{уп})$  – издержки, связанные с проведением КДР, руб.;  $U_{PP}(K_{уп})$  – издержки, связанные с проведением РР, руб.;  $C_{зпч}(K_{уп})$  – стоимость замененных деталей узлов машин, руб.;  $U_{от}(K_{уп})$  – потери, связанные с устранением последствий отказов узлов машин, руб.;  $P_{сп}$  – вероятность списания техники;  $C_{бж}$  – средние затраты, связанные с мероприятиями по безопасности жизнедеятельности и охране окружающей среды, руб.

Предотвращение отказов, относящихся к группе постепенных, в математической модели [Там же] проводится с помощью установления оптимальных величин допускаемых параметров технического состояния деталей и межконтрольных наработок узлов машин. Предотвращение внезапных отказов – определением оптимального времени работы до плановых профилактических мероприятий (совместно со сложным плановым ТО, ТР и КР, проводимыми с использованием стратегии ТОР «по состоянию»), при котором внезапно отказывающие

детали и сборочные единицы заменяются регламентированно.

Запишем математическую модель совмещенного обоснования способов предотвращения внезапных и постепенных отказов [Там же]:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^m U_j = \min & \left[ \sum_{i_1=1}^{n_1} U_{TO}(D, t) + \sum_{i_2=1}^{n_2} U_{TP-1}(D, t) + \right. \\ & + \sum_{i_3=1}^{n_3} U_{TP-2}(D, t) + \dots + \sum_{i_N=1}^{n_N} U_{TP-N}(D, t) + \\ & + \sum_{i_{N+1}=1}^{n_{N+1}} U_{KP}(D, t) + \sum_{z_1=1}^{k_1} U_{TO}(t) + \sum_{z_2=1}^{k_2} U_{TP-1}(t) + \\ & \left. + \sum_{z_3=1}^{k_3} U_{TP-2}(t) + \dots + \sum_{z_N=1}^{k_N} U_{TP-N}(t) + \sum_{z_{N+1}=1}^{k_{N+1}} U_{KP}(t) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $U_{TO}(D, t)$ ,  $U_{TP-1}(D, t)$ ,  $U_{TP-2}(D, t)$ , ...,  $U_{TP-N}(D, t)$ ,  $U_{KP}(D, t)$  определяют соответственно затраты при сложном виде ТО, ТР и КР по  $i$ -м параметрам, связанным с устранением последствий постепенных отказов узлов машин;  $U_{TO}(t)$ ,  $U_{TP-1}(t)$ ,  $U_{TP-2}(t)$ , ...,  $U_{TP-N}(t)$ ,  $U_{KP}(t)$  – издержки, связанные с проведением сложного вида ТО, ТР и КР при устранении последствий  $z$ -го внезапного отказа узлов машин;  $n_1, n_2, \dots, n_N, n_{N+1}$  – количество устраненных последствий постепенных отказов узлов машин по параметрам, диагностируемым при сложном виде ТО, ТР и КР;  $k_1, k_2, \dots, k_N, k_{N+1}$  – количество устранений последствий внезапных отказов.

Приведенная методика определения комплекса управляющих параметров узлов и деталей позволяет разрабатывать модели обеспечения безотказности и долговечности узлов машин, которые имеют качественный выходной параметр. Для того чтобы повысить достоверность исследуемой математической модели реальной модели технической эксплуатации и об-

служивания, необходимо также учесть возможность совмещения и перепланировки КДР и РР в условиях современных предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей. В процессе КДР может быть принято решение о конкретном виде и объеме РР для детали или всего узла. Это связано с тем, что уровни разборочных операций для диагностирования параметров деталей часто не совпадают с уровнями разборочных работ для их замены или восстановления. Поэтому возникает необходимость разработки конкретных правил перепланировки КДР в том случае, когда при КДР меньшего объема установлена потребность замены детали, связанной с глубиной разборочных операций для КДР большего объема. Такие процедуры должны учитываться и для разновидностей РР.

В качестве критерия оптимальности перепланировки различных видов КДР в математической модели принимается нормированная часть  $K_{ПК}$  отработки периодичности КДР (критерий, связанный с перепланировкой вида КДР), которая сравнивается с фактической отработанной нормированной частью  $K_{ПК}^{\phi}$ . При этом может возникнуть событие, связанное с проведением разборочных операций при замене детали, превышающее объем данного вида КДР. Эта ситуация рассматривается с учетом оптимизации нормированной части отработки периодичности КДР и ТР  $K_{ПК}$  (критерий, связанный с перепланировкой вида ТР), при которой производится сравнение с фактической величиной отработанной нормированной части  $K_{ПК}^{\phi}$  [12; 14].

### Результаты исследования

Проанализированы 47 сервисных предприятий РМ, осуществляющих деятельность по категории «Услуги по монтажу, ремонту и техобслуживанию машин для сельского хозяйства»<sup>20</sup>. Было

<sup>20</sup> Услуги по монтажу, ремонту и техобслуживанию машин для сельского хозяйства. URL: <http://saransk7m.ru/class/1162>



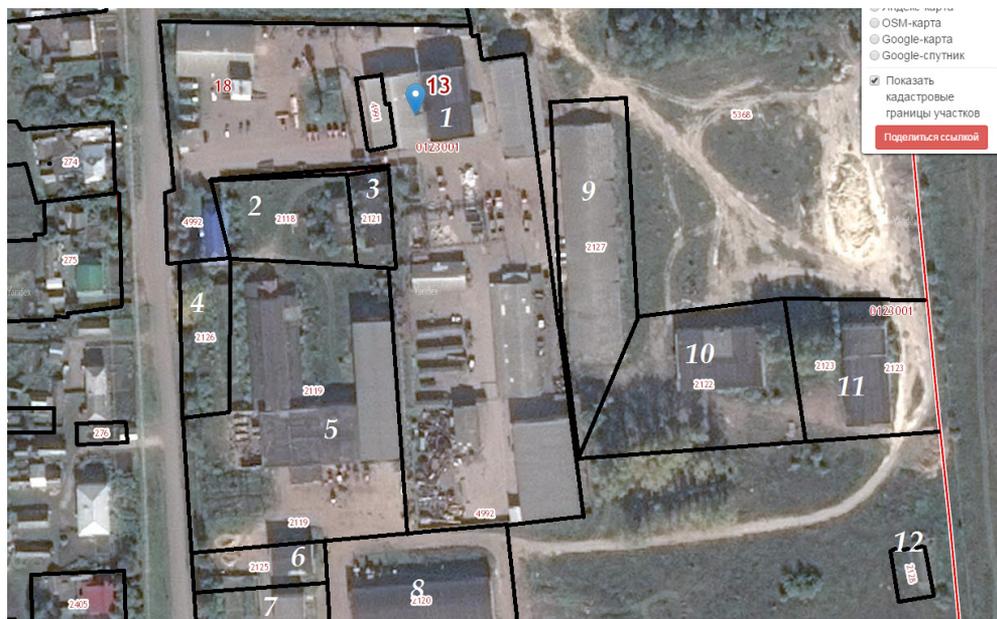
установлено, что у большинства из них основными видами деятельности являются предоставление услуг, связанных с производством сельскохозяйственных культур; предоставление услуг по монтажу, ремонту и ТО машин для сельского хозяйства, включая колесные тракторы, и лесного хозяйства; деятельность автомобильного грузового неспециализированного транспорта; оптовая торговля машинами и оборудованием для сельского и лесного хозяйства.

Кроме того, предприятия оказывают дополнительные услуги по разведению крупного рогатого скота; производству машин, используемых в растениеводстве; ТО и ремонту легковых автомобилей; оптовой торговле топливом, санитарно-техническим оборудованием и лесоматериалами; научным исследованиям и разработкам в области естественных

и технических наук; восстановлению резиновых шин и покрышек; ветеринарной деятельности; техническим испытаниям, исследованиям и сертификации и др.

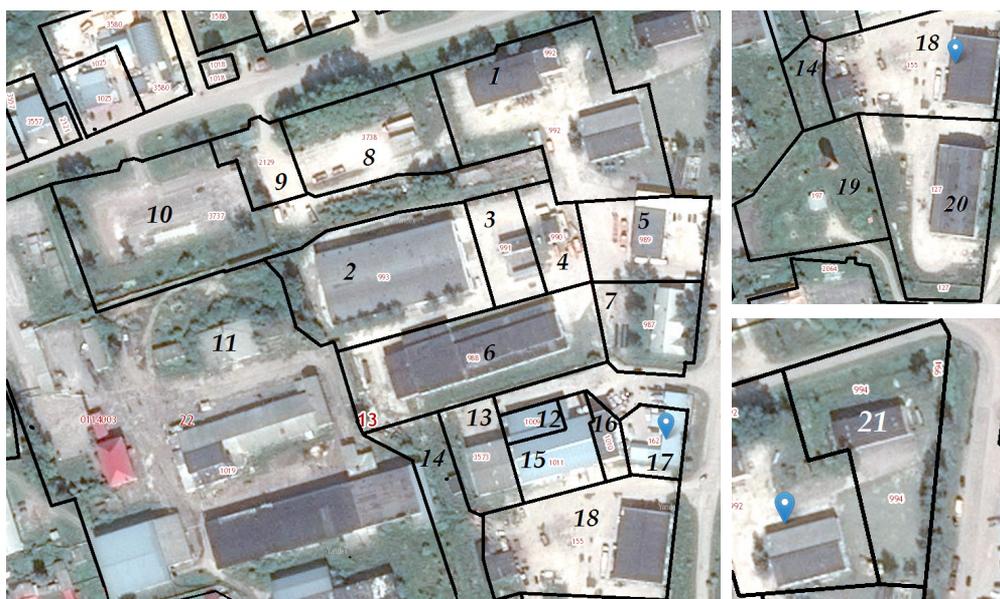
Таким образом, в настоящее время в АПК РМ не существует РОБ, представляющих только технический сервис, а следовательно, проанализированные РОБ, действующие в АПК, можно отнести к подразделениям сельхозпроизводителей.

На рис. 1–2 представлены ситуационные планы генеральных планов РОБ сельхозпроизводителей РМ, носящие наиболее информативный характер. Наиболее полный анализ ~ 100 предприятий приведен в курсе «Современные проблемы науки и производства в агроинженерии», читаемом в Институте механики и энергетики ФГБОУ ВО



Р и с. 1. Вид со спутника ситуационного плана РОБ «Старошайговагропромснаб»: 1, 7 – административное здание; 2, 10 – автомобильный гараж; 3 – котельный пункт; 4 – тепличный цех; 5 – мастерская по обслуживанию и ремонту комбайнов; 6 – линейно-монтажный участок; 8, 11 – станция ТО машин; 9 – стоянка техники (теплая)

Fig. 1. The satellite image of the situational plan of the Staroshaygovagropromsnab enterprise: 1, 7 – administrative building; 2, 10 – car garage; 3 – boiling station; 4 – hothouse shop; 5 – workshop for maintenance and repair of combines; 6 – line-mounting section; 8, 11 – station TO machines; 9 – parking (warm)



Р и с. 2. Вид со спутника ситуационного плана РОБ «Мордовский Бекон»: 1 – цех по ремонту агрегатов машин; 2 – станция ТО машин; 3 – аккумуляторный участок; 4 – цех по ремонту электрооборудования; 5 – цех наружной мойки; 6 – центральная ремонтная мастерская; 7 – административное здание; 8, 9, 11 – служебные помещения; 10, 17, 20 – складские объекты; 12, 15, 16 – участки для ремонта комбайнов; 13 – стоянка техники; 14 – трансформаторная подстанция; 18 – гараж для автомобилей; 19 – станция ВЗУ № 1; 21 – станция ТО оборудования животноводческих комплексов и котельный пункт

Fig. 2. The satellite image of the situational plan of the Mordovian Bacon enterprise: 1 – workshop for the repair of machinery units; 2 – station TO machines; 3 – battery section; 4 – electrical equipment repair shop; 5 – outdoor washing shop; 6 – central repair shop; 7 – administrative building; 8, 9, 11 – office rooms; 10, 17, 20 – warehouses; 12, 15, 16 – sites for the repair of combines; 13 – parking; 14 – substation transformer; 18 – garage for cars; 19 – VTS station no. 1; 21 – station for equipment of livestock complexes and boiler station

«МГУ им. Н. П. Огарёва» [15]. Мониторинг выявил отсутствие юридического оформления для некоторых РОБ. Кроме того, юридический адрес и фактическое местоположение большинства рассмотренных предприятий технического сервиса не совпадают.

Исследование состава и структуры РОБ показало, что 95 % предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей не отвечают многим современным строительным требованиям. Выявлено отсутствие следующих подразделений и сооружений: производственных корпусов механизированной наружной мойки и очистки грузового транспорта, автотракторной и комбайновой техники; зон ТО и диагностирова-

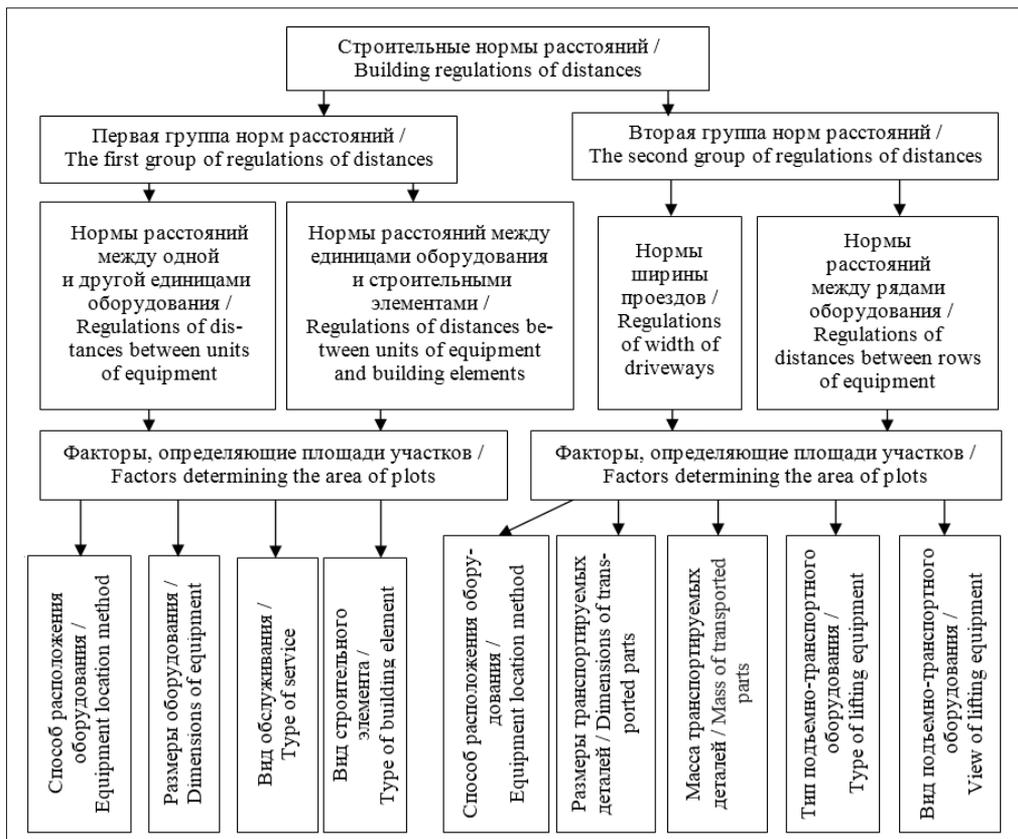
ния сложных машин (тракторов и комбайнов); цехов по ремонту комбайнов; профилакториев и гаражей для теплой стоянки; пунктов консервации техники; закрытых и открытых площадок с наличием твердого покрытия; площадок, связанных с регулировкой и хранением машин; пунктов по хранению и отпуску топливо-смазочных материалов; очистных сооружений; зон, связанных с межсменным отдыхом; зон озеленения; сооружений, ограничивающих площадку предприятия (контрольно-пропускной пункт, ограждение) и др. Кроме того, производственные подразделения РОБ представляют собой постройки 1950–70-х гг. и поэтому имеют большой процент амортизационного износа.



Таким образом, АПК РМ необходима масштабная реконструкция существующих предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей. При этом одной из основных задач, которую предстоит решить, является обоснованное определение площадей производственных участков и корпусов. В данном вопросе большое значение имеет обоснованное установление строительных норм расстояний<sup>21–23</sup>.

В результате проведенных исследований была разработана классификация строительных норм расстояний. Она состоит из двух групп норм расстояний, каждая из которых включает две подгруппы. Наиболее значимые факторы, которые необходимо учитывать при определении площадей участков и корпусов, представлены на рис. 3.

*Первая группа факторов* (находятся в интервале 700–3 000 мм): а) нормы



Р и с. 3. Строительные нормы расстояний

F i g. 3. Construction regulators of distances

<sup>21</sup> Юдина Е. М., Шепелев А. Б. Технический сервис машин и основы проектирования предприятий : учеб. для вузов. Краснодар : Изд-во Краснодар. ГАУ, 2007. 968 с. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=19511212>

<sup>22</sup> Инновационные направления развития ремонтно-эксплуатационной базы для сельскохозяйственной техники : монография / С. А. Соловьев [и др.]. М. : Росинформагротех, 2014. 160 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23881795>

<sup>23</sup> Модернизация системы технического сервиса аграрного промышленного комплекса : монография / Л. И. Кушнарев [и др.]. М. : МЭСХ, 2015. 440 с. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=29142095>

расстояний между одной и другой единицей оборудования; б) нормы расстояний между технологическим оборудованием и различными типами строительных элементов. Строительные нормы расстояний в данной группе определяются следующими факторами: способом расположения единицы оборудования; размерами единицы оборудования; видом обслуживания; типом строительной конструкции.

*Вторая группа факторов* (находятся в интервале 1 200–6 000 мм при одностороннем движении внутрицеховых транспортных средств и в интервале 2 200–7 000 мм – при двустороннем): а) нормы ширины проездов; б) нормы расстояний между двумя рядами оборудования. Строительные нормы расстояний в данной группе определяются следующими факторами: способом расположения технологического оборудования; размерами транспортируемых агрегатов, узлов и деталей; массой транспортируемых агрегатов, узлов и деталей; типом подъемно-транспортного оборудования (верхний или напольный); видом подъемно-транспортного оборудования (таль, электрический погрузчик, мостовой кран и т. д.).

В результате исследования типовых проектов РОБ сельхозпроизводителей были установлены два направления создания проектов современных предприятий технического сервиса<sup>24–26</sup>: 1) расширение производственных зон и участков, осуществляющих проведение наружной мойки, ТО и диагностирования сложной сельскохозяйственной техники; 2) размещение крытых стоянок машин (как для длительного хранения, так и кратковременного хранения) и под-

разделений материально-технического обеспечения в одном производственном корпусе по ТО и ремонту автотракторной, комбайновой и другой сельскохозяйственной техники.

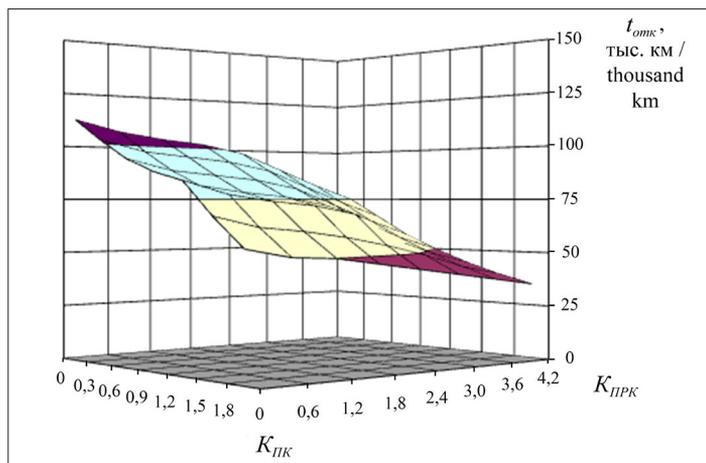
Рассмотрим вопрос совмещения и перепланировки КДР и РР [12; 14] с целью повышения показателей надежности в условиях современных предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей на примере трансмиссии автомобилей сельскохозяйственного назначения ГАЗ-САЗ-3507, ГАЗ-САЗ-2506 и ГАЗ-САЗ-2504. Целесообразность применения правил перепланировки КДР и РР возникает, во-первых, исходя из случайного характера наработки на устранение последствий отказа; во-вторых, если фактическая доля отработанного межконтрольного периода узла от предыдущей КДР аналогичного вида составляет значительную величину. Следовательно, заключение о назначении конкретного вида КДР в обоих случаях (профилактическая замена или устранение последствий отказа) принимается в результате определения фактического значения коэффициента перепланировки контрольных работ  $K_{ПК}^Ф$ . Для установления нормированного значения коэффициента перепланировки контрольных работ  $K_{ПК}$  с помощью математической модели проведено исследование зависимостей наработки на устранение последствий отказа  $t_{отк}$  и среднего доремонтного ресурса  $t_{ср}$  трансмиссии автомобилей при постоянных значениях других параметров оптимизации модели (рис. 4–5).

В период проведения РР увеличивается доступность параметров, которые диагностируются при КДР большего

<sup>24</sup> Юдина Е. М., Шепелев А. Б. Технический сервис машин и основы проектирования предприятий : учеб. для вузов. Краснодар : Изд-во Краснодар. ГАУ, 2007. 968 с. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=19511212>

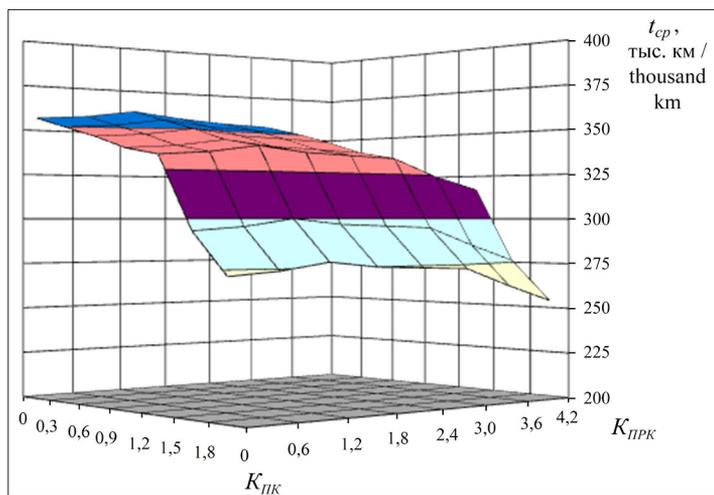
<sup>25</sup> Инновационные направления развития ремонтно-эксплуатационной базы для сельскохозяйственной техники : монография / С. А. Соловьев [и др.]. М. : Росинформагротех, 2014. 160 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23881795>

<sup>26</sup> Модернизация системы технического сервиса аграрного промышленного комплекса : монография / Л. И. Кушнарев [и др.]. М. : МЭСХ, 2015. 440 с. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=29142095>



Р и с. 4. Поверхность отклика наработки на устранение последствий отказа  $t_{омк}$  по нормируемым коэффициентам перепланировки различных видов контрольно-диагностических работ  $K_{ПК}$  и ремонтных работ  $K_{ПРК}$

F i g. 4. Surface response time to eliminate the consequences of the failure  $t_{омк}$  on the standardized re-planning factors of various types of control and diagnostic works  $K_{ПК}$  and repair work  $K_{ПРК}$



Р и с. 5. Поверхность отклика среднего доремонтного ресурса  $t_{ср}$  по нормируемым коэффициентам перепланировки различных видов контрольно-диагностических работ  $K_{ПК}$  и ремонтных работ  $K_{ПРК}$

F i g. 5. Surface response time of the mean pre-repair life  $t_{ср}$  for the standardized re-planning factors of various types of control and diagnostic works  $K_{ПК}$  and repair work  $K_{ПРК}$

объема, чем проведенная КДР (с меньшей глубиной разборочных операций). Другими словами, при большой наработке от предыдущей КДР того же вида, целесообразно проведение дополнительных разборочных операций, и КДР с большим объемом (например,

в период, предшествующий использованию автомобиля сельскохозяйственного назначения в составе МТА).

Заключение о совмещении КДР и РР может быть принято на основании сравнения фактического значения коэффициента перепланировки различ-

ных видов РР –  $K_{\text{ПРК}}^{\Phi}$  и оптимизируемо-го в модели нормированного значения  $K_{\text{ПРК}}$ . Для установления нормированного значения коэффициента перепланировки РР  $K_{\text{ПРК}}$  с помощью математической модели также проведено исследование зависимостей наработки на устранение последствий отказа  $t_{\text{омк}}$  и среднего доремонтного ресурса  $t_{\text{ср}}$  трансмиссии автомобилей при постоянных значениях других параметров оптимизации модели (рис. 4–5).

Анализ данных зависимостей показал, что максимальным значениям наработки на устранение последствий отказа  $t_{\text{омк}}$  и среднего доремонтного ресурса  $t_{\text{ср}}$  соответствуют минимальные значения коэффициентов перепланировки различных видов КДР –  $K_{\text{ПК}}$  и РР –  $K_{\text{ПРК}}$ . Увеличение  $K_{\text{ПК}}$  от 0 до 1,8 приводит к уменьшению наработки на устранение последствий отказа  $t_{\text{омк}}$  в 2,1 раза, а среднего доремонтного ресурса  $t_{\text{ср}}$  – на 26 %. Увеличение  $K_{\text{ПРК}}$  от 0 до 4,2 приводит к уменьшению наработки на устранение последствий отказа  $t_{\text{омк}}$  в 1,6 раза, а среднего доремонтного ресурса – на 9 %.

С помощью критерия оптимизации, принятого в математической модели (суммарные удельные издержки на проведение КДР, РР и устранение последствий отказов –  $C_{\text{уд}}$ ), были установлены оптимальные величины  $K_{\text{ПК}}^{\text{опт}} = 0,55$  и  $K_{\text{ПРК}}^{\text{опт}} = 1,05$ . Поэтому на современных предприятиях технического сервиса сельхозпроизводителей целесообразно совмещать КДР и РР с учетом правил перепланировки, поскольку они позволяют увеличить наработку на устранение последствий отказа и средний доремонтный ресурс трансмиссии автомобилей сельскохозяйственного назначения (в част-

ности, ГАЗ-СА3-3507, ГАЗ-СА3-2506 и ГАЗ-СА3-2504).

### Обсуждение и заключения

Результаты исследований структуры РОБ сельхозпроизводителей показали, что на 95 % предприятий технического сервиса она не отвечает современным требованиям. Имеющиеся производственные корпуса предприятий технического сервиса являются постройками 1950–70-х гг., а следовательно, имеют большой процент амортизационного износа.

Установлены группы факторов, в зависимости от которых необходимо назначать строительные нормы расстояний и окончательно определять площади производственных участков и корпусов предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей.

Определены два основных направления создания современных проектов предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей: 1) увеличение масштабов и количества производственных зон и участков по проведению наружной мойки машин, ТО и диагностирования сложной техники; 2) создание и размещение зон хранения сельскохозяйственной техники и материально-технического обеспечения в одном производственном корпусе, осуществляющем различные виды технического сервиса.

Проведенные исследования правил совмещения КДР и РР показали целесообразность их использования на рабочих местах и участках современных предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей, поскольку они позволяют значительно увеличить показатели безотказности и долговечности агрегатов машин сельскохозяйственного назначения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Королькова А. П., Голубев И. Г., Корольков Н. В. Организация сервисного обслуживания сельскохозяйственной техники зарубежными компаниями // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 119. С. 129–132. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23766490>



2. **Голубев И. Г., Королькова А. П.** Сокращение парка сельскохозяйственной техники и проблемы их сервиса // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 121. С. 76–79. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25411004>
3. **Черноиванов В. И.** Инженерные службы АПК России: обеспечение выполнения госпрограммы развития сельского хозяйства на 2013–2020 годы // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2013. № 1. С. 2–7. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18894802>
4. **Голубев И. Г., Фадеев А. Ю., Макуев В. А.** Оценка качества технического сервиса тракторов // Техника и оборудование для села. 2010. № 7. С. 40–41. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15274630>
5. **Голубев И. Г., Табаков П. А.** Опыт восстановления деталей для сельскохозяйственной техники // Техника и оборудование для села. 2013. № 2. С. 39–40. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18820376>
6. **Лялякин В. П., Голубев И. Г.** Перспективы восстановления деталей сельскохозяйственной техники // Техника и оборудование для села. 2016. № 4. С. 41–43. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26164986>
7. **Shelkovnikov S. A., Petukhova M. S., Nikolaenko N. N.** Assessment of the state's impact in the results of the agricultural production // British Journal for Social and Economic Research. 2016. Vol. 1, no. 1. P. 5–12. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27421449>
8. **Barsukova G. N.** Appraisal of the results of the modern land reform of the Russian Federation based on tendency to deformation of the agricultural area // British Journal for Social and Economic Research. 2016. Vol. 1, no. 1. P. 13–22. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=27421450>
9. **Kosyakova L. N., Popova A. L.** Innovative policy in the agricultural sphere // British Journal for Social and Economic Research. 2016. Vol. 1, no. 2. P. 29–38. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27446442>
10. **Barsukova G. N., Mironenko L. A., Yurchenko K. A.** Modeling of the planting acreage structure with regard to a maintenance of the soil fertility // British Journal for Social and Economic Research. 2016. Vol. 1, no. 2. P. 39–47. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27446443>
11. **Moiseyev A. V., Moiseyev V. V.** Actions for increase in overall performance of the agrarian seed-growing enterprise // British Journal for Social and Economic Research. 2016. Vol. 1, no. 3. P. 25–32. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29038255>
12. **Комаров В. А.** Обоснование правил назначения объемов попутных контроля и ремонта для агрегатов трансмиссии автомобилей // Вестник Мордовского университета. 2004. Т. 14, № 1-2. С. 140–147. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/obosnovanie-pravil-naznacheniya-obemov-poputnyh-kontrolya-i-remonta-dlya-agregatov-transmissii-avtomobiley>
13. **Комаров В. А.** Влияние региональных условий эксплуатации на формирование структуры и содержания системы технического обслуживания и ремонта машин // Вестник Мордовского университета. 2004. Т. 14, № 3-4. С. 166–171. URL: <http://vestnik.mrsu.ru/content/pdf/04-34.pdf>
14. **Комаров В. А.** Назначение технических критериев предельного состояния агрегатов машин // Вестник Мордовского университета. 2005. Т. 15, № 3-4. С. 159–165. URL: <http://vestnik.mrsu.ru/content/pdf/05-34.pdf>
15. **Комаров В. А., Наумкин Н. И., Нуянзин Е. А.** Междисциплинарные проекты в агроинженерном образовании // Техника и оборудование для села. 2015. № 10. С. 41–43. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=24503422>
16. **Григорьев А. В., Комаров В. А.** Обеспечение показателей долговечности ремонтно-технологического оборудования // Тракторы и сельхозмашины. 2011. № 10. С. 43–45. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=17285020>
17. **Комаров В. А., Лезин П. П., Григорьев А. В.** Прогнозирование долговечности узлов ремонтно-технологического оборудования предприятий АПК // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 9. С. 46–48. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=18083299>
18. **Комаров В. А., Григорьев А. В.** Анализ свойств упрочненных поверхностей деталей узлов ремонтно-технологического оборудования // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 10. С. 44–46. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=18224831>

19. **Комаров В. А., Григорьев А. В., Мартышкин А. П.** Целевые функции оптимизации параметров точности технологического оборудования // Тракторы и сельхозмашины. 2013. № 7. С. 44–47. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=19143271>

20. **Григорьев А. В., Комаров В. А.** Прогнозирование параметрической надежности узлов технологического оборудования по выходным параметрам точности // Тракторы и сельхозмашины. 2013. № 8. С. 51–53. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=20196621>

21. **Комаров В. А., Григорьев А. В.** Моделирование контролируемых параметров точности узлов технологического оборудования в зависимости от износа базовых деталей // Тракторы и сельхозмашины. 2013. № 12. С. 16–19. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=20808577>

22. **Комаров В. А., Мачнев В. А., Григорьев А. В.** Формирование надежности ремонтно-технологического оборудования на сервисных предприятиях // Техника и оборудование для села. 2015. № 5. С. 33–36. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=23502526>

23. Обеспечение долговечности покрытий шеек коленчатых валов автотракторной техники / А. И. Фомин [и др.] // Техника и оборудование для села. 2016. Т. 225, № 2. С. 44–48. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25625907>

24. Обоснование применения ремонтно-восстановительных воздействий для деталей турбокомпрессоров / П. В. Сенин [и др.] // Нива Поволжья. 2017. Т. 42, № 1. С. 91–98. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-primeneniya-remontno-vozstanovitelnyh-vozdeystviy-dlya-detaley-turbokompressorov>

25. **Фомин А. И., Комаров В. А., Нуязин Е. А.** Формирование работоспособного поверхностного слоя для обеспечения надежности коленчатых валов автотракторной техники // Техника и оборудование для села. 2017. № 5. С. 26–31. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=29257086>

26. Ремонт турбокомпрессоров двигателей сельскохозяйственной техники / П. П. Лезин [и др.] // Техника и оборудование для села. 2017. № 8. С. 40–45. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=30040706>

*Поступила 28.02.2018; принята к публикации 02.04.2018; опубликована онлайн 29.06.2018*

*Об авторе:*

**Комаров Владимир Александрович**, профессор кафедры технического сервиса машин, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: G-8673-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1910-2923>, [komarov.v.a2010@mail.ru](mailto:komarov.v.a2010@mail.ru)

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Korolkova A. P., Golubev I. G., Korolkov N. V. Organization and efficiency of service of agricultural machinery of foreign. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2015; 119:129–132. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=23766490> (In Russ.)

2. Golubev I. G., Korolkova A. P. The reduction of the fleet of agricultural machinery and problems of their service. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2015; 121:76–79. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25411004> (In Russ.)

3. Chernoiyanov V. I. [Engineering services of the AIC of Russia: Ensuring the implementation of the state program for the development of agriculture for 2013–2020]. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machines and Technologies*. 2013; 1:2–7. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=18894802> (In Russ.)

4. Golubev I. G., Fadeev A. Yu., Makuev V. A. Tractors servicing quality assessment. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela = Machinery and Equipment for Countryside*. 2010; 7:40–41. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=15274630> (In Russ.)



5. Golubev I. G., Tabakov P. A. The experience in agricultural machinery parts reconditioning. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela = Machinery and Equipment for Countryside*. 2013; 2:39–40. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=18820376> (In Russ.)
6. Lyalyakin V. P., Golubev I. G. Prospects of recondition of agricultural machinery parts. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela = Machinery and Equipment for Countryside*. 2016; 4:41–43. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=26164986> (In Russ.)
7. Shelkovnikov S. A., Petukhova M. S., Nikolaenko N. N. Assessment of the state's impact in the results of the agricultural production. *British Journal for Social and Economic Research*. 2016; 1(1):5–12. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=27421449>
8. Barsukova G. N. Appraisal of the results of the modern land reform of the Russian Federation based on tendency to deformation of the agricultural area. *British Journal for Social and Economic Research*. 2016; 1(1):13–22. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=27421450>
9. Kosyakova L. N., Popova A. L. Innovative policy in the agricultural sphere. *British Journal for Social and Economic Research*. 2016; 1(2):29–38. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=27446442>
10. Barsukova G. N., Mironenko L. A., Yurchenko K. A. Modeling of the planting acreage structure with regard to a maintenance of the soil fertility. *British Journal for Social and Economic Research*. 2016; 1(2):39–47. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=27446443>
11. Moiseyev A. V., Moiseyev V. V. Actions for increase in overall performance of the agrarian seed-growing enterprise. *British Journal for Social and Economic Research*. 2016; 1(3):25–32. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=29038255>
12. Komarov V. A. [Justification of the rules for assigning the volumes of passing control and repair for vehicles transmissions]. *Vestnik Mordovskogo universiteta = Mordovia University Bulletin*. 2004; 14(1-2):140–147. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/v/obosnovanie-pravil-naznacheniya-obemov-poputnyh-kontrolya-i-remonta-dlya-agregatov-transmissii-avtomobilye> (In Russ.)
13. Komarov V. A. [The impact of regional operating conditions on the formation of the structure and content of the system of maintenance and repair of machinery]. *Vestnik Mordovskogo universiteta = Mordovia University Bulletin*. 2004; 14(3-4):166–171. Available at: <http://vestnik.mrsu.ru/content/pdf/04-34.pdf> (In Russ.)
14. Komarov V. A. [Designation of technical criteria for the ultimate state of machine assemblies]. *Vestnik Mordovskogo universiteta = Mordovia University Bulletin*. 2005; 15(3-4):159–165. Available at: <http://vestnik.mrsu.ru/content/pdf/05-34.pdf> (In Russ.)
15. Komarov V. A., Naumkin N. I., Nuyanzin Ye. A. The interdisciplinary projects in agricultural engineering education. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela = Machinery and Equipment for Countryside*. 2015; 10:41–43. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=24503422> (In Russ.)
16. Grigoryev A. V., Komarov V. A. Ensuring the life characteristics of repairing and processing equipment. *Traktory i selkhoz mashiny = Tractors and Agricultural Machinery*. 2011; 10:43–45. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=17285020> (In Russ.)
17. Komarov V. A., Lezin P. P., Grigoryev A. V. Forecasting of service life of knots of repair and technological equipment in the enterprises of agrarian and industrial complex. *Traktory i selkhoz mashiny = Tractors and Agricultural Machinery*. 2012; 9:46–48. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=18083299> (In Russ.)
18. Komarov V. A., Grigoryev A. V. Analysing the properties of hardened surfaces of knots' parts of repair-technological equipment. *Traktory i selkhoz mashiny = Tractors and Agricultural Machinery*. 2012; 10:44–46. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=18224831> (In Russ.)
19. Komarov V. A., Grigoryev A. V., Martyshkin A. P. Target functions of parameters optimization of technological equipment precision. *Traktory i selkhoz mashiny = Tractors and Agricultural Machinery*. 2013; 7:44–47. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=19143271> (In Russ.)
20. Grigoryev A. V., Komarov V. A. Forecasting of parametric reliability of technological equipment units by output accuracy parameters. *Traktory i selkhoz mashiny = Tractors and Agricultural Machinery*. 2013; 8:51–53. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=20196621> (In Russ.)

21. Komarov V. A., Grigoryev A. V. Modeling of controlled accuracy parameters of production machinery assemblies depending on the basic parts wear. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2013; 12:16–19. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=20808577> (In Russ.)
22. Komarov V. A., Machnev V. A., Grigoriev A. V. Formation of reliable repair and processing equipment at service enterprises. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela* = Machinery and Equipment for Countryside. 2015; 5:33–36. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=23502526> (In Russ.)
23. Fomin A. I., Senin P. V., Komarov V. A., Nuyanzin E. A. Durability of coatings of crankshaft necks for motor and tractor machinery. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela* = Machinery and Equipment for Countryside. 2016; 225(2):44–48. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25625907> (In Russ.)
24. Senin P. V., Machnev V. A., Komarov V. A., Ovchinnikov A. Yu., Vlaskin V. V. Reasoning for using repair-recovery impacts for turbochargers parts. *Niva Povolzhya* = Cornfield of Volga Region. 2017; 42(1):91–98. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-primeneniya-remontno-vosstanovitelnyh-vozdeystviy-dlya-detaley-turbokompressorov> (In Russ.)
25. Fomin A. I., Komarov V. A., Nuyanzin E. A. Formation of operating surface layer for reliability of crankshafts of motor and tractor machinery. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela* = Machinery and Equipment for Countryside. 2017; 5:26–31. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=29257086> (In Russ.)
26. Lezin P. P., Komarov V. A., Vlaskin V. V., Ovchinnikov A. Yu. Repair of turbochargers of agricultural machinery engines. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela* = Machinery and Equipment for Countryside. 2017; 8:40–45. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=30040706> (In Russ.)

*Received 28.02.2018; revised 02.04.2018; published online 29.06.2018*

*About author:*

**Vladimir A. Komarov**, Professor, Chair of Technical Service of Machines, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 640005, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: G-8673-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1910-2923>, [komarov.v.a2010@mail.ru](mailto:komarov.v.a2010@mail.ru)

*The author has read and approved the final version of the paper.*



## Технологическая настройка сельскохозяйственных машин на основе нечеткой логики

**В. П. Димитров\***, **Л. В. Борисова**, **А. К. Тугенгольд**,  
**И. Н. Нурутдинова**

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

\*kaf-qm@donstu.ru

*Введение.* Поиск оптимальных значений регулируемых параметров зерноуборочного комбайна в полевых условиях является нетривиальной задачей. Повысить уровень качества уборочных работ можно одновременным совершенствованием конструкции машины и внедрением интеллектуальных автоматизированных систем на основе нечеткого управления. В работе рассматривается задача информационной поддержки при принятии решений о предварительной технологической настройке сложных уборочных машин, функционирующих в постоянно меняющихся полевых условиях. Объект исследования – зерноуборочный комбайн.

*Материалы и методы.* При проведении технологической настройки комбайна в процессе уборки анализировалась поступающая количественная, качественная и оценочная информация. Для нахождения оптимальных начальных значений регулируемых параметров применялись логико-лингвистический подход и математический аппарат нечеткой логики. Основой механизма логического вывода решений послужила композиция нечетких отношений семантических пространств внешних факторов и регулируемых параметров машины. Предлагаемая схема принятия решений, основанная на нечетких экспертных знаниях, включает этапы фаззификации, композиции и дефаззификации. Для вычислений использовалась среда MATLAB, в частности, пакет прикладных программ Fuzzy Logic Toolbox.

*Результаты исследования.* Рассмотрены вопросы создания базы экспертных знаний, количественной оценки согласованности экспертной информации, предназначенной для дальнейшего дедуктивного вывода решений в различных задачах предварительной настройки. Предложенная схема принятия решений проиллюстрирована на примере выбора значений одного из наиболее важных регулируемых параметров – частоты вращения крыла вентилятора очистки. Построены модели факторов внешней среды и регулируемых параметров комбайна в виде семантических пространств и соответствующих им функций принадлежности. Обобщенная модель предметной области имеет вид:

$$R = X \rightarrow Y,$$

где  $R$  – нечеткое отношение «факторы внешней среды – параметры регулировки»  $R\{X_i, T(X_i), U, G, M\} \times \{Y_j, T(Y_j), U, G, M\}$ ;  $\forall (x, y) \in X \times Y$ ;  $X_i$  и  $Y_i$  – наименования лингвистических переменных;  $T$  – множество значений лингвистической переменной, или термов, представляющих собой наименования нечетких переменных, определенных на множестве  $U$ ;  $G$  – синтаксическая процедура, описывающая процесс образования из множества  $T$  новых значений лингвистической переменной;  $M$  – семантическая процедура, позволяющая отобразить каждое новое значение, образуемое процедурой  $G$ , в нечеткую переменную. Создана база продукционных правил для нечеткого логического вывода и приведен ее фрагмент для одной из сельскохозяйственных культур.

*Обсуждение и заключения.* Применение логико-лингвистического подхода к решению задачи предварительной настройки машин дает возможность учета всех видов поступающей о внешней среде информации: количественной, качественной, эвристической. Это обеспечивает максимальную адекватность описания реальных условий уборки и, соответственно, оптимальность принятых на основе экспертной информации решений о параметрах настройки.

**Ключевые слова:** молотилка комбайна, вентилятор очистки, технологическая настройка, экспертные знания, нечеткое множество, лингвистическое описание, нечеткий логический вывод, фаззификация, композиция, дефаззификация

*Для цитирования:* Технологическая настройка сельскохозяйственных машин на основе нечеткой логики / В. П. Димитров [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 2. С. 239–254. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.239-254>

## Technological Adjustment of Agricultural Machines Based on Fuzzy Logic

V. P. Dimitrov\*, L. V. Borisova, A. K. Tugengold,  
I. N. Nurutdinova

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

\**kaf-qm@donstu.ru*

*Introduction.* The search for optimal values of the adjustable parameters of a combine harvester in the field is a complex challenge. Both improving the design of the machine and using of automated systems based on fuzzy control increases the quality of harvesting. The article describes information support for the preliminary technological adjustment of complex harvesting machines that operate in changing field conditions. The object of research is a combine harvester.

*Materials and Methods.* We analyzed the quantitative, qualitative and estimated information during the technological adjustment of the harvesting machine. We used a logical-linguistic approach and a mathematical apparatus of fuzzy logic to find the optimal values of the parameters. The composition of fuzzy relationships between the semantic spaces of external factors and the controlled parameters of the machine was used as the basis of the mechanism for the logical derivation of solutions. The developed paradigm of decision-making based on fuzzy expert knowledge includes the stages of fuzzification, composition and defuzzification. MATLAB environment and Fuzzy Logic Toolbox software were used for calculations.

*Results.* The questions of creation of the expert knowledge base, a quantitative evaluation of the consistency of expert information intended for further deductive inference of solutions in various problems of preliminary tuning are considered. The proposed decision-making scheme is illustrated by the example of selecting the values of the rotation frequency of the separator fan. This is one of the most important adjustable parameters. Models of environmental factors and adjustable parameters of the combine are constructed in the form of semantic spaces and their corresponding membership functions. The generalized domain model has the form:

$$R = X \rightarrow Y,$$

where  $R$  is the fuzzy relation “environmental factors – adjustment parameters”  $R\{X_i, T(X_i), U, G, M\} \times \{Y_j, T(Y_j), U, G, M\}$ ;  $\forall(x, y) \in X \times Y$ ;  $X_i$  and  $Y_i$  are linguistic variables;  $T$  is plurality of values of the linguistic variable, or terms, which are here fuzzy variables defined on a plurality of  $U$ ;  $G$  is syntactic procedure describing the process of formation of a plurality of  $T$  new values of the linguistic variable;  $M$  is a semantic procedure that allows each new value generated by procedure  $G$  to be displayed in a fuzzy variable. A database of production rules for fuzzy inference is created and its fragment is given for one of the crops.



*Conclusions.* Application of the logical-linguistic approach to solving the problem of preliminary tuning of machines makes it possible to take into account all types of quantitative, qualitative and heuristic information about the external environment. This ensures the maximum adequacy of the description of the actual harvesting conditions and the optimality of the decisions taken on the settings based on expert information.

*Keywords:* combine thresher, separator fan, technological adjustment, expert knowledge, fuzzy set, linguistic description, fuzzy inference, fuzzification, composition, defuzzification

*For citation:* Dimitrov V. P., Borisova L. V., Tugengold A. K., Nurutdinova I. N. Technological Adjustment of Agricultural Machines Based on Fuzzy Logic. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(2):239–254. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.239-254>

## Введение

Поиск оптимальных значений регулируемых параметров зерноуборочного комбайна в полевых условиях является нетривиальной задачей. Трудность ее решения обусловлена не только вариабельностью внешних условий, но и сложностью взаимосвязей «факторы среды – регулируемые параметры машины». Точные значения внешних факторов неизвестны, их оценки носят экспертный или качественный характер, а закономерности между регулируемыми параметрами и факторами внешней среды известны только приближенно. В результате решения, принятые оператором по управлению уборочной машиной, могут быть неоптимальными, что повлечет за собой прямые потери зерна, а также его механическое повреждение, увеличение простоя машины и сроков уборки урожая из-за длительного поиска причины нарушения технологического процесса<sup>1</sup>. Все это приводит к увеличению себестоимости зерна и его биологическим потерям.

Одним из основных рабочих органов комбайна, определяющим качество уборки, является молотилка. Неверно выбранные параметры работы молотилки приводят к ухудшению показателей

качества уборки. Важнейший процесс в работе молотилки – очистка зернового вороха. Среди регулируемых параметров данного агрегата наиболее важным и часто используемым является частота вращения крыла вентилятора очистки [1]. Значимость рассмотрения данного параметра обусловлена его влиянием на ряд показателей качества работы зернокомбайна в целом<sup>2</sup>. При неверном выборе значений могут наблюдаться такие отклонения показателей качества работы как повышенные потери свободного зерна с половой, засоренность зерна в бункере, повышенные потери зерна в необмолоченном колосе с половой (недомолот в полове) и др.

Задача технологической настройки рабочих органов комбайна предполагает принятие решения в нечетких внешних условиях, при наличии сложных и часто неоднозначных взаимосвязей признаков с размытыми границами, а также высказываний с различной степенью истинности.

В работе рассматривается задача конструирования процедур принятия решений на основе нечеткой исходной информации. Объект исследования – зерноуборочный комбайн, функционирующий в сложных полевых условиях.

<sup>1</sup> Рыбалко А. Г. Особенности уборки высокоурожайных зерновых культур (настройка и регулировка машин) : учеб. пособие. М. : Агропромиздат, 1988. 118 с. URL: <http://search.rsl.ru/ru/record/01001410620>

<sup>2</sup> Димитров В. П., Борисова Л. В. Теоретические и прикладные аспекты разработки экспертных систем для технического обслуживания машин. Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2007. 202 с.

### Обзор литературы

Задача технологической настройки уборочной техники в ряде работ [1–4] решалась с помощью методов математического моделирования с использованием регрессионных моделей. В них используются эмпирические формулы, полученные в результате обработки экспериментальных данных. Например, в статье [4] получены эмпирические зависимости показателей качества, таких как потери за комбайном, потери за молотилкой, дробление зерна, сорная примесь. В числе внешних факторов учитывались влажность соломы, масса 1 000 зерен, скорость комбайна, урожайность и влажность зерна. Однако данный подход не получил значительного распространения.

Очевидно, что невозможно достаточно точно описать свойства технологического процесса, используя заранее построенные регрессионные модели. Достоверность прогноза на основе таких моделей определяется достоверностью значений входных факторов, колебания которых в условиях эксперимента сведены к минимуму, что ставит под сомнение применимость самой модели в реальных условиях. Кроме того, в подобных моделях необходимо учитывать корреляцию факторов; при этом определить экспериментальным путем влияние одного из факторов при фиксированных значениях других – достаточно сложная, а иногда и невозможная задача. В результате имеющиеся корреляционно-регрессионные модели представляют собой громоздкие математические конструкции, не всегда верно отражающие действительность, и их использование в реальном времени в условиях уборки урожая затруднено. Авторы предлагаемых моделей также отмечают этот факт и рекомендуют использовать уравнения только для оценочных процедур.

Повысить уровень качества уборочных работ можно одновременным совершенствованием конструкции машины и внедрением интеллектуальных

автоматизированных систем на основе нечеткого управления [5]. Интеллектуальные информационные системы (ИИС) аккумулируют различные виды знаний, включая экспертные и эвристические, используют накопленный опыт работы в разных, в т. ч. экстремальных, условиях. Использование ИИС позволяет быстро реагировать на изменяющиеся условия работы и в значительной степени снижает информационную нагрузку на оператора. Подобные системы используются в сельскохозяйственном производстве, в основном в связи с анализом изображений, погодных условий, переработкой или сортировкой продукции, идентификацией сорняков, оценкой урожая и т. д. [6–7].

В других работах были исследованы вопросы автоматического выбора некоторых параметров функционирования комбайна на основе показателей качества с использованием продукционных правил, сформированных на основе экспертных знаний [8–9].

### Материалы и методы

Приведем методику решения задачи выбора начальных значений регулируемых параметров и проиллюстрируем ее на примере выбора значения одного из основных параметров – частоты вращения крыльча вентилятора очистки. Известно, что решение задачи на основе нечеткого управления содержит три этапа: фаззификацию, композицию и дефаззификацию [10–11].

Этап фаззификации включает ряд подзадач: определение носителя, выбор базового терм-множества, проверка требований к построению функций принадлежности (ФП), определение метода построения ФП, оценка согласованности нечетких экспертных знаний, построение обобщенной ФП.

В результате фаззификации исследуемой предметной области было произведено лингвистическое описание условий задачи, а также определены ФП регулируемых параметров и внешних факторов. При этом рассматрива-



лись нормальные нечеткие множества, для которых высота, т. е. верхняя граница ФП равна 1, ( $\sup_{x \in E} \mu_A(x) = 1$ ). Нечеткие множества могут быть как уни-модальными, т. е. ( $\mu_A(x) = 1$ ) только на одном  $x$  из  $E$ , так и имеющими область толерантности.

На основе методологии лингвистического подхода к изучению сложных технических систем [9] нами были построены модели факторов внешней среды (признаки  $X$ ) и регулируемых параметров комбайна (признаки  $Y$ ) в виде семантических пространств и соответствующих им ФП:

$$\begin{aligned} & \{X_i, T(X_i), U, G, M\}, \\ & \mu_R(x_1, x_2, \dots, x_i) \in (0; 1); \\ & \{Y_j, T(Y_j), U, G, M\}, \\ & \mu_R(y_1, y_2, \dots, y_j) \in (0; 1), \end{aligned}$$

где  $X_i$  и  $Y_i$  – наименования лингвистических переменных (ЛП);  $T$  – множество значений ЛП, или термов, представляющих собой наименования нечетких переменных, определенных на множестве  $U$ ;  $G$  – синтаксическая процедура, описывающая процесс образования из множества  $T$  новых значений ЛП;  $M$  – семантическая процедура, позволяющая отобразить каждое новое значение, образуемое процедурой  $G$ , в нечеткую переменную.

Обобщенная модель предметной области «предварительная настройка» имеет вид композиции нечетких отношений рассматриваемых семантических пространств:

$$R = X \rightarrow Y,$$

где  $R$  – нечеткое отношение «факторы внешней среды – параметры регулировки»,

$$\begin{aligned} & R\{X_i, T(X_i), U, G, M\} \cdot \\ & \cdot \{Y_j, T(Y_j), U, G, M\}; \forall (x, y) \in X \cdot Y. \end{aligned}$$

Множество факторов внешней среды и регулируемых параметров характеризуется соответствующими ЛП. Необходимо определить базовые термножества для всех ЛП. В общем случае такое множество имеет вид<sup>3</sup>:

$$T_i = \{T_1^i, T_2^i, \dots, T_m^i\}, \quad (i \in K = \{1, 2, \dots, l\}),$$

где  $\langle T_i, X; \tilde{C}_i \rangle$  – нечеткая переменная, соответствующая терму  $T_i \in T$ ;  $\tilde{C}_i = \{\langle \mu_{C_i}(x) / x \rangle \mid x \in X$ ;  $C_i$  – носитель нечеткого множества  $C_i$ ;  $\mu_{C_i}(x)$  – функция принадлежности. В качестве носителя используется подмножество значений ЛП. Базовое термножество формируется на основе экспертных суждений.

Значимым этапом является выбор метода построения ФП. В моделях принятия решений на основе нечеткой экспертной информации применяются метод экспертных оценок, метод парных сравнений, метод деления значений ФП пополам, использование набора стандартных функций и др.

Представление ФП с помощью стандартных функций, задаваемых параметрически, является наиболее предпочтительным. Вид функции задается аксиоматически, а ее параметры оцениваются экспертами, что обеспечивает удобство и простоту построения. Например, в случае треугольной формы ФП указываются параметры  $x_1, x_2, x_3$ , при которых она принимает единичное и нулевые значения, т. е.  $\mu_A(x_2) = 1$  и для всех  $x_3 \leq x \leq x_1$  имеет место  $\mu_A(x) = 0$ . Вместе с тем использование данного представления предусматривает проверку соответствия типовых форм (треугольной, трапециевидной и др.) внешним условиям. Основанием для выбора

<sup>3</sup> Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А. Н. Аверкин [и др.]; под ред. Д. А. Поспелова. М.: Наука, 1986. 312 с.

конкретного вида ФП служат различные предположения о таких свойствах данных функций как симметричность, монотонность и т. д.; учитывается специфика неопределенности, а также ее физический смысл.

Согласованность экспертной информации определяется несколькими критериями. К показателям парной согласованности относятся показатель  $d_{ij}^l$  различия моделей двух экспертов ( $i$ -го и  $j$ -го) в рамках  $l$ -го термина, который определяется как расстояние Хемминга<sup>4</sup> между нечеткими множествами с функциями принадлежности  $\mu_{ij}(x)$  и  $\mu_{ji}(x)$ , и показатель согласованности  $k_{ij}^l$  [12]:

$$d_{ij}^l = \int_0^1 |\mu_{il}(x) - \mu_{jl}(x)| dx,$$

$$k_{ij}^l = \frac{\int_0^1 \min[\mu_{il}(x), \mu_{jl}(x)] dx}{\int_0^1 \max[\mu_{il}(x), \mu_{jl}(x)] dx}. \quad (1)$$

Величины  $d_{ij}^l$  и  $k_{ij}^l$  образуют матрицы нечеткости  $D^l$  и парной согласованности  $K^l$  в рамках  $l$ -го термина. На основе этих матриц, полученных для каждого из термов, находятся матрицы нечеткости  $D$  и парной согласованности  $K$  моделей по всем термам. Их элементы определяются формулами [13]:

$$d_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m d_{ij}^l, \quad k_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m k_{ij}^l, \quad (2)$$

где  $m$  – число термов.

Для характеристики общей согласованности множества моделей экспертного оценивания признака вычисляют аддитивный  $k$  и мультипликативный  $\tilde{k}$  показатели [12]:

$$k = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m \frac{\int_0^1 \min_{\forall i=1,2,\dots,k} \mu_{il}(x) dx}{\int_0^1 \max_{\forall i=1,2,\dots,k} \mu_{il}(x) dx},$$

$$\tilde{k} = \sqrt[m]{\prod_{l=1}^m \frac{\int_0^1 \min_{\forall i=1,2,\dots,k} \mu_{il}(x) dx}{\int_0^1 \max_{\forall i=1,2,\dots,k} \mu_{il}(x) dx}}, \quad (3)$$

где  $l=1, 2, \dots, m$  – номер термина,  $i=1, 2, \dots, k$  – номер эксперта;  $\mu_{il}(x)$  – ФП, которую задал  $i$ -й эксперт для  $l$ -го термина.

Оценка согласованности экспертной информации является необходимым шагом на этапе фаззификации, поскольку определяет качество информации и отражает степень адекватности формального описания реальной ситуации, что позволяет использовать это описание в системе нечеткого логического вывода. Для формирования блока экспертной информации, удовлетворяющей всем требованиям, целесообразно использовать алгоритм, предложенный в [14].

В результате анализа предметной области «предварительная настройка» была создана база знаний, на которой основан логический вывод решения. База правил системы нечеткого вывода – это конечное множество правил нечетких продукций, согласованных относительно используемых в них ЛП. Данная база предназначена для формализации эмпирических знаний в исследуемой предметной области и обычно состоит из набора правил типа: ЕСЛИ «Условие\_1» ТО «Заключение\_1».

Основой механизма вывода решений ИИС служит модель предметной

<sup>4</sup> Кофман Л. Введение в теорию нечетких множеств / пер. с франц. М.: Радио и связь, 1982. 432 с.



области в виде композиции нечетких отношений семантических пространств внешних факторов и регулируемых параметров машины [15]. В общем случае развернутая форма нечеткого логического вывода для системы знаний имеет вид<sup>5</sup>:

$$\mu_{B'} = \bigvee_{x \in X} (\mu_{A'}(x) \wedge \mu_R(x, y)).$$

На этапе дефаззификации вычисляются точные значения результирующих ЛП. Наиболее распространенным является метод «центра тяжести»:

$$y' = \left( \int_Y y \mu_{B'}(y) dy \right) / \left( \int_Y \mu_{B'}(y) dy \right).$$

Для вычислений использовалась среда MATLAB, в частности, пакет прикладных программ Fuzzy Logic Toolbox. Также можно применить приближенную методику, имеющую достаточно высокую точность [16].

#### Результаты исследования

Проиллюстрируем перечисленные этапы решения задачи оптимальной технологической настройки зерноубо-

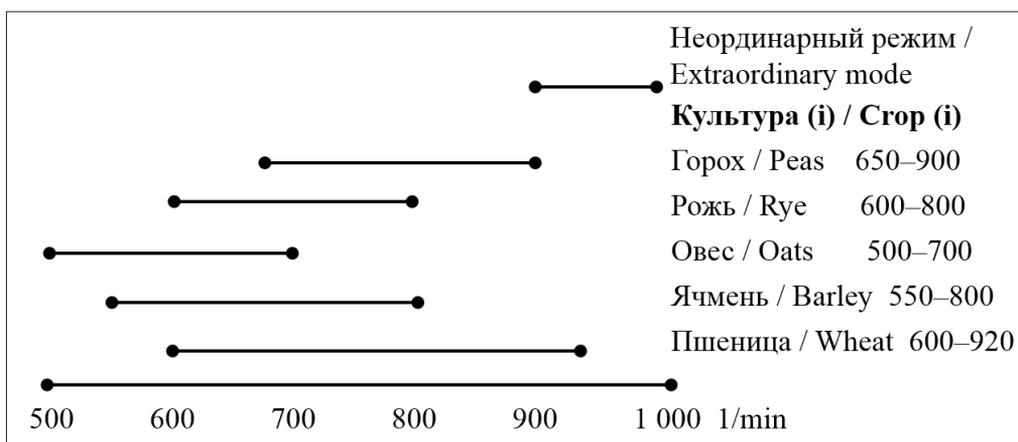
рочного комбайна на одном из регулируемых параметров – частоте вращения крыла вентилятора очистки.

На первом этапе определим лингвистическую шкалу. Опыт практической работы и анализ предметной области показали, что пределы изменения частоты вращения будут отличаться для различных культур. Наименования культур и значения пределов изменения носителя приведены на рис. 1.

Для описания термов в данной работе использовались типовые функции треугольного и трапециевидного вида, наиболее удобные для экспертного оценивания и дальнейшего применения на этапах вывода решения [17].

Лингвистическое описание входных факторов приведем для конкретной культуры – пшеницы. Известно, что в этом случае на рассматриваемый выходной параметр существенное влияние оказывают такие факторы внешней среды как урожайность, влажность хлебной массы, соломистость, засоренность [15].

Многообразие условий работы комбайна требует дифференциации таких показателей как урожайность, поэтому



Р и с. 1. Границы носителей для различных культур при оснащении комбайна копнителем

F i g. 1. Boundary of carriers for different crops when the combine is equipped with a digger

<sup>5</sup> Асаи К., Вагада Д., Сугэно С. Прикладные нечеткие системы / пер. с япон. М. : Мир, 1993. 368 с.

данный параметр целесообразно рассматривать для различных значений, в частности, урожайность ~ 50 ц/га, 40 ц/га и т. д. В данном примере используем урожайность ~ 50 ц/га, получим следующее лингвистическое описание рассматриваемых внешних факторов. Кортежи ЛП «Урожайность-50», «Влажность хлебопоя», «Соломистость» и «Засоренность хлебопоя» имеют вид:

<УРОЖАЙНОСТЬ-50, ц/га {Менее 50, Приблизительно 50, Более 50} [44–56] >  
УР = {УРМ50, УРП50, УРБ50} (рис. 2, а);

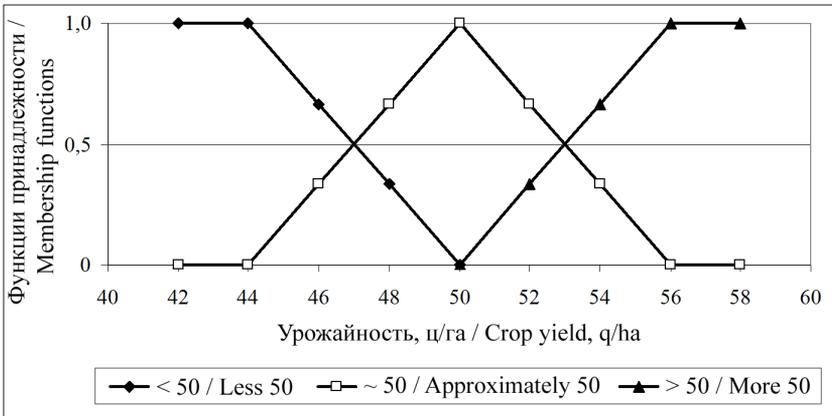
<ВЛАЖНОСТЬ ХЛЕБОПОЯ, % {Сухой, Нормальный, Влажный} [0–30] >  
ВХ = {СХл, НОРХл, ВЛХл} (рис. 2, б);

<ЗАСОРОЕННОСТЬ ХЛЕБОПОЯ, % {Низкая, Большая} [0–40] >  
ЗХ = {НЗХ, БЗХ} (рис. 2, с);

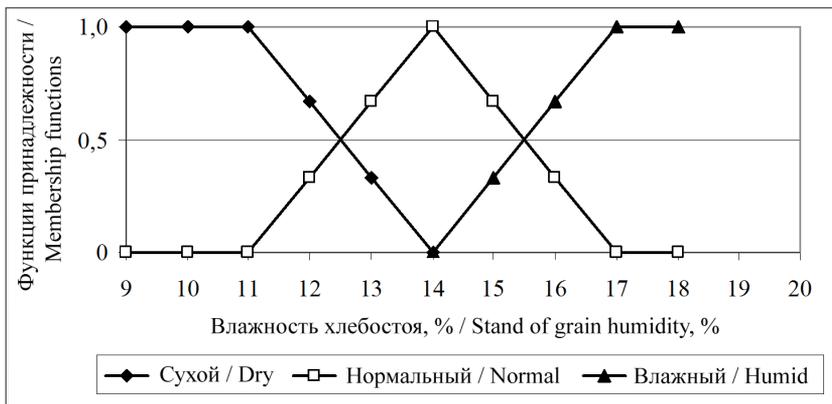
<СОЛОМИСТОСТЬ, % {Малая, Нормальная} [40–70] >  
СОЛ = {МСОЛ, НСОЛ} (рис. 2, d).

Кортеж ЛП «Частота вращения крыла вентилятора очистки» для различных культур имеет вид:

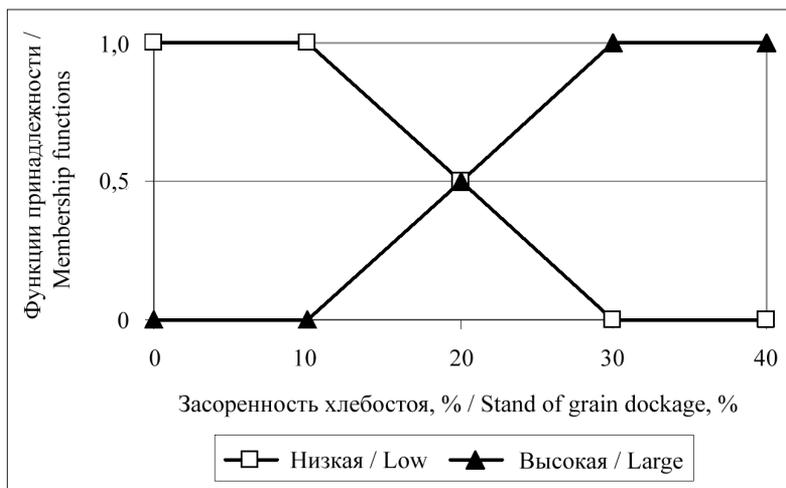
<ЧАСТОТА ВРАЩЕНИЯ КРЫЛАЧА ВЕНТИЛЯТОРА ОЧИСТКИ (культура (i)), об/мин {Очень низкая, Низкая, Ниже средней, Средняя, Выше средней, Высокая, Очень высокая [носитель (j)], >



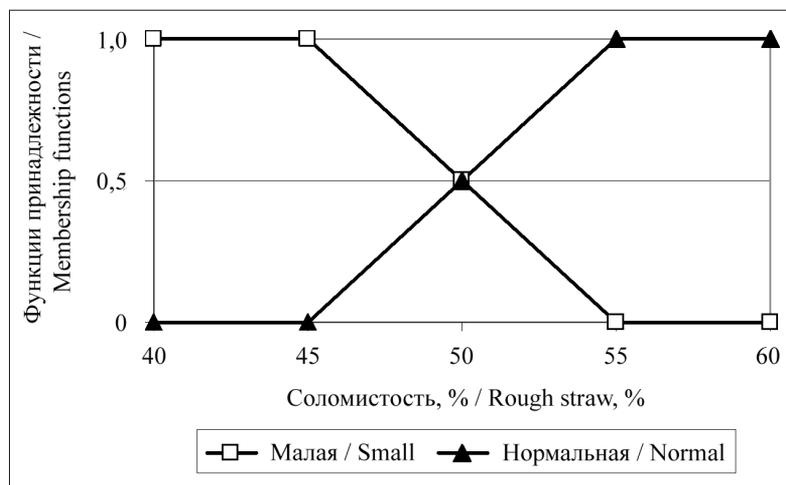
а)



б)



c)



d)

Р и с. 2. Функции принадлежности внешних факторов: а) «Урожайность-50»; б) «Влажность хлебоствя»; с) «Засоренность хлебоствя»; д) «Соломистость»

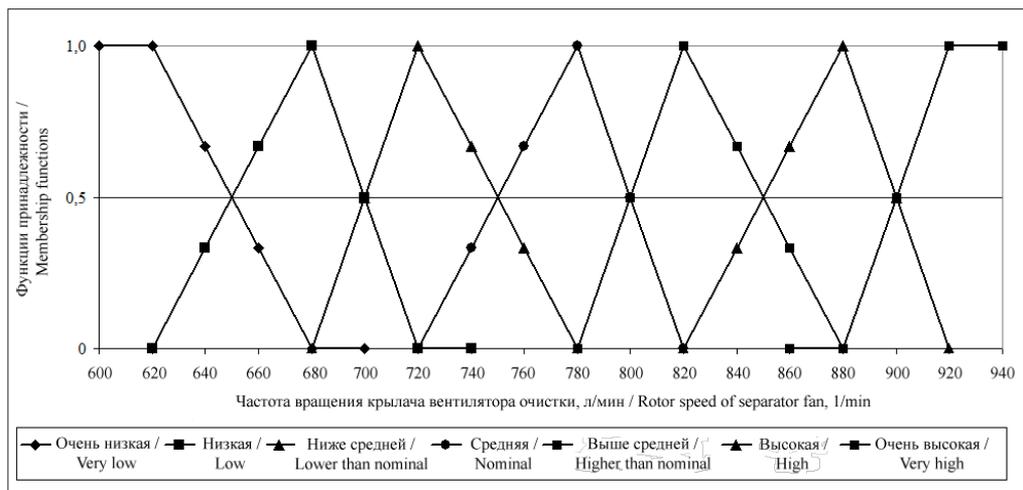
F i g. 2. Membership functions of external factors: а) «crop yield-50»; б) «grain humidity»; с) «grain dockage»; д) «rough straw»

ЧВКВО (к) = {ОН, Н, НС, С, ВС, В, ОВ, 1/мин},  $i, j \in 1, n$ .

Функция принадлежности ЛП «ЧВКВО» для пшеницы-50 представлена на рис. 3.

Существенным является вопрос выбора количества термов ЛП. С одной

стороны, оно должно быть достаточным, чтобы выявить и описать взаимодействия рассматриваемого фактора с показателями качества работы, а с другой – удобным для оценок и соответствующим точности измерений данного параметра. Поэтому перед выбором оптимального количества термов был проведен



Р и с. 3. Функция принадлежности лингвистической переменной «Частота вращения крыла вентилятора очистки» для пшеницы-50

Fig. 3. Membership function of linguistic variable “Rotor speed of separator fan” for wheat-50

априорный анализ предметной области и установлено, что указанные количества термов для всех ЛП удовлетворяют всем перечисленным требованиям. Кроме этого, был проведен апостериорный анализ по критерию согласованности экспертной информации; вычислены все характеристики согласованности по формулам (1–3). Приведем часть

результатов оценки согласованности, полученных для ЛП «ЧВКВО» для различных культур (табл. 1–2). Экспертная информация была получена от четырех экспертов.

Данные табл. 1–2 показывают достаточный уровень согласованности экспертной информации, а следовательно, используемое описание базово-

Таблица 1  
Table 1

Матрицы парной согласованности всех термов для различных культур  
The pair consistency matrices for all terms for various crops

Культура / Crop	Эксперт 1 / Expert 1	Эксперт 2 / Expert 2	Эксперт 3 / Expert 3	Эксперт 4 / Expert 4
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Пшеница / Wheat	1,000	0,992	0,735	0,907
	0,992	1,000	0,795	0,832
	0,735	0,795	1,000	0,813
	0,907	0,832	0,813	1,000
Ячмень / Barley	1,000	0,927	0,853	0,888
	0,927	1,000	0,796	0,873
	0,853	0,796	1,000	0,884
	0,888	0,873	0,884	1,000



1	2	3	4	5
Рожь / Rye	1,000	0,873	1,000	0,911
	0,873	1,000	0,873	0,955
	1,000	0,873	1,000	0,911
	0,911	0,955	0,911	1,000
Овес / Oats	1,000	0,807	0,875	0,920
	0,807	1,000	0,829	0,743
	0,875	0,829	1,000	0,795
	0,920	0,743	0,795	1,000
Горох / Peas	1,000	0,889	1,000	0,889
	0,889	1,000	0,889	1,000
	1,000	0,889	1,000	0,889
	0,889	1,000	0,899	1,000

Таблица 2

Table 2

**Показатели общей согласованности экспертных оценок функций принадлежности для различных культур**

**Indices of general consistency of expert assessments of membership functions for various crops**

$n$	Культура ( $i$ ) / Crop ( $i$ )	$k$	$\tilde{k}$
1	Пшеница / Wheat	0,734	0,727
2	Ячмень / Barley	0,783	0,774
3	Рожь / Rye	0,873	0,865
4	Овес / Oats	0,706	0,674
5	Горох / Peas	0,762	0,758

го терм-множества применимо на следующих этапах.

Приведем фрагмент базы знаний, созданной в результате анализа предметной области и послужившей основой логического вывода решения:

1 ЕСЛИ <Урожайность есть «меньше\_50» и Засоренность есть «низкая» и Соломистость есть «малая» и Влажность хлебостоя есть «сухой»> ТО <Частота вращения есть «очень\_низкая»>

2 ЕСЛИ <Урожайность есть «меньше\_50» и Засоренность есть «низкая» и Соломистость есть «малая» и Влаж-

ность хлебостоя есть «нормальный»> ТО <Частота вращения есть «ниже\_средней»>

...

36 ЕСЛИ <Урожайность есть «более\_50» и Засоренность есть «высокая» и Соломистость есть «нормальная» и Влажность хлебостоя есть «влажный»> ТО <Частота вращения есть «очень\_высокая»>.

Параметрами обобщенных ФП, как правило, служат усредненные значения представленных экспертами параметров. Способы усреднения могут быть

различными [18], в данной работе использованы средние арифметические значения.

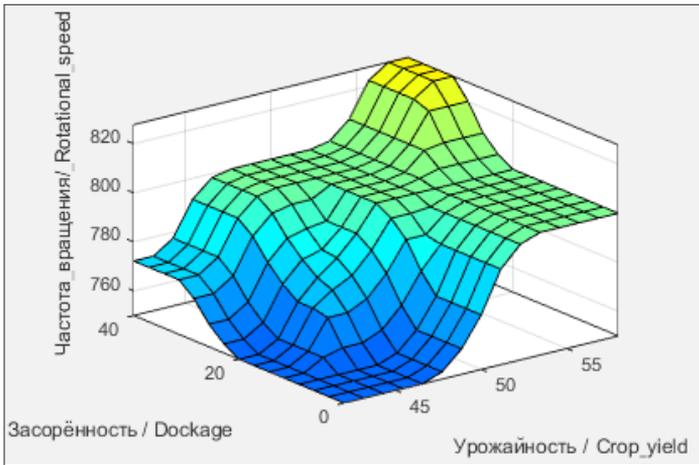
Нечеткий вывод является применением максиминной композиции в качестве композиционного правила нечеткого вывода и операции взятия минимума в качестве нечеткой импликации [15]:

$$\begin{aligned} \mu_{ПЧВКВО} &= \bigvee_{x \in X} (\mu_{ПВ}(x) \wedge \mu_R(x, y)) = \\ &= \bigvee_{x \in X} (\mu_{ПВ}(x) \wedge (\mu_{ОВ}(x) \wedge \mu_{ВЧВКВО}(y))) = \end{aligned}$$

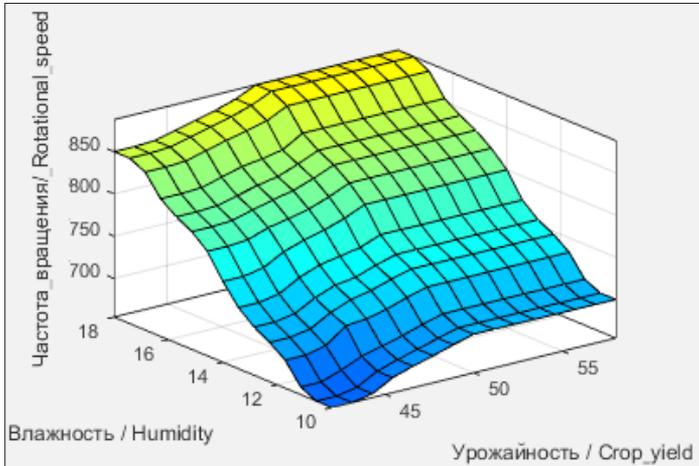
$$\begin{aligned} &= (\bigvee_{x \in X} \mu_{ПВ}(x) \wedge \mu_{ОВ}(x)) \wedge \mu_{ВЧВКВО}(y) = \\ &= \bigvee_{x \in X} \mu_{ОВПВ}(x) \wedge \mu_{ВЧВКВО}(y) = \\ &= \alpha \wedge \mu_X(y) = \mu_{\alpha Y ВЧВКВО}(y). \end{aligned}$$

На рис. 4 приведены примеры поверхностей отклика взаимосвязей для пшеницы-50, отвечающие сформированной нечеткой системе продукционных правил.

В табл. 3 приведены полученные в MATLAB результаты расчетов выходов



a)



b)

Р и с. 4. Поверхности отклика взаимосвязей частоты вращения крылача вентилятора очистки от а) урожайности и засоренности; б) урожайности и влажности

Fig. 4. Response surfaces of rotational speed of the rotor of separator fan vs а) crop yield and dockage; б) crop yield and humidity



ного параметра в зависимости от различных значений входных факторов.

Таблица 3  
Table 3

**Расчетные значения выходного параметра при различных значениях входных факторов**  
**The calculated values of the output parameter for different values of the input factors**

Параметры / Parameters	Значения / Values		
Урожайность, ц/га / Crop yield, q/ha	44	50	54
Влажность, % / Stand of grain humidity, %	14	16	16
Засоренность, % / Stand of grain dockage, %	10	10	10
Соломистость, % / Rough straw, %	50	50	60
Частота вращения крылача вентилятора очистки, 1/мин / Rotor speed of separator fan, 1/min	750	829	833

### Обсуждение и заключения

Задача принятия решений при предварительной настройке рабочих органов уборочных машин, функционирующих в полевых условиях, относится к классу неформализованных. Предложенный лингвистический подход для решения указанной задачи удовлетворяет основным требованиям системного анализа. Его реализация позволила построить адекватные внешним условиям модели, в которых всесторонне учтены основные элементы системы и взаимосвязи между ними. Существенным преимуществом лингвистического подхода является возможность адекватного представления на единой формализованной основе количественных, качественных (лингвистических) и эвристических признаков рассматриваемой системы. Созданная модель предметной области в полной мере соответствует реальным условиям функционирования комбайнов. Полученную информацию рекомендуется использовать для создания базы знаний ИИС для технологической настройки комбайна.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Ерохин С. Н., Решетов А. С.** Влияние технологических регулировок на потери зерна за молотилкой комбайна Дон-1500 // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2003. № 6. С. 18–19. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21720341>
2. Оптимизация технологического процесса по статистическим данным / Е. Ф. Ветров [и др.] // Машиноведение. 1986. № 5. С. 48–55.
3. **Литвин Л. М., Жалкин Э. В., Ветров Е. Ф.** Обобщенная оценка зональных показателей работы зерноуборочных комбайнов // Техника в сельском хозяйстве. 1989. № 5. С. 41–45. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24826522>
4. **Царев Ю. А., Харьковский А. В.** Перспективы использования электронной системы управления в комбайнах «Дон» и «Нива» // Тракторы и сельхозмашины. 2005. № 1. С. 37–38. URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2005/200501.htm>
5. **Borisova L. V., Dimitrov V. P., Nurutdinova I. N.** Intelligent system for technological adjustment of the harvesting machines parameters // Proc. of the Second International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry”. 2018. P. 96–105. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-68324-9\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68324-9_11)
6. Design, development and performance evaluation of an automatic control system for rice whitening machine based on computer vision and fuzzy logic / H. Zareiforush [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. 2016. Vol. 124. P. 14–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.01.024>
7. Weed detecting robot in sugarcane fields using fuzzy real time classifier / M. Sujaritha [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. 2017. Vol. 134. P. 160–171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.01.008>

8. Design of fuzzy logic control system incorporating human expert knowledge for combine harvester / M. Omid [et al.] // Expert Systems with Applications. 2010. Vol. 37, Issue 10. P. 7080–7085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.03.010>

9. Fuzzy control of the cleaning process on a combine harvester / G. Craessaerts [et al.] // Biosystems Engineering. 2010. Vol. 106, Issue 2. P. 103–111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystem-seng.2009.12.012>

10. **Zadeh L. A.** Fuzzy sets / Information and Control. 1965. Vol. 8, Issue 3. P. 338–353. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

11. **Zadeh L. A.** Knowledge representation in fuzzy logic // An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems. The Springer International Series in Engineering and Computer Science. Boston : Springer, 1992. Vol. 165. P. 1–27. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3640-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3640-6_1)

12. **Борисова Л. В., Димитров В. П.** Лингвистический подход к решению задачи технологической регулировки комбайнов // Вестник Мордовского университета. 2017. Т. 27, № 2. С. 181–193. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.027.201702.178-189>

13. **Dimitrov V. P., Borisova L. V., Nurutdinova I. N.** Modelling of fuzzy expert information in the problem of a machine technological adjustment // MATEC Web of Conference. 2017. Vol. 132. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713204009>

14. **Borisova L. V., Dimitrov V. P., Nurutdinova I. N.** Algorithm for assessing quality of fuzzy expert information // Proc. of IEEE East-West Design & Test Symposium. 2017. P. 319–322. DOI: <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2017.8110107>

15. **Borisova L. V., Nurutdinova I. N., Dimitrov V. P.** Approach to the problem of choice of values of the adjustable parameters harvester based on fuzzy modeling // Вестник Донского государственного технического университета. 2015. Т. 81, № 2. С. 100–107. DOI: <https://doi.org/10.12737/11611>

16. О методике дефаззификации нечеткой экспертной информации / В. П. Димитров [и др.] // Вестник Донского государственного технического университета. 2010. Т. 10, № 6 (49). С. 868–878. URL: [http://science.donstu.ru/apex/f?p=381:39:6717046100545:::NO:P39\\_FILE\\_ID:8882024471960992](http://science.donstu.ru/apex/f?p=381:39:6717046100545:::NO:P39_FILE_ID:8882024471960992)

17. **Борисова Л. В., Нурутдинова И. Н., Димитров В. П.** О методике представления нечетких экспертных знаний // Вестник Донского государственного технического университета. 2014. Т. 14, № 4 (79). С. 93–102. DOI: <https://doi.org/10.12737/6887>

18. **Нурутдинова И. Н., Шумская Н. Н., Димитрова Л. А.** Об использовании весовых коэффициентов при формировании экспертной информации // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. статей 10-й Междунар. юбилейной науч.-практ. конф. в рамках 20-й Междунар. агропромышленной выставки «Интераргомаш-2017». Ростов-на-Дону : Донской государственный технический университет, 2017. С. 332–334. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28781436>

*Поступила 22.02.2018; принята к публикации 17.04.2018; опубликована онлайн 29.06.2018*

*Об авторах:*

**Димитров Валерий Петрович**, декан факультета приборостроения и технического регулирования, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: E-4908-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1439-1674>, [kaf-qm@donstu.ru](mailto:kaf-qm@donstu.ru)

**Борисова Людмила Викторовна**, заведующая кафедрой менеджмента и бизнес-процессов, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: E-4863-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6611-4594>, [borisovalv09@mail.ru](mailto:borisovalv09@mail.ru)

**Тугенгольд Андрей Кириллович**, профессор кафедры робототехники, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), доктор технических наук, ResearcherID: E-5707-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0551-1486>, [akt@yandex.ru](mailto:akt@yandex.ru)



**Нурутдинова Инна Николаевна**, доцент кафедры прикладной математики, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), кандидат физико-математических наук, ResearcherID: E-3961-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3375-1295>, [nurut.inna@yandex.ru](mailto:nurut.inna@yandex.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

В. П. Димитров – анализ предметной области, моделирование нечетких экспертных знаний; Л. В. Борисова – разработка методики построения нечеткого логического вывода применительно к задаче технологической настройки; А. К. Тугенгольд – разработка базы знаний; И. Н. Нурутдинова – анализ согласованности экспертных знаний, получение результатов в среде MATLAB.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Yerokhin S. N., Reshetov A. S. [The influence of technological adjustments on grain losses for the Don-1500 harvester thresher]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva* = Mechanization and Electrification of Agriculture. 2003; 6:18–19. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21720341> (In Russ.)
2. Vetrov Ye. F., Genkin M. D., Litvin L. M., Nelyubov N. I., Eglays V. O. [Optimization of the technological process according to statistical data]. *Mashinovedeniye* = Machine Science. 1986; 5:48–55 (In Russ.)
3. Litvin L. M., Zhalkin E. V., Vetrov Ye. F. [Generalized assessment of zonal indicators of the work of combine harvesters]. *Tekhnika v selskom khozyaystve* = Machinery in Agriculture. 1989; 5:41–45. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24826522>
4. Tsarev Yu. A., Kharkovskiy A. V. [Prospects of using the electronic control system in the Don and Niva combines]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2005; 1:37–38. Available at: <http://www.avtomash.ru/gur/2005/200501.htm> (In Russ.)
5. Borisova L. V., Dimitrov V. P., Nurutdinova I. N. Intelligent system for technological adjustment of the harvesting machines parameters. In: Proceedings of the Second International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry”. 2018, pp. 96–105. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-68324-9\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68324-9_11)
6. Zareiforouh H., Minaei S., Alizadeh M. R., Banakar A., Samani B. H. Design, development and performance evaluation of an automatic control system for rice whitening machine based on computer vision and fuzzy logic. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016; 124:14–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.01.024>
7. Sujaritha M., Annadurai S., Satheeshkumar J., Kowshik S., Mahesha L. Weed detecting robot in sugarcane fields using fuzzy real time classifier. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2017; 134:160–171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.01.008>
8. Omid M., Lashgari M., Mobli H., Alimardani R., Mohtasebi S., Hesamifard R. Design of fuzzy logic control system incorporating human expert knowledge for combine harvester. *Expert Systems with Applications*. 2010; 37(10):7080–7085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.03.010>
9. Craessaerts G., Baerdemaeker J. de, Missotten B., Saeyns W. Fuzzy control of the cleaning process on a combine harvester. *Biosystems Engineering*. 2010; 106(2):103–111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.12.012>
10. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965; 8(3):338–353. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
11. Zadeh L. A. Knowledge representation in fuzzy logic. An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems. In: The Springer International Series in Engineering and Computer Science. Boston: Springer, 1992; 165:1–27. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3640-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3640-6_1)

12. Borisova L. V., Dimitrov V. P. A linguistic approach to solving of the problem of technological adjustment of combines. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2017; 27(2):178–189. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.027.201702.178-189> (In Russ.)
13. Dimitrov V. P., Borisova L. V., Nurutdinova I. N. Modelling of fuzzy expert information in the problem of a machine technological adjustment. MATEC Web of Conference. 2017; 132:1–4. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713204009>
14. Borisova L. V., Dimitrov V. P., Nurutdinova I. N. Algorithm for assessing quality of fuzzy expert information. In: Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium. 2017, pp. 319–322. DOI: <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2017.8110107>
15. Borisova L. V. Nurutdinova I. N., Dimitrov V. P. Approach to the problem of choice of values of the adjustable parameters harvester based on fuzzy modeling. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Don State Technical University Bulletin. 2015; 81(2):100–107. DOI: <https://doi.org/10.12737/11611> (In Russ.)
16. Dimitrov V. P., Borisova L. V., Nurutdinova I. N., Bogatyreva E. V. On defuzzification method in fuzzy expert information processing. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Don State Technical University Bulletin. 2010; 10(6):868–878. Available at: [http://science.donstu.ru/apex/f?p=381:39:6717046100545:::NO:P39\\_FILE\\_ID:8882024471960992](http://science.donstu.ru/apex/f?p=381:39:6717046100545:::NO:P39_FILE_ID:8882024471960992) (In Russ.)
17. Borisova L. V., Nurutdinova I. N., Dimitrov V. P. On technique of fuzzy expert knowledge representation. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Don State Technical University Bulletin. 2014; 14(4): 93–102. DOI: <https://doi.org/10.12737/6887> (In Russ.)
18. Nurutdinova I. N., Shumskaya N. N., Dimitrova L. A. [On the use of weight coefficients in the formation of expert information]. In: Modern situation and prospects of the development of agricultural engineering: A collection of articles of the 10<sup>th</sup> International Jubilee Scientific and Practical Conference in the framework of the 20<sup>th</sup> International Agricultural Exhibition “Interargomash-2017”. Rostov-on-Don: Don State Technical University Publ.; 2017. pp. 332–334. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28781436> (In Russ.)

*Received 22.02.2018; revised 17.04.2018; published online 29.06.2018*

*About authors:*

**Valery P. Dimitrov**, Dean of the Faculty of Instrument Engineering and Technical Regulation, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: E-4908-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1439-1674>, [kaf-qm@donstu.ru](mailto:kaf-qm@donstu.ru)

**Lyudmila V. Borisova**, Head of the Chair of Management and Business Processes, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: E-4863-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6611-4594>, [borisovalv09@mail.ru](mailto:borisovalv09@mail.ru)

**Andrey K. Tugengold**, Professor, Robotics Chair, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: E-5707-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0551-1486>, [akt@yandex.ru](mailto:akt@yandex.ru)

**Inna N. Nurutdinova**, Associate Professor, Applied Mathematics Chair, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russia), Ph.D. (Physics and Mathematics), ResearcherID: E-3961-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3375-1295>, [nurut.inna@yandex.ru](mailto:nurut.inna@yandex.ru)

*Authors' contribution:*

V. P. Dimitrov – analysis of subject domain, modeling the fuzzy expert knowledge; L. V. Borisova – development of a technique of creation of fuzzy inference in relation to a problem of technological adjustment; A. K. Tugengold – development of the knowledge base; I. N. Nurutdinova – analysis of consistency of expert knowledge, processing in MATLAB environment.

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



## Обкаточно-тормозной стенд двигателя внутреннего сгорания на базе асинхронного электропривода с рекуперативным преобразователем частоты

Д. В. Байков\*, А. П. Иншаков, Ю. Б. Федотов  
ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)

\*bdv2304@mail.ru

*Введение.* Статья посвящена повышению качества производства и ремонта двигателей внутреннего сгорания средств малой механизации.

*Материалы и методы.* В работе использованы известные положения теоретической механики, общие положения теории цепей, теории двигателей внутреннего сгорания, а также методы современной теории управления и теории электрического привода. Достоверность результатов подтверждена экспериментальной реализацией обкаточно-тормозного стенда.

*Результаты исследования.* Предложена и практически реализована новая конструкция стенда для обкатки и испытаний двигателей средств малой механизации. Отличительной особенностью данной конструкции является простота, надежность, высокая энергоэффективность и низкая стоимость. В структуру испытательного стенда двигателей средств малой механизации входит асинхронный короткозамкнутый двигатель с встроенной системой независимого охлаждения, подключенной посредством автоматического выключателя к электрической сети, питающей через автоматический выключатель рекуперативный преобразователь частоты. Данный преобразователь, в свою очередь, состоит из транзисторного выпрямителя, на входе которого установлены входные дроссели, а на выходе через звено постоянного тока подключен транзисторный инвертор напряжения. Через автоматический выключатель инвертор питает асинхронный короткозамкнутый двигатель, соединенный через муфту с испытываемым двигателем внутреннего сгорания, на котором установлены датчики, необходимые для контроля и измерения параметров при испытаниях различного рода.

*Обсуждение и заключения.* Предложенная конструкция обкаточно-тормозного стенда способна обеспечить различные режимы работы: холодную и горячую обкатку, с нагрузкой и без нее. Стенд характеризуется малыми массогабаритными параметрами, низкой стоимостью и высокой энергоэффективностью, поскольку в тормозном режиме рекуперировывает энергию обратно в сеть. Стенд способен обеспечить большинство из существующих способов обкатки двигателей внутреннего сгорания, включая наиболее сложные: обкатка на низких и высоких оборотах, обкатка с реверсом двигателя. Дальнейшая работа по усовершенствованию испытательного стенда видится в полной автоматизации процесса обкатки и испытаний двигателей средств малой механизации.

**Ключевые слова:** обкаточно-тормозной стенд, обкатка, двигатель внутреннего сгорания, средства малой механизации, рекуперативный преобразователь частоты, асинхронный электропривод

**Для цитирования:** Байков Д. В., Иншаков А. П., Федотов Ю. Б. Обкаточно-тормозной стенд двигателя внутреннего сгорания на базе асинхронного электропривода с рекуперативным преобразователем частоты // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 2. С. 255–265. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.255-265>

**Благодарности:** Статья подготовлена как часть прикладных исследований в соответствии с Соглашением о предоставлении субсидии № 14.574.21.0135 при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Уникальный идентификатор прикладных исследований – RFMEFI57417X0135.

## Rolling-Brake Stand of Internal Combustion Engine Based on Asynchronous Electric Drive with Recuperative Frequency Converter

**D. V. Baykov\*, A. P. Inshakov, Yu. B. Fedotov**

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

*\*bdv2304@mail.ru*

**Introduction.** The article reviews repair of internal combustion engines for small-scale mechanization facilities.

**Materials and Methods.** The known positions of theoretical mechanics, general theories of chains, the theory of internal combustion engines and methods of modern control theory and the theory of electric drive are used in the work. The reliability of the results is confirmed by the experimental implementation of a rolling- brake stand.

**Results.** A new design of the stand for running-in and testing of small-scale mechanization engines was proposed and implemented. A distinctive feature of this device is simplicity, reliability, high energy efficiency and low cost. The structure of the test bench of the engines of small-scale mechanization includes an asynchronous squirrel-cage motor. This device has a built-in independent cooling system, connected to the electrical network by means of an automatic switch, and a recuperative frequency converter. This converter consists of a transistor rectifier. Input chokes are installed at the input of the rectifier. Transistor voltage inverter through the DC link is connected to the output of the rectifier. The inverter supplies an asynchronous squirrel-cage motor via a circuit breaker. The electric motor is connected through a coupling with the internal combustion engine under test. The sensors for monitoring and measuring parameters for various tests are installed on this device.

**Conclusions.** The study demonstrated high energy characteristics, good speed and wide range of speed regulation of an asynchronous electric drive based on the space-vector modulation method. According to the results of the study, this type of electric drive quite possible can replace the electric drive based on two-unit converters due to the smaller weight and size parameters, high speed and reliability. The test stand of small mechanization engines contains an asynchronous squirrel-cage motor with an integrated independent cooling system connected via an automatic switch to an electrical network feeding a recuperative frequency converter via an automatic switch consisting of an active transistor rectifier with input chokes installed at its input, and at the output through a DC link connected to a transistor voltage inverter, supplying, in turn, by means of a circuit-breaker, an asynchronous short-circuited electric motor connected through a coupling to a test internal combustion engine on which sensors are installed, which are necessary for monitoring and measuring parameters for various tests.

**Keywords:** stand, break-in, internal combustion engine, small mechanization means, recuperative frequency converter

**For citation:** Baykov D. V., Inshakov A. P., Fedotov Yu. B. Rolling-Brake Stand of Internal Combustion Engine Based on Asynchronous Electric Drive with Recuperative Frequency Converter. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(2):255–265. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.255-265>

**Acknowledgements:** The article was prepared as the part of applied research (AR) according to the Agreement on the provision of subsidy no. 14.574.21.0135 with the financial support of Russian Federation Ministry of Education and Science. The unique identifier of AR is RFMEFI57417X0135.



## Введение

Техническая модернизация сельскохозяйственной техники является важным направлением повышения ее работоспособности и продления срока использования. Большую роль в механизации труда сельских товаропроизводителей (фермеров, индивидуальных предпринимателей) играют механические средства мощностью до 10–20 кВт (средства малой механизации).

Ежегодно в сервисные центры поступает свыше 300 тыс. неисправных мотоблоков и мотокультиваторов [1]. Основной причиной поломки являются неисправности в двигателе внутреннего сгорания (ДВС) [2]. За период эксплуатации совокупная стоимость ремонта может превысить стоимость ДВС в несколько раз [3]. Кроме того, у отремонтированного ДВС значительно снижается производительность и срок службы [4]. Поэтому актуальной проблемой является повышение качества и ремонта двигателей средств малой механизации.

Известно, что качественно произведенная обкатка ДВС способна повысить эффективность работы и увеличить ресурс обкатываемого двигателя [5].

## Обзор литературы

В настоящее время активно ведется разработка, исследование и совершенствование обкаточно-тормозных стендов (ОТС) различных конструкций, в состав которых входят различные типы нагружающих устройств [1; 6–10]. Среди промышленно выпускаемых можно выделить обка-

точные универсальные стенды серий КС и КСАТ производства ООО «Копис», стенды испытания ДВС «Контур-Сид» производства ООО «КЭР Инжиринг», стенды серии ОТС производства ООО «НТЦ “Техническая диагностика и прецизионные измерения”» и испытательные стенды серии КИ ГОСНИТИ.

Подобные стенды можно разделить на тормозные, в которых в качестве тормоза используют электрические, гидравлические или пневматические нагружающие устройства, и бестормозные, когда нагрузка и ее изменение осуществляется с помощью маховика, изменения положения топливodosирующего органа, дросселирования и рециркуляции газов<sup>1–3</sup> [6–8].

Наиболее ярким примером стендов, использующих бестормозную обкатку ДВС, являются обкаточные универсальные стенды с динамическим нагружением серии КС производства ООО «КОПИС». В работе<sup>4</sup> отмечены недостатки стендов данной серии. Среди них автор выделяет односкоростной режим холодной обкатки ДВС с помощью тихоходного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (750 об/мин), который включается в работу с помощью прямого пуска. Данный способ пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором может привести к образованию задиров, неприработанных поверхностей сопряжений ДВС, а также значительным токовым перегрузкам питающей

<sup>1</sup> Царёв О. А. Способ и технические средства холодной обкатки дизелей со статико-динамическим нагружением : дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2010. URL: <http://www.dissercat.com/content/sposob-i-tehnicheskie-sredstva-kholodnoi-obkatki-dizelei-so-statiko-dinamicheskim-nagruzheniem>

<sup>2</sup> Тимохин С. В. Энерго-ресурсосбережение при обкатке тракторных дизелей путем создания и реализации в ремонтном производстве модулей с динамическим нагружением : дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 1999. URL: <http://www.dissercat.com/content/energo-resursosberezhenie-pri-obkatke-traktornykh-dizelei-putem-sozdaniya-i-realizatsii-v-re>

<sup>3</sup> Моисеев К. Л. Повышение эффективности приработки дизелей совершенствованием технологии и средств обкатки с динамическим нагружением : дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2012. URL: <http://www.dissercat.com/content/povyshenie-effektivnosti-prirobotki-dizelei-sovershenstvovaniem-tekhnologii-i-sredstv-obkatki>

<sup>4</sup> Царёв О. А. Способ и технические средства холодной обкатки дизелей со статико-динамическим нагружением : дис. ... канд. техн. наук.

электрической сети<sup>5</sup>. Авторами работ<sup>6-7</sup> также отмечается неправильность назначения типовых режимов холодной обкатки ДВС, проводимых на нескольких скоростях при частоте вращения от 400 до 1 400 об/мин с плавным ее увеличением в начальный период.

Авторским коллективом Пензенской ГСХА во главе с профессором С. В. Тимохиным проводятся исследования по совершенствованию конструкций стендов с динамическим нагружением<sup>8-10</sup>. Результатом их работы стал опытный образец стенда с динамическим нагружением, производство которого налажено на ОАО «Завод коммунальной энергетики» (г. Пенза). Промышленно выпускаемый стенд позволяет проводить холодную обкатку ДВС в пяти фиксированных режимах с плавным увеличением частоты вращения в начале процесса и при переходе со ступени на ступень<sup>11</sup>. Фрикционная управляемая муфта сцепления автотракторного типа, установленная между электрическим двигателем и коробкой передач, обес-

печивает плавное увеличение частоты вращения коленчатого вала ДВС и нагрузки электрического двигателя при пуске, что снижает вероятность появления задигов и ограничивает пусковые токи<sup>12</sup>. Несмотря на все свои достоинства, процесс обкатки ДВС, проводимый на стендах с динамическим нагружением, характеризуется большой продолжительностью, что, как отмечается авторами, обусловлено в основном пониженной средней за цикл динамического нагружения угловой скоростью коленчатого вала, а также пониженной эффективностью такта выбега с точки зрения приработки вследствие малых нагрузок на сопряжения и повышенной продолжительности такта<sup>13-15</sup>.

В настоящее время тормозные стенды нашли наиболее широкое промышленное применение. Среди испытательных стендов с такой конструкцией необходимо выделить серию ОТС КИ ГОСНИТИ. Стенды данной серии состоят из трехфазных асинхронных электрических машин с фазным ро-

<sup>5</sup> Там же.

<sup>6</sup> Там же.

<sup>7</sup> **Тимохин С. В.** Энерго-ресурсосбережение при обкатке тракторных дизелей путем создания и реализации в ремонтном производстве модулей с динамическим нагружением : дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 1999. URL: <http://www.dissercat.com/content/energo-resursosberezhenie-pri-obkatke-traktornykh-dizelei-putem-sozdaniya-i-realizatsii-v-re>

<sup>8</sup> **Царёв О. А.** Способ и технические средства холодной обкатки дизелей со статико-динамическим нагружением : дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2010. URL: <http://www.dissercat.com/content/sposob-i-tehnicheskie-sredstva-kholodnoi-obkatki-dizelei-so-statiko-dinamicheskim-nagruzhen>

<sup>9</sup> **Тимохин С. В.** Энерго-ресурсосбережение при обкатке тракторных дизелей путем создания и реализации в ремонтном производстве модулей с динамическим нагружением : дис. ... д-ра техн. наук.

<sup>10</sup> **Моисеев К. Л.** Повышение эффективности приработки дизелей совершенствованием технологии и средств обкатки с динамическим нагружением : дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2012. URL: <http://www.dissercat.com/content/povyshenie-effektivnosti-prirobotki-dizelei-sovershenstvovaniem-tehnologii-i-sredstv-obkatki>

<sup>11</sup> **Царёв О. А.** Способ и технические средства холодной обкатки дизелей со статико-динамическим нагружением : дис. ... канд. техн. наук.

<sup>12</sup> **Тимохин С. В.** Энерго-ресурсосбережение при обкатке тракторных дизелей путем создания и реализации в ремонтном производстве модулей с динамическим нагружением : дис. ... д-ра техн. наук.

<sup>13</sup> **Царёв О. А.** Способ и технические средства холодной обкатки дизелей со статико-динамическим нагружением : дис. ... канд. техн. наук.

<sup>14</sup> **Тимохин С. В.** Энерго-ресурсосбережение при обкатке тракторных дизелей путем создания и реализации в ремонтном производстве модулей с динамическим нагружением : дис. ... д-ра техн. наук.

<sup>15</sup> **Моисеев К. Л.** Повышение эффективности приработки дизелей совершенствованием технологии и средств обкатки с динамическим нагружением : дис. ... канд. техн. наук.



тором, пусковой аппаратуры, установочных и соединительных устройств, а также систем измерения расхода топлива и других параметров ДВС<sup>16</sup> [6–8]. Характерной особенностью этих стендов является использование свойства обратимости электрических машин, т. е. при холодной обкатке они работают в двигательном режиме, а при горячей – в генераторном.

Стоит отметить, что все выпускаемые ОТС предназначены для обкатки и испытаний ДВС мощностью > 20 кВт и поэтому не могут осуществить полную обкатку ДВС средств малой механизации [1]. Отсутствие специализированных испытательных стендов таких ДВС можно объяснить невысокой стоимостью как самих средств малой механизации, так и их двигателей, а также невозможностью и нецелесообразностью адаптации существующих промышленно-выпускаемых ОТС для обкатки двигателей мобильной сельскохозяйственной техники малой мощности ввиду огромных энергетических затрат, мощностей и стоимости существующих стендов [1; 6–7]. Поэтому на кафедре мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» была поставлена задача по разработке конструкций недорогих и эффективных стендов, адаптированных для обкатки и испытаний ДВС средств малой механизации.

### Материалы и методы

В процессе разработки ОТС были использованы общепринятые положения теоретической механики, теории

цепей, теории двигателей внутреннего сгорания, а также методы современной теории управления и теории электрического привода. Использовалось следующее промышленное оборудование: асинхронный короткозамкнутый двигатель с принудительной вентиляцией ДАР 112 М4 БУЗ-ИМ1081-ИТ02500-В, рекуперативный преобразователь частоты Mitsubishi FR-A741-5,5К с панелью управления FR-DU07, дизельный четырехтактный двигатель GREENFIELD GF178 F и группа автоматических выключателей IEK ВА47-29 С25 3р и IEK ВА47-29 С32 3р. Рама ОТС и соединительная муфта были изготовлены индивидуально.

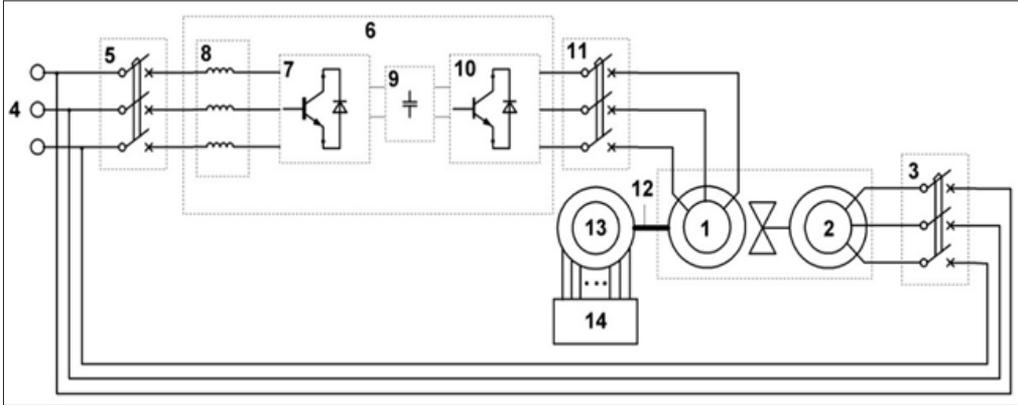
### Результаты исследования

Для решения поставленной задачи нами была предложена (рис. 1) и практически реализована (рис. 2) новая конструкция ОТС на базе рекуперативного двухзвенного преобразователя частоты<sup>17</sup>.

На рис. 1 показано, что ОТС содержит в своем составе асинхронный короткозамкнутый двигатель 1 с встроенной системой независимого охлаждения 2, подключенной (посредством автоматического выключателя 3) к электрической сети 4, питающей через автоматический выключатель 5 рекуперативный преобразователь частоты 6, состоящий из активного транзисторного выпрямителя 7, на входе которого установлены входные дроссели 8, а на выходе через звено постоянного тока 9, подключенному к транзисторному инвертору напряжения 10, питающему, в свою очередь, посредством включения через автоматический выключатель 11, асинхронный короткозамкнутый электродвигатель 1,

<sup>16</sup> Моисеев К. Л. Повышение эффективности приработки дизелей совершенствованием технологии и средств обкатки с динамическим нагружением : дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2012. URL: <http://www.dissercat.com/content/povyshenie-effektivnosti-prirobotki-dizelei-sovshenstvovaniem-tehnologii-i-sredstv-obkatk>

<sup>17</sup> Патент 171449 РФ, МПК7 F02B 79/00, G01M 15/04. Стенд для обкатки и испытаний двигателей внутреннего сгорания мобильной сельскохозяйственной техники малой мощности / Д. В. Байков [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва». № 2016115292; заявл. 19.04.2016; опубл. 01.06.2017; бюл. № 16. 4 с., ил.



Р и с. 1. Функциональная схема ОТС двигателей средств малой механизации: 1 – асинхронный короткозамкнутый двигатель; 2 – встроенная система независимого охлаждения; 3, 5, 11 – автоматический выключатель; 4 – электрическая сеть; 6 – рекуперативный преобразователь частоты; 7 – активный транзисторный выпрямитель; 8 – входные дроссели; 9 – звено постоянного тока; 10 – транзисторный инвертор напряжения; 12 – соединительная муфта; 13 – ДВС; 14 – датчики

F i g. 1. Functional diagram of the stand for running in engines of small-scale mechanization means: 1 – asynchronous squirrel-cage motor; 2 – built-in independent cooling system; 3, 5, 11 – circuit breaker; 4 – electric network; 6 – recuperative frequency converter; 7 – active transistor rectifier; 8 – input chokes; 9 – a link of a direct current; 10 – transistor voltage inverter; 12 – coupling; 13 – internal combustion engine; 14 – sensors



Р и с. 2. ОТС двигателей средств малой механизации: 1 – асинхронный короткозамкнутый двигатель с принудительной вентиляцией ДАР 112 М4 БУЗ-IM1081-ИТ02500-В; 2 – автоматический выключатель 1; 3 – автоматический выключатель 2; 4 – автоматический выключатель 3; 5 – рекуперативный преобразователь частоты Mitsubishi FR-A741-5,5K; 6 – соединительная муфта; 7 – дизельный четырехтактный двигатель GREENFIELD GF178 F; 8 – рама обкаточно-тормозного стенда

F i g. 2. The stand for breaking-in of engines of means of small-scale mechanization: 1 – asynchronous squirrel-cage motor with forced ventilation ДАР 112 М4 БУЗ-IM1081-ИТ02500-В; 2 – circuit breaker 1; 3 – circuit breaker 2; 4 – circuit breaker 3; 5 – recuperative frequency converter Mitsubishi FR-A741-5,5K; 6 – coupling; 7 – diesel four-stroke engine GREENFIELD GF178 F; 8 – frame of the brake-bending stand



соединенный через муфту 12 с ДВС 13, на котором установлены датчики 14, необходимые для контроля и измерения параметров при различного рода испытаниях.

Работа ОТС в режимах холодной и горячей обкатки ДВС происходит следующим образом.

Включением автоматического выключателя 5 запускается рекуперативный преобразователь частоты 6, в котором на активный транзисторный выпрямитель 7 и транзисторный инвертор напряжения 10 подается управляющий сигнал и осуществляется формирование необходимого входного тока и выходного напряжения рекуперативного преобразователя частоты 6, исходя из необходимой скорости вращения асинхронного короткозамкнутого двигателя 1.

Включением автоматического выключателя 11 разрешается запуск асинхронного короткозамкнутого двигателя 1. Затем производится регулирование частоты его вращения. При работе двигателя 1 вращающийся момент ротора образует реактивный момент на статоре, стремящийся повернуть двигатель в обратном направлении. Поскольку реактивный момент на статоре равен вращающемуся моменту ротора, то по нему датчиками 14 измеряется тормозной момент ДВС 13.

Асинхронный короткозамкнутый двигатель 1 работает на ОТС в двух режимах: двигательном и генераторном. Первый режим характерен для холодной обкатки ДВС 13, а второй – для горячей. В режим горячей обкатки ОТС переходит, как только частота вращения асинхронного короткозамкнутого двигателя 1 становится выше синхронной, что происходит за счет вращения ДВС 13. В данном режиме большая часть механической энергии ДВС 13 преобра-

зуется в электрическую, и, пройдя через входные дроссели 8, возвращается обратно в электрическую сеть 4.

Автоматический выключатель 3 запускает систему независимого охлаждения 2 асинхронного короткозамкнутого двигателя 1. Данная система вращается с частотой питающей электрической сети 4, использующейся в качестве вентилятора охлаждающего обмотки асинхронного короткозамкнутого двигателя 1.

Предложенная конструкция ОТС может быть реализована с помощью различного промышленно выпускаемого оборудования.

В конструкции ОТС, представленной на рис. 2, в качестве рекуперативного преобразователя частоты был использован преобразователь частоты Mitsubishi FR-A741-5,5K, характеризующийся высокой энергетической эффективностью и возможностью рекуперации тормозной энергии в сеть<sup>18</sup> [11–12]. Данный преобразователь также оснащен панелью управления FR-DU07 (рис. 3), на которой задается частота вращения асинхронного короткозамкнутого двигателя и производится индикация измеряемых параметров.

В качестве асинхронного короткозамкнутого двигателя с встроенной системой независимого охлаждения был использован двигатель с принудительной вентиляцией ДАР 112 М4 БУЗ-IM1081-ИТ02500-В, а в качестве испытуемого ДВС – дизельный двигатель GREENFIELD GF178 F, представляющий собой четырехтактный одноцилиндровый двигатель с воздушным охлаждением и верхним расположением клапанов и предназначенный для установки на садовую бензотехнику (мотопомпы, генераторы, культиваторы, мотоблоки, виброплиты и др.) мощностью до 5,2 л. с. Данный двигатель

<sup>18</sup> Kharitonov S., Brovanov S., Zinoviev G. Power analysis of a multimodular wind power system including PMG, active rectifier and VSI // Proc. 7<sup>th</sup> International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics. 2011. P. 78–85. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPE.2011.5942211>



Р и с. 3. Панель управления FR-DU07 Mitsubishi FR-A741-5,5K  
F i g. 3. Control panel FR-DU07 Mitsubishi FR-A741-5,5K

оснащен системой легкого старта, ручным стартером и защитой от низкого уровня масла в картере.

Как видно из рис. 2, асинхронный короткозамкнутый двигатель ДАР 112 М4 БУЗ-ИМ1081-ИТ02500-В и дизельный двигатель GREENFIELD GF178 F закреплены на раме ОТС, а их валы от-

центрованы и объединены с помощью специально изготовленной соединительной муфты (рис. 4).

ОТС оснащен тремя автоматическими выключателями, в качестве которых использованы выключатели IEK BA47-29 С25 3р и IEK BA47-29 С32 3р.



Р и с. 4. Соединительная муфта валов двигателей  
F i g. 4. Motor shaft couplings



### Обсуждение и заключения

Предложенная конструкция ОТС позволяет реализовать различные способы холодной и горячей обкатки ДВС средств малой механизации, включая обкатку на низких и высоких оборотах, а также обкатку с реверсом двигателя. Кроме того, стенд характеризуется хорошей энергоэффективностью, малыми массогабаритными показателями

и низкой стоимостью (< 150 тыс. руб.). Дальнейшее развитие стенда видится в полной автоматизации процесса обкатки ДВС средств малой механизации. Для этого может быть использован один из промышленных интерфейсов преобразователя частоты, а управление процессом обкатки и испытаний двигателей – выведено на персональный компьютер.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Байков Д. В., Иншаков А. П., Десяев С. С. Стенд для обкатки и испытаний двигателей мотобильной сельскохозяйственной техники малой мощности // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. № 2. С. 51–53. DOI: <https://doi.org/10.12737/18699>
2. Андруш В. Г. Выбор рационального режима обкатки ремонтируемых двигателей // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Промышленность. Прикладные науки. 2014. № 11. С. 127–133. URL: <http://elib.psu.by/handle/123456789/11768>
3. Повышение надежности нагружающего устройства типа «машина постоянного тока – тиристорный преобразователь» при проведении обкатки и испытаний мощных автотракторных двигателей / А. П. Иншаков [и др.] // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 3. С. 66–69. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24415505>
4. Храмов Н. В. Полная обкатка автотракторных двигателей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. Вып. 12, ч. 2. С. 179–185. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/polnaya-obkatka-avtotraktornyh-dvigatelay>
5. Сорокин И. А. Ускоренная обкатка как контроль качества ремонта дизельных двигателей Д-240 // Вестник НГИЭИ. 2013. Т. 21, № 2. С. 50–57. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/uskorenna-ya-obkatka-kak-kontrol-kachestva-remonta-dizelnyh-dvigatelay-d-240>
6. Особенности построения схем электромеханических энергосберегающих стендов для обкатки и испытания автотракторных дизелей / А. П. Иншаков [и др.] // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 3. С. 81–85. URL: <https://naukaru.editorum.ru/ru/nauka/article/11237/view#article-annotation>
7. К вопросу модернизации и разработки стендов для обкатки и испытаний автотракторных двигателей / А. П. Иншаков [и др.] // Техника и оборудование для села. 2015. Т. 216, № 6. С. 45–48. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23651820>
8. Тодарев В. В., Погуляев М. Н., Дорошенко И. В. Энергосберегающие электромеханические стенды для испытания двигателей внутреннего сгорания и трансмиссий сельскохозяйственной техники // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. 2007. № 4. С. 80–84. URL: <https://elib.gstu.by/handle/220612/15256>
9. Княнов Н. В., Крюков О. В., Титов В. Г. Автоматизированный стенд для обкатки и испытаний автотракторных двигателей // Автоматизация в промышленности. 2009. № 6. С. 52–57. URL: [https://avtprom.ru/system/files/52-57\\_0.pdf](https://avtprom.ru/system/files/52-57_0.pdf)
10. Чикунюв Ю. М., Чикунюв А. М. Энергетический стенд с улучшенными характеристиками // Сельский механизатор. 2012. № 10. С. 28–29. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18049059>
11. Hassanzadeh F., Hajizadeh A., Abbasi F. Stability analysis and optimal state feedback control of back-to-back converter // Journal of Technology Innovations in Renewable Energy. 2013. Vol. 2, no. 2. P. 139–143. URL: <http://www.lifescienceglobal.com/pms/index.php/jtire/article/view/636>

12. **Saeedifard M., Iravani R.** Dynamic performance of a modular back-to-back HVDC system // IEEE Transactions on Power Delivery. 2010. Vol. 25, no. 4. P. 2903–2912. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2050787>

*Поступила 15.01.2018; принята к публикации 23.03.2018; опубликована онлайн 29.06.2018*

*Об авторах:*

**Байков Дмитрий Владимирович**, научный сотрудник кафедры электроники и электротехники, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), ResearcherID: F-9790-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2203-5899>, [bdv2304@mail.ru](mailto:bdv2304@mail.ru)

**Иншаков Александр Павлович**, профессор кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), доктор технических наук, ResearcherID: G-3580-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3205-2396>, [kafedra\\_mes@mail.ru](mailto:kafedra_mes@mail.ru)

**Федотов Юрий Борисович**, заведующий кафедрой электроники и электротехники, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), кандидат технических наук, доцент, ResearcherID: G-3587-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7978-6784>, [fedotovyb@mail.ru](mailto:fedotovyb@mail.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

Д. В. Байков – подготовка начального текста с последующей доработкой, анализ литературных данных; А. П. Иншаков – научное руководство; Ю. Б. Федотов – подготовка и первичный анализ литературных данных, верстка и редактирование текста.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Baykov D. V., Inshakov A. P., Desyaev S. S. Stand for running and testing of low power mobile farm machinery engines. *Izvestiya Samarskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Samara State Agricultural Academy Bulletin. 2016; 2:51–53. DOI: <https://doi.org/10.12737/18699> (In Russ.)
2. Andrush V. G. Rational regime selection of the renovated engines running. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V: Promyshlennost. Prikladnyye nauki* = Polotsk State University Bulletin. Series V: Industry. Applied Science. 2014; 11:127–133. Available at: <http://elib.psu.by/handle/123456789/11768> (In Russ.)
3. Inshakov A. P., Baykov D. V., Kuvshinov A. N., Kurbakov I. I. Eliablity increasing of loaded devices such as “DC machines – thyristor converters” during the power autotractor engines testing. *Izvestiya Samarskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Samara State Agricultural Academy Bulletin. 2015; 3:66–69. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24415505> (In Russ.)
4. Hramtsov N. V. Full break-in automotive engines. *Izvestiya Tulskego gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* = Tula State University Bulletin. Technical Sciences. 2012; 12(2):179–185. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/polnaya-obkatka-avtotraktornyh-dvigatelay> (In Russ.)
5. Sorokin I. A. Fast rolling as quality control of repairing diesel engines D-240. *Vestnik NGIEI* = Herald NGIEI. 2013; 2(21):50–57. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/uskorennyaya-obkatka-kak-kontrol-kachestva-remonta-dizelnyh-dvigatelay-d-240> (In Russ.)
6. Inshakov A. P., Baykov D. V., Kuvshinov A. N., Kurbakov I. I. Schemes creation features of electromechanical energy saving stands for autotractor diesels tests. *Izvestiya Samarskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Samara State Agricultural Academy Bulletin. 2015; 3:81–85. Available at: <https://naukaru.editorum.ru/ru/nauka/article/11237/view#article-annotation> (In Russ.)



7. Inshakov A. P., Baykov D. V., Kuvshinov A. N., Kurbakov I. I. On the issue of modernization and development of stands for breaking-in and testing of automotive and tractor engines. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2015; 6:45–48. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23651820> (In Russ.)

8. Todarev V. V., Pogulyaev M. N., Doroshchenko I. V. [Energy-conserving electromechanical stands to checkout combustion engines and agricultural machinery transmissions]. *Vestnik Gomelskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. P. O. Sukhogo* = Bulletin of Sukhoy Gomel State Technical University. 2007; 4:80–84. Available at: <https://elib.gstu.by/handle/220612/15256> (In Russ.)

9. Kiyanov N. V., Kryukov O. V., Titov V. G. [Automated test bench for testing and testing of automotive tractor engines]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* = Automation in Industry. 2009; 6:52–57. Available at: [https://avtprom.ru/system/files/52-57\\_0.pdf](https://avtprom.ru/system/files/52-57_0.pdf) (In Russ.)

10. Chikunov Yu. M., Chikunov A. M. Energy booth with improved characteristics. *Selskiy mekhanizator* = Rural Mechanic. 2012; 10:28–29. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18049059> (In Russ.)

11. Hassanzadeh F., Hajizadeh A., Abbasi F. Stability analysis and optimal state feedback control of back-to-back converter. *Journal of Technology Innovations in Renewable Energy*. 2013; 2:139–143. Available at: <http://www.lifescienceglobal.com/pms/index.php/jtire/article/view/636>

12. Saeedifard M., Irvani R. Dynamic performance of a modular back-to-back HVDC System. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2010; 25:2903–2912. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2050787>

*Received 15.01.2018; revised 23.03.2018; published online 29.06.2018*

*About authors:*

**Dmitriy V. Baykov**, Researcher, Electronics and Electrical Engineering Chair, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), ResearcherID: F-9790-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2203-5899>, [bdv2304@mail.ru](mailto:bdv2304@mail.ru)

**Aleksandr P. Inshakov**, Professor, Leshchankin Chair of Mobile Energy Means and Agricultural Machines, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: G-3580-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3205-2396>, [kafedra\\_mes@mail.ru](mailto:kafedra_mes@mail.ru)

**Yuriy B. Fedotov**, Head of Electronics and Electrical Engineering Chair, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), docent, ResearcherID: G-3587-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7978-6784>, [fedotovyb@mail.ru](mailto:fedotovyb@mail.ru)

*Authors' contribution:*

D. V. Baykov – writing the draft, reviewing and analyzing the literature; A. P. Inshakov – scientific supervision; Yu. B. Fedotov – analyzing the literature, writing the final text.

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



## Совершенствование технологии переработки сои с использованием ультразвука

Ф. Я. Рудик<sup>1\*</sup>, Б. П. Загородских<sup>1</sup>, Н. Л. Моргунова<sup>1</sup>,  
Ю. А. Кодацкий<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (г. Саратов, Россия)

<sup>2</sup>ООО «ПиткоФФ» (г. Норильск, Россия)

\*k-rappsgau@rambler.ru

*Введение.* Белок сои близок по свойствам белку животного происхождения. Основным недостатком сои является содержание в ней значительного количества специфических белков-ингибиторов, образующих с протеолитическими ферментами животного происхождения (в частности, трипсином и химотрипсином) устойчивые комплексы, в составе которых фермент теряет активность. Ингибиторы резко снижают эффективность усвоения белка, вызывая угнетение роста и панкреатическую гипертрофию. По этой причине усвояемость белка сои крайне низкая, и на практике возникает необходимость снижения активности пищеварительных ингибиторов и нейтрализации уреазы различными методами, основанными на гидротермической обработке. Однако используемые в настоящее время технологии обладают низкими показателями эффективности переработки сои как с позиции качества получаемого продукта, так и с позиции его себестоимости. Целью работы было снижение активности веществ антипитательной направленности в сое с одновременным обеспечением высокого качества белка за счет интенсификации процесса экстрагирования водорастворимых ингибиторов протеаз ультразвуком.

*Материалы и методы.* Тормозящее действие ингибиторов, оказываемое на ферменты пищеварительного тракта, определялось согласно казеинолитическому методу М. Л. Какейда (в модификации И. И. Бенкен), основанному на сравнении протеолитической активности растворов фермента в присутствии ингибитора и без него. Вязкость водно-соевой суспензии определялась на ротационном вискографе «Вгабандер».

*Результаты исследования.* В результате теоретических исследований были сформулированы факторы, влияющие на эффективность обработки сои в интенсивном ультразвуковом поле: степень измельчения; концентрация и количество окислительного раствора; вязкость водно-соевой суспензии; динамика экстрагирования и конструктивные особенности установки для ультразвуковой обработки зерна сои. Экспериментальные исследования позволили определить конструктивные параметры установки для ультразвуковой обработки зерна сои и рациональные технологические режимы, обеспечивающие эффективную нейтрализацию веществ антипитательной направленности: частота вращения мешалки – 10–20 мин<sup>-1</sup>; частота ультразвукового излучения – 18–20 кГц; производительность установки – 120 кг/ч; степень нейтрализации фермента уреазы при окислении – 92 %; степень извлечения водорастворимого ингибитора – 86 %.

*Обсуждение и заключения.* Была разработана и проведена производственная проверка технологии и установки, позволяющих вести обработку сои в интенсивном поле ультразвуковых волн. Предложенная технология обеспечивает нейтрализацию вредных соединений на 80–90 % при среднем росте эффективности белка на 33 %. Срок окупаемости капиталовложений на внедрение технологии и оборудования составляет 1,17 года.



**Ключевые слова:** соя, переработка сои, белок, уреаса, ингибитор, ультразвук, ультразвуковая установка

**Для цитирования:** Совершенствование технологии переработки сои с использованием ультразвука / Ф. Я. Рудик [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 2. С. 266–286. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.266-286>

## Improving Soybean Processing Using Ultrasound

F. Ya. Rudik<sup>1\*</sup>, B. P. Zagorodskih<sup>1</sup>, N. L. Morgunova<sup>1</sup>,  
Yu. A. Kodatsky<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Vavilov Saratov State Agrarian University (Saratov, Russia)

<sup>2</sup>PitkoFF (Norilsk, Russia)

\*k-pappsgau@rambler.ru

**Introduction.** Soy protein has properties similar to the protein of animal origin. The main disadvantage of soy is the content of a significant number of specific protein-inhibitors, forming stable complexes with proteolytic enzymes of animal origin. Inhibitors reduce the efficiency of protein absorption, causing growth suppression and pancreatic hypertrophy. There is a need to reduce the activity of digestive inhibitors and neutralize urease by various methods based on hydrothermal treatment. However, currently used technologies have low indicators of soy bean processing efficiency. The product of processing is of poor quality and high cost. The aim of the study was to improve the quality of soy protein by intensifying the process of extracting soluble inhibitors of proteases by ultrasound.

**Materials and Methods.** Caseinolytic method of M. L. Kakeyd (in modification of I. I. Benken) was used to determine the inhibitory effect on the digestive tract enzymes. The method is based on a comparison of the proteolytic activity of enzyme solutions in the presence of inhibitor and without it. The viscosity of the water-soybean suspension was detected on Brabender rotational viscomer. Optimal regime parameters of ultrasonic treatment, the degree of soybean grinding and the concentration of hydrogen peroxide in soybean processing were proposed based on the results of the study.

**Results.** As a result of theoretical studies, factors influencing the efficiency of soybean treatment in an intense ultrasonic field were formulated: degree of grinding; concentration and amount of oxidizing solution; viscosity of water-soybean suspension; dynamics of extraction and design features of the unit for ultrasonic treatment of soybean grain. Experimental studies allowed to determine the design parameters of the plant for ultrasonic treatment of soybean grain and rational technological regimes ensuring effective neutralization of substances of anti-nutritional orientation: speed of mixer is 10–20 min<sup>-1</sup>; frequency of ultrasonic radiation is 18–20 kHz; capacity of installation is 120 kg/h; degree of neutralization of urease enzyme during oxidation is 92 %; degree of extraction of water-soluble inhibitor is 86 %.

**Conclusions.** A production check of soybean processing technology in an intense field of ultrasonic waves was developed and carried out. This technology provides neutralization of harmful compounds by 80–90 % with an average increase in protein efficiency by 33 %. The payback period for investment in the introduction of technology and equipment is 1.17 years.

**Keywords:** soybean, soybean processin, protein, urease, inhibitor, ultrasound, ultrasonic installation

**For citation:** Rudik F. Ya., Zagorodskih B. P., Morgunova N. L., Kodatsky Yu. A. Improving Soybean Processing Using Ultrasound. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(2):266–286. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.266-286>

## **Введение**

Соя как сельскохозяйственная культура обладает рядом преимуществ: высокой урожайностью, неприхотливостью к климатическим условиям и большим содержанием полноценного белка, близкого по свойствам белку животного происхождения [1]. Вместе с тем соя имеет ряд недостатков. Например, содержащиеся в ней токсичные вещества и антиметаболиты (ингибиторы протеолитических ферментов трипсина и химотрипсина, лектина, фитогемагглютинаина, уреазы) приводят к замедлению пищеварения и тем самым снижают кормовую и пищевую ценность культуры.

Целью данной работы является снижение активности веществ антипитательной направленности в сое с одновременным обеспечением высокого качества белка за счет интенсификации процесса экстрагирования водорастворимых ингибиторов протеаз ультразвуком.

Задачи исследования:

- 1) изучение физико-химических и биологических свойств сои и выявление основных факторов, влияющих на качественные показатели белка;
- 2) обоснование режимов обработки измельченной сои в жидкости с ультразвуковой интенсификацией процесса;
- 3) экспериментальные исследования качественных показателей сои при обработке ультразвуком.

## **Обзор литературы**

В РФ доля зерна в комбикормах составляет порядка 70 %, при этом важнейшие кормовые аминокислоты закупаются за рубежом. Такая система кормления существенно отстает от мировых показателей и ведет к удорожанию продукции животноводства и снижению ее конкурентоспособности. Устранение указанных недостатков

возможно путем развития производства сбалансированного по аминокислотному составу белка и созданию новых технологий белкового производства и их применения [Там же].

Как было отмечено выше, продуктивная ценность белка сои близка белку животного происхождения. При этом из урожая сои извлекается больше белка, чем из эквивалентного урожая любой другой культуры [2]. Исходя из этого спрос на соевое зерно, жмых и шрот увеличивается, а объемы производства и переработки неуклонно возрастают, и не вызывает сомнений, что состояние российского сельского хозяйства и продовольственный баланс страны будут во многом зависеть от развития современных технологий переработки сои<sup>1</sup>.

Белковые молекулы чрезвычайно сложны, а их химический синтез затруднен [3]. По этой причине необходимо создание условий для преодоления структурных особенностей сои [4].

В настоящее время перспективна технология получения белка микробиологическим синтезом с выработкой кормовых дрожжей. Однако подобные технологии предназначены для переработки отходов производства, а в качестве питательной среды для развития дрожжей применяются остаточные продукты гидролизных и целлюлозных предприятий<sup>2</sup> [5], не соответствующие экологическим требованиям.

Использование при кормлении необработанной сои приводит, по причине необходимости выделения большого количества пищеварительных ферментов, к гипертрофии поджелудочной железы, значительной нехватке в кормовом балансе серосодержащих аминокислот и, как следствие, задержке развития, снижению приростов, удоев. Нерас-

<sup>1</sup> **Мигина Е. И.** Эффективность использования отходов переработки сои // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : сб. тр. конф. Краснодар, 2017. С. 379–380. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29740028>

<sup>2</sup> Там же.



щепленные белковые комплексы ускоряют перистальтику кишечника, и это ведет к диарее [6].

В большинстве из применяемых в РФ технологий предусмотрены комплексные методы переработки сои<sup>3</sup> [7], и их эффективность обеспечивается за счет многократного повторения операций, что в итоге резко увеличивает потери, длительность и себестоимость продукции [8]. Патентный и литературный анализ показывает, что наибольшее распространение при этом получили технологии, основанные на простой и низкоэффективной гидротермической обработке<sup>4-8</sup>. Значимость температуры в них изменяется в зависимости от самостоятельно действующих факторов при различных активаторах массообменных процессов.

Имеются технологии подавления ингибиторов, основанные на водной промывке путем замачивания в растворе щелочи и последующей термиче-

ской обработке зерна сои до влажности 8–12 %<sup>9</sup>. За счет увлажнения повышается чувствительность сои к нагреву, а щелочь разрушает ингибиторы Баумана-Бирка<sup>10</sup>. Значительным недостатком данного способа является усиление бобового запаха и привкуса щелочи в конечном продукте<sup>11</sup>.

Известен способ подготовки сои, согласно которому она обрабатывается в течение 1 ч в жидкости при температуре 132 °С и давлении 0,2 МПа. Для уменьшения твердости сои охлаждение ведется прерывисто в течение 30 мин, с постоянным снижением давления со скоростью 0,0067 МПа/мин<sup>12</sup>. Недостатком способа является его длительность, превышающая принятый цикл варки сои в автоклаве в 6 раз.

Предлагается также ускоренная обработка, предусматривающая варку сои в течение 5 мин при температуре 130 °С и давлении 0,16 МПа<sup>13</sup>. Данный способ признан неэффективным, поскольку

<sup>3</sup> Smith K. Novel technologies for soy products, processing, and applications : dissertation theses. 2009. 109 p. URL: <http://lib.dr.iastate.edu/etd/10785>

<sup>4</sup> Патент 2004130815 РФ, МПК А23L1/20. Способ обработки бобов сои / А. А. Аветисян, В. В. Васько, В. А. Прохоров; ОАО «Белореченский комбикормовый завод»; заявл. 2004130815/13; опубл. 21.10.2004.

<sup>5</sup> Патент 2246225 РФ, МПК7 А23L1/20, А23J3/16. Способ влаготепловой обработки сои / И. Д. Тменов, Р. Б. Темираев, Т. Х. Кабалоев, А. А. Столбовская; Северо-Кавказский горно-металлургический ин-т; заявл. 2003123642/13; опубл. 25.07.2003.

<sup>6</sup> Патент 2303369 РФ, МПК А23L1/211, А23L1/29. Способ инактивации антипитательных веществ и повышения питательной ценности соевых бобов / В. М. Кононов, А. Ф. Носовцев, И. М. Чекрыгина; Фед. гос. унит. пр-е «Таганрогский науч.-исслед. ин-т связи»; заявл. 2005118209/13; опубл. 14.06.2005.

<sup>7</sup> Патент 2348179 РФ, МПК А23L1/20. Способ обработки соевого зерна / С. М. Доценко, О. В. Скрипко, О. В. Филонова, О. И. Любимова; ГНУ Всероссийский НИИ сои Россельхозакадемии; заявл. 2007135559/13; опубл. 10.03.2009.

<sup>8</sup> Патент 2358459 РФ, МПК А23L1/211. Способ инактивации антипитательных веществ бобов сои / Е. К. Кулигин, В. Т. Золочевский, И. В. Шведов; ООО фирма «Кубаньпластик»; заявл. 2007134871/13; опубл. 20.09.2007.

<sup>9</sup> Feeds derived from soybean grain for farm animals / G. G. Klasner [et al.] // International Scientific and Practical Conference «World Science». 2017. Vol. 1, no. 5 (21). P. 38–39.

<sup>10</sup> Патент 2057464 РФ, МПК6 А23L1/211. Способ инактивации антипитательных веществ соевых бобов / Ю. В. Киселева, В. Н. Красильников, Н. В. Кузьмина, М. Е. Соболева; Санкт-Петербургский торгово-экономический ин-т; заявл. 93048818/13; опубл. 10.04.1996.

<sup>11</sup> Патент 2358459 РФ, МПК А23L1/211. Способ инактивации антипитательных веществ бобов сои / Е. К. Кулигин, В. Т. Золочевский, И. В. Шведов; ООО «Кубаньпластик»; заявл. 2007134871/13; опубл. 20.09.2007.

<sup>12</sup> Патент 2150851 РФ, МПК7 А23L1/201, А23L1/20. Способ обработки соевого зерна / С. М. Доценко, О. В. Скрипко; Дальневосточный государственный аграрный ун-т; заявл. 98119624/13; опубл. 30.10.1998.

<sup>13</sup> Патент 2001135919 РФ, МПК7 А23L120, А23L1/212, А23J3/14, А23J3/16. Способ получения соевого-овощного консервированного продукта / С. Ф. Присяжная, Е. С. Глебова, О. М. Личман; Дальневосточный государственный аграрный ун-т; заявл. 2001135919/13; опубл. 27.12.2001.

при времени обработки < 10 мин активность уреазы в конечном продукте превышает норму. Обработка семян при более низкой температуре, составляющей 105–120 °С, большей выдержке (до 10–20 мин) и давлении 0,01–0,015 МПа позволяет разрушить уреазу, но активность ингибиторов при этом сохраняется, что обуславливает необходимость повторной тепловой обработки.

При переработке сои активно используется экструдирование, позволяющее обрабатывать сырье при высокой температуре и давлении<sup>14</sup>. Соя поступает в экструдер при температуре 120–140 °С и давлении 1,3–1,8 МПа. Это дает возможность одноэтапного теплового воздействия на блок, однако при этом наблюдается недостаточное разрушение ингибиторов, происходит также повреждение серосодержащих аминокислот и лизина.

Также предлагается снизить ингибиторную активность сои микронизацией [9]. Подобная обработка достаточно универсальна и может использоваться на различных этапах технологического процесса, но только в качестве окончательной, поскольку зерно должно быть предварительно подсушено или гидротермически обработано.

Другие исследования [8] направлены на получение жмыха и масла, в которых обрушенные и увлажненные зерна подвергаются кратковременной температурной обработке в электромагнитном поле СВЧ-диапазона. Это дает возможность снизить активность уреазы, но длительное воздействие лучей на сырье снижает в нем количество усвояемого белка.

Существует еще один способ<sup>15</sup> обработки, проходящий в 2 этапа. Сначала соя без предварительного увлажнения сушится потоком горячего воздуха до температуры 95–100 °С, затем подвергается воздействию СВЧ 20–30 с. Это позволяет улучшить кормовые свойства сои за счет частичного разрушения ингибиторов, а также перехода крахмала в легкоусвояемую форму. Однако вследствие пониженной влажности семян и малого времени обработки значительная часть антипитательных веществ остается активной.

К общим недостаткам микронизации необходимо отнести неравномерный нагрев сои, что может привести к обугливанню обрабатываемой поверхности. Также возникает необходимость в специальном оборудовании для обработки сырья в активном спадающем электромагнитном поле<sup>16</sup>. Микронизация улучшает переваримость углеводов, но при этом интенсивно разрушает белки, снижает содержание в них незаменимых аминокислот. В зерне сои отмечается низкое содержание биологически активных, необходимых для развития веществ – токоферолов и каратиноидов.

Таким образом, для наиболее распространенных методов тепловой обработки сои характерны низкая эффективность нагрева, высокая энергоемкость процесса, а также отсутствие активной нейтрализации ингибиторов. Высокая температура и повышенная влажность приводит к гидролизу жиров, а это, в свою очередь, ведет к упрочнению структуры зерна и снижению органолептических показателей.

<sup>14</sup> Патент 2153270 РФ, МПК7 А23Р1/12, В30В11/12, В30В11/22, В29В7/42. Пресс-экструдер / И. Т. Ковриков, А. Н. Холодиллин, Д. К. Шабанов; Оренбургский гос. ун-т; заявл. 98112976/13; опубл. 27.07.2000.

<sup>15</sup> **Хадзарагова Е. А., Тер-Терьян Н. Г.** Управление процессом повышения качества продукции при переработке сои // Маг-лы Междунар. науч.-практ. конф. «Научное обеспечение устойчивого развития агропромышленного комплекса горных и предгорных территорий». Владикавказ, 2008. С. 458–460.

<sup>16</sup> Патент 2044034 РФ, МПК6 С11В1/02. Способ переработки соевых семян с получением масла и жмыха или шрота / В. В. Ключкин, А. Н. Лисицин, В. И. Краснобородько, Г. Ф. Федоров; Всероссийский научн.-исслед. ин-т жиров; заявл. 94004266/13; опубл. 09.02.1994.



Приведенные материалы анализа состояния вопроса позволили сделать вывод о необходимости продолжения научно-исследовательской работы по повышению эффективности зерна сои. В виду своих неограниченных возможностей электрофизический метод обработки ультразвуком активно используется в пищевых технологиях [10]. При этом подчеркиваются перспективы его использования при разработке инновационных технологий [11]. Положительный опыт применения ультразвука в хлебной промышленности<sup>17</sup>, молочной индустрии [12], при переработке мяса [13–14], стерилизации [15] и очистке жидкой продукции [16–17] говорит о возможности его использования при переработке сои.

#### Материалы и методы

Химический анализ сои осуществлялся в соответствии с ГОСТ 13979.2-94 Жмыхи, шроты и горчичный порошок. Метод определения массовой доли жира и экстрактивных веществ<sup>18</sup>; ГОСТ 13979.3-68 Жмыхи и шроты. Метод определения суммарной массовой доли растворимых протеинов<sup>19</sup>; ГОСТ 52839-2007 Корма. Методы определения содержания сырой клетчатки с применением промежуточной фильтрации<sup>20</sup>.

Степень ферментативной активности устанавливалась по ГОСТ 13979.9-69 Жмыхи и шроты. Методика выполнения измерений активности уреазы<sup>21</sup>. Отрицательное действие ингибиторов

на ферменты пищеварительного тракта определялось казеинолитическим методом М. Л. Какейда (в модификации И. И. Бенкен). Данный метод основан на сравнении протеолитической активности растворов фермента в присутствии ингибитора и без него.

На ротационном вискографе «Brabender» определялась вязкость водно-соевой суспензии. Технологические параметры назначались в соответствии с кормовыми технологиями и ГОСТ 27149-95 Жмых соевый кормовой. Технические условия<sup>22</sup>, ГОСТ 53799-2010 Шрот соевый кормовой тостированный. Технические условия<sup>23</sup>. Обработка результатов опытов осуществлялась стандартным методом регрессионного анализа данных.

Рациональные режимные параметры ультразвуковой обработки исследовались на установке УЗУ-1,6-О при частоте ультразвуковых колебаний 18–20 кГц.

#### Результаты исследования

В результате ультразвуковой обработки сои по установленным режимам было выявлено падение активности фермента уреазы, протекающее за счет окисляющего действия пероксида водорода [18] и количества активного ингибитора – из-за интенсивного экстрагирования. Технологическими параметрами, влияющими на эффективность ультразвуковой обработки, являются расход раствора, степень измельчения сои, концентрация окислителя, частота и мощность ультразвукового воздействия [19].

<sup>17</sup> Комоликов А. С., Ахмедова Д. К. Влияние ультразвука на процесс замеса и расстойки теста // Явления переноса в процессах и аппаратах химических и пищевых производств : мат-лы II Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж, 2016. С. 79–84.

<sup>18</sup> ГОСТ 13979.2-94 Жмыхи, шроты и горчичный порошок. Метод определения массовой доли жира и экстрактивных веществ. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200022996>

<sup>19</sup> ГОСТ 13979.3-68 Жмыхи и шроты. Метод определения суммарной массовой доли растворимых протеинов. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200022997>

<sup>20</sup> ГОСТ 52839-2007 Корма. Методы определения содержания сырой клетчатки с применением промежуточной фильтрации. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200064169>

<sup>21</sup> ГОСТ 13979.9-69 Жмыхи и шроты. Методика выполнения измерений активности уреазы. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200023004>

<sup>22</sup> ГОСТ 27149-95 Жмых соевый кормовой. Технические условия. URL: <http://vsegost.com/Catalog/95/9532.shtml>

<sup>23</sup> ГОСТ 53799-2010 Шрот соевый кормовой тостированный. Технические условия. URL: <http://vsegost.com/Catalog/49/49258.shtml>

*Степень измельчения обрабатываемых семян*

Степень измельчения сои определялась по частной методике. Четыре навески формировались массой 50 г с разной степенью измельчения. Первая навеска заполнялась неизмельченной соей, а в остальных степень измельчения составляла 0,5; 0,1 и 0,05 соответственно. Для инактивации антипитательных веществ соя обрабатывалась пероксидом водорода.

Установлено, что ввиду зависимости эффективности обработки семян от концентрации окислителя влияние указанного фактора должно быть минимизировано. Этот эффект был достигнут за счет использования окисляющего раствора с наименьшей концентрацией, значение которой было установлено экспериментально и составило 3 %. С этой целью исходную 27,5%-ную смесь разбавили 8-кратным объемом дистиллированной воды. Кроме этого, подготовленные и измельченные до различной крупности размолы пробы семян обрабатывались повышенным количеством раствора, что позволило поддерживать постоянную концентрацию раствора вблизи твердой частицы и сделать скорость диффузии окислителя в зерне зависимой только от площади внешней поверхности частиц измельченной сои. Обработанные частицы высушивались

при комнатной температуре в течение 1 сут. до установленных при заготовках и поставках показателей влажности (в пределах 12 %). Результаты исследований приведены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что вполне приемлемым является резкое снижение концентрации активного фермента в зависимости от перечисленных в таблице сортов сои, в 1,34; 1,12; 1,18 и 1,26 раза при степени измельченности зерна 0,1.

Это происходит по причине уменьшения длины капилляров в частицах измельченного зерна сои и, следовательно, увеличения суммарной площади его внешней поверхности, что существенно воздействует на скорость пропитки и, следовательно, на эффективность процесса окисления фермента уреазы.

В результате дальнейших исследований было установлено, что при обработке частиц зерна сои раствором пероксида водорода наблюдается прямо пропорциональное снижение содержания активного фермента уреазы, зависящей от интенсивности процесса. При этом в зависимости от принятых режимов обработки и физико-механических особенностей зерна сои данный процесс протекает неравномерно, с множественными перепадами скорости, зависящими или от изменения биохимических свойств зерна сои в резуль-

Таблица 1

Table 1

**Зависимость содержания активной уреазы в сое от степени ее измельченности**  
**Dependence of the content of active urease in soybean on the degree of its grinding**

Степень измельченности / Fineness degree	Активность уреазы, ед. pH / Activity of urease, pH units			
	Злато / Zlato	Баpa / Bara	Coep-4 / Soer-4	Coep-5 / Soer-5
Необработанное зерно / Unprocessed	2,33	2,26	2,21	2,31
1,00	2,09	2,13	2,00	2,04
0,50	1,93	2,10	1,98	2,02
0,10	1,54	1,99	1,83	1,73
0,05	1,46	1,95	1,76	1,64



тате фазового перехода, или от увеличения степени измельчения. Например, для сортов Злато и Соер-5 из-за резких колебаний кривой исследуемая зависимость может рассматриваться с позиции гармонического закона, а для сортов Бара и Соер-4 справедлив линейный закон, что объясняется относительно постоянной скоростью снижения концентрации активной уреазы.

Это наглядно демонстрирует снижение активности уреазы, протекающей при измельчении зерна сои до крупности помола в интервале 0,1–0,05, при котором размеры фрагментов составляют  $2,5 \cdot 10^{-4}$ – $5 \cdot 10^{-4}$  м, в среднем на 25 %. Интенсивное подавление фермента при этом следует объяснить увеличением суммарной площади поверхности зерна сои при дроблении, поскольку молекулы уреазы, находящиеся внутри семян, после измельчения оказываются на внешних сторонах частиц, что активизирует ее взаимодействие с окислителем. Дальнейшее измельчение зерна сои не оказывает существенного влияния на эффективность обработки сои; снижение содержания активного фермента при этом не наблюдается. Причиной этого является повышенный расход активного вещества рабочего раствора, а также замедление его проникновения в быстро набухающие мелкие зерновые фрагменты, все еще содержащие значительное количество уреазы.

#### *Концентрация окисляющего раствора*

Концентрация окисляющего раствора имеет существенное значение для повышения технологической эффективности процесса обработки сои. Насыщенность извлекаемого активного вещества в рабочем растворе является одним из основных параметров, определяющих скорость течения гетерогенных реакций в ходе массообменных взаимодействий. Особое значение исследуемый параметр приобретает во время химической обработки, когда

при постоянной скорости реакции от концентрации окисляющего раствора зависит не только полнота извлечения компонента, но и качество полезных составляющих, в той же степени подверженных химическому воздействию при обработке.

Установлено, что при увеличении концентрации окислителя в рабочем растворе повышается эффективность нейтрализации фермента уреазы, а при высокой концентрации пероксида водорода наблюдается его взаимодействие с другими компонентами зерна сои, что ведет к ухудшению его органолептических показателей. В связи с этим особое внимание уделялось исследованиям, направленным на выявление концентрации окисляющего раствора, обеспечивающей одновременно подавление уреазы и сохранение полезных свойств сырья в полном объеме.

Рациональная концентрация окислителя исследовалась по методике, в соответствии с которой в растворе для обработки измельченного зерна сои использовались смеси, характеризующиеся последовательным увеличением концентрации пероксида водорода, начиная с ее наименьшего эффективного значения, при котором наблюдается снижение активности фермента уреазы до 3 %. В последующих исследованиях значения показателя концентрации принимались равными 6, 9 и 12 %, что дало более интенсивное снижение активности фермента (табл. 2).

Динамика изменения активности уреазы при дальнейших исследованиях обработки зерна сои растворами с различной концентрацией окислителя близка к линейной.

На начальном этапе исследования концентрации окислителя рост скорости ферментативной активности имел следующие значения: Злато – 35,6 %; Бара – 12,8 %; Соер-4 – 19,0 %; Соер-5 – 27,3 %. По мере увеличения концентрации окислителя активность уреазы снижалась, соответственно, до 28,8; 29,9;

Т а б л и ц а 2  
T a b l e 2

**Зависимость содержания активной уреазы от концентрации пероксида водорода**  
**Dependence of the content of active urease concentration of hydrogen peroxide**

Концентрация пероксида водорода, % / Concentration, %	Активность уреазы, ед. рН / Activity of urease, pH units			
	Злато / Zlato	Бара / Bara	Соер-4 / Soer-4	Соер-5 / Soer-5
3	1,50	1,97	1,79	1,68
6	0,88	1,31	1,03	0,85
9	0,43	0,51	0,38	0,39
12	0,18	0,22	0,20	0,14

34,4 и 35,9 %. При этом наблюдалось также снижение активности фермента на 17,2; 35,4; 29,4 и 19,9 %. Обработка измельченных частиц раствором с наибольшей концентрацией дала следующие показатели: Злато – 10,7 %; Бара – 12,8 %; Соер-4 – 8,1 %; Соер-5 – 10,8 %.

Из этого следует, что при обработке сырья растворами с концентрацией окислителя от 9 до 12 % активность уреазы удается подавить на 81,2–91,9 %, что составляет 0,15–0,39 рН.

Данные показатели содержания активного фермента удовлетворяют требованиям ГОСТов 27149–95 и 53799–2010, а значит, исследованный диапазон значений следует использовать на практике. Обработка зерна сои растворами более низкой концентрации не только интенсивнее протекает, но и значительно улучшает ее органолептические показатели (табл. 3).

Улучшение органолептических показателей объясняется окислением одо-

Т а б л и ц а 3  
T a b l e 3

**Значения органолептических характеристик сои после обработки раствором с 3%-ной концентрацией окислителя**  
**Values of organoleptic characteristics of soybean after treatment with a solution of 3 % concentration of the oxidizer**

Сорт / Variety	Показатель / Indicator	До обработки / Before processing	После обработки / After processing
Злато / Zlato	Цвет / Color	Бледно-желтый / Light yellow	Песочный / Sand
	Запах / Flavor	Рыбный / Fishy	Ореховый / Nutty
	Вкус / Taste	Вяжущий / Astringent	Нейтральный / Neutral
Бара / Bara	Цвет / Color	Желтый / Yellow	Янтарный / Amber
	Запах / Flavor	Бобовый / Beans	Арахисовый / Peanut
	Вкус / Taste	Слабая горечь / Slightly bitter	Нейтральный / Neutral
Соер-4 / Soer-4	Цвет / Color	Бледно-коричневый / Light brown	Золотистый / Golden
	Запах / Flavor	Землистый / Earthy	Сладкий / Sweet
	Вкус / Taste	Гороховый / Pea	Умеренно-гороховый / Mild pea
Соер-5 / Soer-5	Цвет / Color	Молочно-желтый / Milky yellow	Горчишный / Mustard
	Запах / Flavor	Выраженный бобовый / Strong bean	Отсутствует / No
	Вкус / Taste	Резкий бобовый / Sharp bean	Отсутствует / No



рирующих веществ с их дальнейшим превращением в фосфатиды. На этом основании к применению на практике рекомендуются растворы с концентрацией окислителя в интервале 3–6 %.

*Количество окисляющего раствора*

Необходимое количество раствора низкой концентрации определялось по методике, согласно которой формировались навески зерна сои массой 50 г на предварительно подготовленной средней пробе со степенью измельчения 0,05, обработанной различными количествами раствора пероксида водорода (табл. 4).

Стабильная и качественная эффективность обработки зерна сои наблюдается при обработке раствором, подаваемом в количестве 40 мл. Уменьшение степени инактивации фермента уреазы в этом случае наблюдается в пределах 17,6, 12,4, 8,6 и 11,3 %, что меньше соответствующих начальных показателей. При увеличении объема раствора до 80–120 мл скорость окисления возрастает, что свидетельствует о повышении интенсивности обработки на 38,2, 46,9, 47,5 и 41,6 %. В ходе дальнейших исследований наблюдается замедление скорости процесса и на 4-ом участке, соответствующем обработке раствором объемом 160 мл: активность фермента падает лишь на 9,0, 5,8, 0,9 и 1,3 %.

Судя по результатам исследования, ферментативную активность удается снизить на 94,8, 92,2, 90,0 и 92,2 %, что

соответствует значениям 0,12, 0,16, 0,22 и 0,18 рН. Данные показатели удовлетворяют требованиям ГОСТов 27149–95 и 53799–2010, и их следует рекомендовать к использованию на практике.

*Вязкость обрабатываемой суспензии*

Известно, что ультразвук является мощным фактором интенсификации массообменных процессов. Учитывая, что акустические излучатели создают микропотоки, омывающие объекты обработки, их воздействие наиболее эффективно в водно-соевой суспензии с пониженной вязкостью. На этом основании было принято решение оценивать вязкость суспензии для условия сдвигового характера течения нелинейных сред на ротационном вискографе «Brabender» с электронным регулированием частоты вращения от 10 до 120 мин<sup>-1</sup>. Целью данных исследований было установление режимных показателей процесса, обеспечивающих равномерность обработки и способствующих эффективному развитию ультразвуковой кавитации и, как следствие, интенсивному массообмену, что в комплексе позволяет стабилизировать качественные показатели белка.

При исследованиях использовалось зерно, измельченное до крупности 150–160 мкм, с влажностью 7 %. Оно смешивалось с водой из расчета 450 мл жидкости на 120 г измельченных частиц. Измерения осуществлялись в 2 этапа: при постоянной температуре, но

Таблица 4

Table 4

**Зависимость изменения активности уреазы от количества окисляющего раствора**

**Dependence of changes in urease activity on the amount of oxidizing solution**

Количество раствора, мл / Amount of hydrogen peroxide solution, ml	Активность уреазы, ед. рН / Activity of urease pH units			
	Злато / Zlato	Бапа / Bara	Соер-4 / Soer-4	Соер-5 / Soer-5
40	1,92	1,98	2,02	2,05
80	1,22	1,35	1,29	1,17
120	0,33	0,29	0,24	0,21
160	0,12	0,16	0,22	0,18

меняющейся частоте перемешивания суспензии и при растущей температуре, но постоянной частоте вращения. Была определена пропорция, в соответствии с которой минимальная масса жидкости в суспензии должна в 3,75 раза превосходить массу зерна сои. На основании этого было принято соотношение твердой и жидкой фаз 1:3,75.

На первом этапе испытания велись при комнатной температуре, составляющей 20 °С, и при последовательном увеличении частоты вращения до 10, 20, 40, 60, 80, 100 и 120 мин<sup>-1</sup>. На втором этапе – при частоте перемешивания суспензии 10 мин<sup>-1</sup> и постепенном повышении температуры до 20, 30, 40, 50, 60, 70 и 90 °С. Результаты приведены в табл. 5–6.

Исходя из данных табл. 5–6 были построены графики, отображающие характер изменения значений показателя вязкости водно-соевой суспензии при переменных частотах вращения и температурах (рис. 1–2).

На рис. 1 видно, что с увеличением частоты перемешивания в диапазоне 10–120 мин<sup>-1</sup> вязкость обрабатываемой суспензии возрастает до 70,58–229,41 Па·с. Это объясняется дилатантным эффектом: плотно расположенные измельченные частицы сои перемешаны с жидкостью, и при низких скоростях сдвига частичек жидкость способствует легкому перетеканию суспензии, а при высоких жидкость не успевает заполнять свободное пространство, образующееся между движущимися частицами. Это ведет к возрастанию трения и повышению вязкости.

Установленная зависимость описывается линейным законом, в соответствии с которым вязкость должна изменяться равномерно при незначительных отклонениях в скорости при частотах вращения 60 и 90 мин<sup>-1</sup>. Частота вращения 10 мин<sup>-1</sup> обеспечивает наименьшее значение вязкости 70,58 Па·с и рекомендуется для практического использования.

Таблица 5

Table 5

**Изменение показателя вязкости суспензии при различных частотах перемешивания**  
**Change of the slurry viscosity at various temperatures**

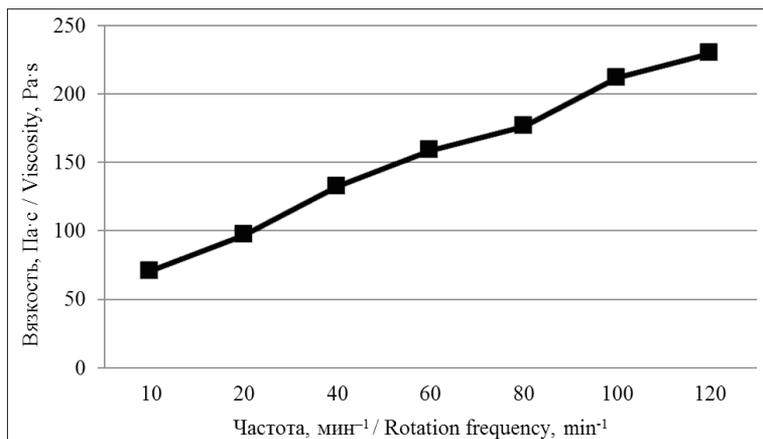
Показатель / Indicator	Значение показателя / Indicator value						
Частота, мин <sup>-1</sup> / Rotation frequency, min <sup>-1</sup>	10	20	40	60	80	100	120
Вязкость, Па·с / Viscosity, Pa·s	70,58	97,05	132,35	158,82	176,47	211,76	229,41

Таблица 6

Table 6

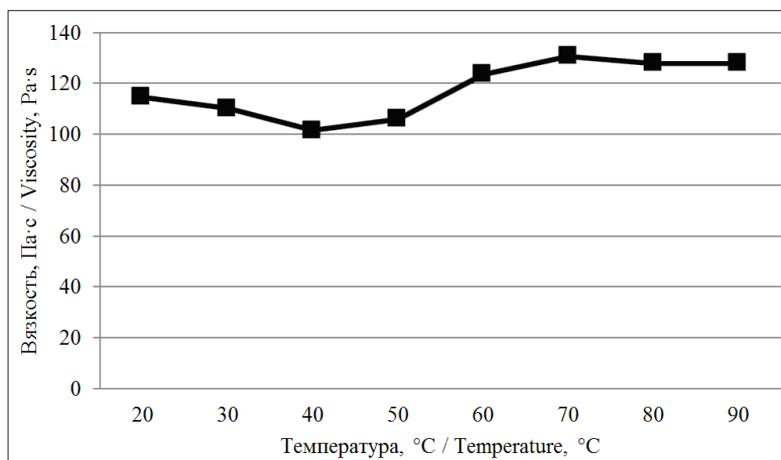
**Изменение показателя вязкости суспензии при различных температурах нагрева**  
**Change of the slurry viscosity at various temperatures**

Показатель / Indicator	Значение показателя / Indicator value							
Температура, °С / Temperature, °C	20	30	40	50	60	70	80	90
Вязкость, Па·с / Viscosity, Pa·s	114,7	110,2	101,5	105,9	123,5	130,6	127,9	127,8



Р и с. 1. Зависимость вязкости водно-соевой суспензии от частоты ее перемешивания

F i g. 1. Graph of the viscosity of the water-soybean suspension to the rotation frequency



Р и с. 2. Зависимость вязкости водно-соевой суспензии от температуры нагрева

F i g. 2. The graphical dependence of the viscosity of water-soy suspension temperature

На рис. 2 видно, что по мере роста температуры от 20 до 90 °C вязкость суспензии изменяется в пределах от 101 до 131 Па·с. Установлено, что наименьшее значение вязкости наблюдается при 43 °C, а наибольшее – при 70 °C.

Снижение вязкости на 14 Па·с при повышении температуры от 20 до 43 °C достигается за счет сообщения полимерной системе дополнительного тепла. Изменение вязкости суспензии под воздействием твердой фазы при этом исключено и, как следует из гра-

фика, резкое ее возрастание до 30 Па·с наблюдается только при дальнейшем повышении температуры до 43–70 °C. После достижения среднего значения (127 Па·с), показатели вязкости продолжают изменяться незначительно.

Таким образом, водно-соевая суспензия характеризуется относительно низкой вязкостью, изменяющейся незначительно при различных частотах перемешивания и температурных режимах. Это позволяет сделать вывод о том, что полимерная система на основе

воды и измельченной сои достаточно удобна для обработки в поле интенсивных ультразвуковых волн. Исходя из приведенных данных, в практических целях рекомендуются следующие значения обработки водно-соевой суспензии: массовое соотношение воды и измельченной сои в суспензии – 1:3,75; частота вращения мешалки – 10 мин<sup>-1</sup>; температура обрабатываемой среды – 43 °С.

*Исследование динамики экстрагирования ингибиторов*

Как отмечалось ранее, при обработке зерна сои пероксидом водорода эффективность процесса экстрагирования ингибиторов зависит от степени его измельчения, концентрации извлекаемого вещества, количества самого экстрагента и времени, затрачиваемого на операцию экстрагирования. На этом основании возникает необходимость выбора оптимальной длительности обработки, при которой возможно экстрагировать максимальное количество ингибитора.

В исследовании были использованы образцы зерна сои, которые измельчались до крупности среднего помола и замачивались в течение 1, 4, 6 и 8 ч. Размол зерна осуществлялся с целью повысить эффективность процесса экстрагирования подобно тому, как это было при обработке раствором пероксида водорода (табл. 7).

Из полученных результатов следует, что динамика снижения активности ингибиторов протеолитических ферментов для сортов Бара и Соер-4 характеризуется многократными изменениями скорости экстрагирования, а обработка семян сортов Злато и Соер-5 протекает с более равномерно.

Данные отличия объясняются как индивидуальными особенностями биологического строения различных сортов зерна сои, так и их биохимическим составом, ингибиторами различной степени растворимости и, следовательно, скорости диффузии во внешнюю среду.

*Конструктивная схема низкотемпературной ультразвуковой установки*

При обработке зерна сои в ультразвуковом поле интенсификация процесса переработки протекает за счет акустических колебаний в виде направленных микропотоков [20]. Возникающее в данных микропотоках переменное давление обеспечивает перенос извлекаемого вещества за счет конвекции. Поскольку конвективная диффузия обладает более быстрым массообменом, эффективный коэффициент диффузии растет, и это позволяет сократить продолжительность экстрагирования. Эффект кавитационного явления, возникающего в жидкости при прохождении акустической волны, интенсифицирует рост движущее

Т а б л и ц а 7  
T a b l e 7

**Зависимость изменения активности ингибитора трипсина от длительности экстрагирования**  
**Dependence of change of activity of trypsin inhibitor on extraction duration**

Время замачивания, ч / Soaking time, hours	Активность ингибитора трипсина, мг/г / The activity of trypsin inhibitor, mg/g			
	Злато / Zlato	Бара / Bara	Соер-4 / Soer-4	Соер-5 / Soer-5
Необработанное зерно / Raw	21,1	51,2	45,6	61,3
1	9,7	16,3	16,4	34,9
4	5,0	13,3	13,2	13,4
6	3,1	4,6	7,2	9,8
8	2,7	3,0	6,8	9,1



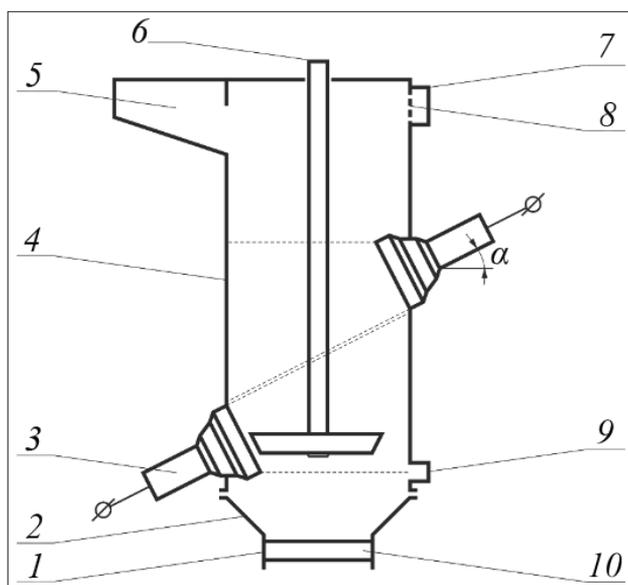
го давления, обеспечивающего активизацию влагопереноса в фазе пропитки. Кумулятивные акустические микропотоки, образованные сократившейся паровоздушной полостью, приводят к мгновенному увеличению скорости обтекания объекта обработки, интенсифицируя тем самым массоотдачу.

Схема установки для экстрагирования ингибиторов из зерна сои представлена на рис. 3.

Установка работает следующим образом. Рабочий раствор подается через патрубок 9, измельченное зерно сои – посредством загрузочного лотка 5. Перемешивание происходит в корпусе 4, оснащенный излучателем ультразвука 3, расположенными по диагонали напротив друг друга под

углом  $\alpha$ , что позволяет продуцировать интенсивную кавитацию во всем объеме рабочей области устройства. Длительность цикла обработки – 20 мин. Обработанный продукт скапливается в нижней части устройства и выгружается через патрубок 1, снабженный выгрузным устройством 10<sup>24</sup>.

С целью определения конструктивных параметров установки исследовалась кинетика распространения ультразвуковых колебаний в водно-соевой суспензии. Она связана с переносом энергии, для количественной оценки которой необходимо создать параметры акустического поля, характеризующие смещение колеблющихся частиц относительно положения покоя, их скорость и ускорение, а также частоту,



Р и с. 3. Схема установки для ультразвуковой обработки зерна: 1 – выгрузной патрубок; 2 – съемное дно; 3 – излучатель ультразвука; 4 – цилиндрический корпус; 5 – загрузочный лоток; 6 – мешалка; 7 – патрубок вывода жидкости; 8 – фильтр; 9 – патрубок подачи жидкости; 10 – выгрузное устройство

Fig. 3. – Device for ultrasonic treatment of grain: 1 – discharge nozzle; 2 – removable bottom; 3 – ultrasound emitter; 4 – cylindrical body; 5 – loading tray; 6 – agitator; 7 – branch pipe for output of liquid; 8 – filter; 9 – branch pipe for input of liquid; 10 – discharging device

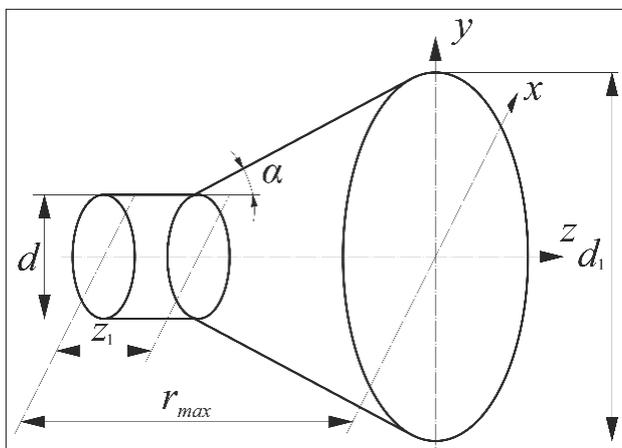
<sup>24</sup> Патент 130519, МПК В02В 1/04. Устройство для обработки зерна / Ф. Я. Рудик, Н. Л. Моргунова, Ю. А. Кодацкий. № 2013112532/13; заявл. 20.03.2013; опубл. 27.07.2013.

длину и скорость акустической волны, распространение которых исследовалось по схеме, представленной на рис. 4.

В соответствии с расчетами были установлены кинематические и дина-

ческие параметры ультразвукового излучения для обработки сои (табл. 8–9).

Подготовленная по ранее описанной методике водно-соевая суспензия обрабатывалась в ультразвуку-



Р и с. 4. Расчетная схема ультразвукового источника  
F i g. 4. The calculated diagram of the ultrasonic source

Т а б л и ц а 8  
T a b l e 8

**Кинематические характеристики ультразвукового поля**  
**Kinematic characterization of ultrasonic fields**

Параметр / Parameter	Размерность / Dimension	Значение / Value	Параметр / Parameter	Размерность / Dimension	Значение / Value
Мгновенное смещение, $a$ / Immediate offset, $a$	$m \cdot 10^{-6} /$ $m \cdot 10^{-6}$	3,54	Скорость звуковых волн, $c$ / Speed of sound waves, $c$	$m/s /$ $m/s$	1 473
Скорость, $v$ / Speed, $v$	$m/s \cdot 10^{-1} /$ $m/s \cdot 10^{-1}$	3,99	Скорость распространения волны, $\lambda$ / Wave propagation velocity, $\lambda$	$m /$ $m$	0,08
Ускорение, $b$ / Acceleration, $b$	$m/s^2 \cdot 10^4 /$ $m/s^2 \cdot 10^4$	4,52	Длина зоны, $z_1$ / length of the zone, $z_1$	$m /$ $m$	0,16
Амплитуда скорости, $V$ / Amplitude of speed, $V$	$m \cdot 10^{-1} /$ $m \cdot 10^{-1}$	5,65	Угол раскрытия конуса, $\alpha$ / The opening angle of the cone, $\alpha$	рад. / rad	0,47
Амплитуда ускорения, $B$ / Amplitude of acceleration, $B$	$m \cdot 10^4 / m \cdot 10^4$	6,39	Расстояние от излучателя до последнего максимума, $r_{max}$ / Distance from emitter to last maximum, $r_{max}$	$m /$ $m$	0,55



**Динамические характеристики ультразвукового поля**  
**Dynamic characteristics of an ultrasonic field**

Параметр / Parameter	Размерность / Dimension	Значение / Value	Параметр / Parameter	Размерность / Dimension	Значение / Value
Величина звукового давления, $P_3$ / Value of the sound pressure, $P_3$	Па·10 <sup>5</sup> / Pa·10 <sup>5</sup>	9,12	Полная энергия, $W$ / Total energy, $W$	Вт/м <sup>2</sup> ·10 <sup>3</sup> / W/m <sup>2</sup> ·10 <sup>3</sup>	9,79
Полное давление, $P_{пол}$ / Total pressure, $P_{пол}$	Па·10 <sup>6</sup> / Pa·10 <sup>6</sup>	1,01	Коэффициент затухания, $\alpha_0$ / Damping factor, $\alpha_0$	сек <sup>2</sup> /м·10 <sup>-3</sup> / sec <sup>2</sup> /m·10 <sup>-3</sup>	4,6
Среднее значение энергии ультразвуковой волны, $E$ / Average value of ultrasonic wave energy, $E$	Н / м <sup>2</sup> / N / m <sup>2</sup>	179	Амплитуда колебания, $A_{rmax}$ / Amplitude of oscillation, $A_{rmax}$	м·10 <sup>-6</sup> / m·10 <sup>-6</sup>	4,99
Количество энергии, переносимое волной за единицу времени, $J$ / The energy carried by the wave per unit time, $J$	Вт/м <sup>2</sup> ·10 <sup>5</sup> / W/m <sup>2</sup> ·10 <sup>5</sup>	2,63	Интенсивность, $J_{rmax}$ / Intensity, $J_{rmax}$	Вт/м <sup>2</sup> ·10 <sup>5</sup> / W/m <sup>2</sup> ·10 <sup>5</sup>	2,62

вой установке течение 10, 20, 30, 40 и 50 мин. Использовались излучатели магнитострикционного типа мощностью 1,6 кВт, частотой излучения 18 и 20 кГц и плотностью мощности 4 Вт/см<sup>2</sup>. Результаты исследований приведены в табл. 10–11.

Исходя из полученных данных, при обработке водно-соевой суспензии с частотой ультразвука 18 кГц и време-

нем обработки в интервале 30–40 мин, белковый ингибитор извлекается из нее на 86–90 %. С повышением частоты до 20 кГц время обработки снижается в 3–4 раза, а извлечение ингибитора достигает 80–90 %. Дальнейшее увеличение частоты не оказывает существенного воздействия на динамику извлечения ингибитора. Для оценки влияния акустического излучения ультразвукового

**Активность ингибитора в сое при различной длительности обработки частотой ультразвука 18 кГц**

**Inhibitor activity in soybean at various ultrasound processing times at a frequency of 18 kHz**

Время обработки, мин / Processing time, min	Активность ингибитора, мг/г / The activity of inhibitor, mg/g			
	Злато / Zlato	Бара / Bara	Соер-4 / Soer-4	Соер-5 / Soer-5
10	17,1	37,4	36,0	47,2
20	12,0	26,8	20,1	33,8
30	3,8	7,7	5,0	7,4
40	2,0	6,1	4,1	6,1
50	1,5	5,1	3,2	5,5

**Активность ингибитора в сое при различной длительности обработки частотой ультразвука 20 кГц**

**Inhibitor activity in soybean at different ultrasound processing times at a frequency of 20 kHz**

Время обработки, мин / Processing time, min	Активность ингибитора, мг/г / The activity of inhibitor, mg/g			
	Злато / Zlato	Бара / Bara	Соер-4 / Soer-4	Соер-5 / Soer-5
10	14,3	30,2	27,8	36,8
20	4,0	10,24	8,2	11,6
30	2,3	4,0	4,6	5,5
40	1,9	4,0	3,6	4,9
50	1,4	3,5	3,6	3,6

диапазона на форму и структуру белковых молекул из необработанной сои были сформированы навески массой 50 г, откуда после измельчения и обезжиривания осуществлялось экстрагирование ингибиторов. Полученные экстракты обрабатывались ультразвуком с частотой излучения 20 кГц в течение 30 мин. Активность ингибитора трипсина в соевых экстрактах приняла следующие значения: Злато – 18,3; Бара – 45,5; Соер-4 – 41,9; Соер-5 – 53,3.

Также был установлен частичный спад биологической активности веществ антипитательной направленности, средний показатель которой сократился на 11,2 %. Таким образом, акустическое излучение ультразвукового диапазона не только способствует повышению эффективности влажной обработки зерна сои, позволяя уменьшить затрачиваемое на нее время в 5–6 раз, но также может рассматриваться в качестве фактора, вызывающего денатурацию белков.

**Обсуждение и заключения**

В результате теоретических исследований были сформулированы факторы, влияющие на эффективность обработки сои в интенсивном ультразвуковом поле: степень измельчения; концентрация и количество окислительного раствора; вязкость водно-со-

евой суспензии; динамика экстрагирования и конструктивные особенности установки для ультразвуковой обработки зерна сои.

Экспериментальные исследования позволили определить конструктивные параметры установки для ультразвуковой обработки зерна сои и рациональные технологические режимы, обеспечивающие эффективную нейтрализацию веществ антипитательной направленности:

- частота вращения мешалки – 10–20 мин<sup>-1</sup>;
- частота ультразвукового излучения – 18–20 кГц;
- производительность установки – 120 кг/ч;
- степень нейтрализации фермента уреазы при окислении – 92 %;
- степень извлечения водорастворимого ингибитора – 86 %.

Были разработаны технология и установка, позволяющие проводить обработку сои в интенсивном поле ультразвуковых волн. Производственная проверка показала, что предложенная технология обеспечивает нейтрализацию вредных соединений на 80–90 % при среднем росте эффективности белка на 33 %. Срок окупаемости капиталовложений на внедрение технологии и оборудования составляет 1,17 года.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. **Филиппов М.** Анализ качества продуктов переработки сои // Животноводство России. 2015. № 9. С. 60–61. URL: <http://www.zzz.ru/node/4214>
2. **Светашова Л. А., Климкина Е. В.** Современное состояние производства сои и оценка эффективности ее воздействия // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2015. Т. 46, № 3. С. 190–196. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24305299>
3. **Ольховатов Е. А., Щербакова Е. В.** Разработка рецептур бобовых паст «Хумус» с применением семян сои современных сортов отечественной селекции // Сб. науч. тр. Всероссийского научно-исследовательского института овцеводства и козоводства. 2015. Т. 1, № 8. С. 241–244. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24861458>
4. Обоснование технологии и оборудования с целью получения соевого компонента для пищевых систем различного назначения / С. М. Доценко [и др.] // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2016. Т. 112, № 1. С. 84–91. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-tehnologii-i-oborudovaniya-s-tselyu-polucheniya-soevogo-komponenta-dlya-pischevyh-sistem-razlichnogo-naznacheniya>
5. **Рудик Ф. Я., Моргунова Н. Л., Коцацкий Ю. А.** Закономерности массообменных процессов при переработке семян сои в корм // Аграрный научный журнал. 2016. № 5. С. 70–73. URL: <https://readera.ru/zakonomernosti-massoobmennyyh-processov-pri-pererabotke-semjan-soi-v-korm-14033692>
6. **Фролов В. Ю., Сысоев Д. П., Класнер Г. Г.** Моделирование технологического процесса измельчения замоченного зерна сои // Техника и оборудование для села. 2015. Т. 212, № 2. С. 20–23. URL: [https://elibrary.ru/full\\_text.asp?id=22962197](https://elibrary.ru/full_text.asp?id=22962197)
7. Современные технологии переработки сои в России / Л. В. Гапанова [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья. 2005. № 2. С. 30–31. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9011015>
8. **Войтенко О. Д.** Оценка эффективности технологий тепловой обработки сои при производстве кормовых добавок // Ресурсосберегающие технологии и технические средства в животноводстве : сб. науч. тр. Зеленоград, 2005. № 5. С. 211–224.
9. **Зверев С. В., Козин Е. В.** Инактивация антипитательных веществ в сое при высокотемпературной микронизации // Хранение и переработка сельхозсырья. 2008. № 4. С. 30–31. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=10439592>
10. **Bermúdez-Aguirre D., Mobbs T., Barbosa-Cánovas G. V.** Ultrasound applications in food processing. In: Feng H., Barbosa-Canovas G., Weiss J. Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing. Food Engineering Series. New York : Springer, 2011. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3_3)
11. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food : A review / T. S. Awad [et al.] // Food Research International. 2012. Vol. 48, Issue 2. P. 410–427. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.05.004>
12. **Ботвинникова В. В., Красуля О. Н.** Формирование потребительских свойств кисломолочных напитков на основе эффектов ультразвука // Вестник Южно-Уральского государственного университета (Сер. «Пищевые и биотехнологии»). 2015. Т. 3, № 4. С. 30–40. DOI: <https://doi.org/10.14529/food150405>
13. **Горбунова Н. А.** Альтернативные технологии – ультразвук в мясной промышленности (по материалам зарубежной литературы) // Все о мясе. 2016. № 2. С. 37–41. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25829026>
14. Effect of high power ultrasound waves on properties of meat : A review / S. D. Jayasooriya [et al.] // International Journal of Food Properties. 2004. No. 2. P. 301–319. DOI: <https://doi.org/10.1081/JFP-120030039>
15. Plasma sterilizer with ultrasonic cavitation / V. V. Krasnyj [et al.] // Problems of Atomic Science and Technology. 2007. No. 1. P. 188–190. URL: [http://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT\\_2007\\_1/article\\_2007\\_1\\_188.pdf](http://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2007_1/article_2007_1_188.pdf)

16. Inactivation of microorganisms / S. M. Alzamora [et al]. In: Feng H., Barbosa-Canovas G., Weiss J. Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing. Food Engineering Series. New York : Springer, 2011. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3\\_12](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3_12)

17. **Chen Z.** Microbial inactivation in foods by ultrasound // J Food Microbiol Saf Hyg. 2017. Vol. 2, Issue 1. 1000e102. DOI: <https://doi.org/10.4172/2476-2059.1000e102>

18. **Рудик Ф. Я., Кодацкий Ю. А.** Выбор рациональных параметров обработки зерна сои пероксидом водорода // Хранение и переработка сельхозсырья. 2011. № 11. С. 17–19.

19. **Рудик Ф. Я., Моргунова Н. Л., Кодацкий Ю. А.** Интенсификация водной обработки зерна сои с помощью ультразвука // Научное обозрение. 2013. № 1. С. 66–69. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18949112>

20. **Рудик Ф. Я., Кодацкий Ю. А.** Повышение кормовой ценности зерна сои глубокой влажной обработкой // Хранение и переработка сельхозсырья. 2012. № 1. С. 41–42.

*Поступила 06.12.2017; принята к публикации 29.03.2018; опубликована онлайн 29.06.2018*

*Об авторах:*

**Рудик Феликс Яковлевич**, профессор, кафедра технологий продуктов питания, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (410012, Россия, г. Саратов, Театральная пл., д. 1), доктор технических наук, ResearcherID: E-8546-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0115>, [k-pappsgau@rambler.ru](mailto:k-pappsgau@rambler.ru)

**Загородских Борис Павлович**, профессор, кафедра технического сервиса и технологии конструкционных материалов, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (410012, Россия, г. Саратов, Театральная пл., д. 1), доктор технических наук, ResearcherID: E-8582-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3480-0631>, [zagorodskihbp@yandex.ru](mailto:zagorodskihbp@yandex.ru)

**Моргунова Наталья Львовна**, доцент, кафедра технологий продуктов питания, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (410012, Россия, г. Саратов, Театральная пл., д. 1), кандидат сельскохозяйственных наук, ResearcherID: H-1435-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1671-0528>, [morgunovanl@mail.ru](mailto:morgunovanl@mail.ru)

**Кодацкий Юрий Анатольевич**, технолог, ООО «ПиткоФФ» (663300, Россия, г. Норильск, ул. 50 лет Октября, д. 14), кандидат сельскохозяйственных наук, ResearcherID: H-1456-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5165-5723>, [yurykodatsky@yandex.ru](mailto:yurykodatsky@yandex.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

Ф. Я. Рудик – научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования, подготовка программы и начального варианта текста и формирование выводов; Б. П. Загородских – подготовка методики и анализ результатов исследований, доработка текста, редактирование текста; Н. Л. Моргунова – литературный и патентный анализ, проведение и обработка теоретических и экспериментальных исследований, верстка текста; Ю. А. Кодацкий – проведение теоретических и экспериментальных исследований.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Filippov M. Quality analysis of soya processing products. *Zhivotnovodstvo Rossii = Livestock of Russia*. 2015; 9:60–61. Available at: <http://www.zzr.ru/node/4214> (In Russ.)

2. Svetashova L. A., Klimkina Ye. V. Current state of soybean production and evaluation of efficiency of technologies for its cultivation. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Voronezh State Agrarian University Bulletin*. 2015; 46(3):190–196. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24305299> (In Russ.)



3. Olkhovtov Ye. A., Shcherbakova Ye. V. [Development of recipes for bean pastes “Humus” with application of soybean seeds of modern varieties of domestic selection]. In: Proceedings of Russian Scientific Research Institute of Sheep and Goat Industry. 2015; 1(8):241–244. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24861458> (In Russ.)
4. Dotsenko S. M., Guzhel Y. A., Agafonov I. V., Kovalyova L. A., Volkov S. P. The justification technology and equipment to make soy components for food systems of various applications. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Krasnoyarsk State Agrarian University Bulletin. 2016; 112(1):84–91. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-tehnologii-i-oborudovaniya-s-tselyu-polucheniya-soevogo-komponenta-dlya-pishevyyh-sistem-razlichnogo-naznacheniya> (In Russ.)
5. Rudik F. Ya., Morgunova N. L., Kodatsky Yu. A. Regularities of mass-transfer in the course of soy processing. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = Agrarian Scientific Journal. 2016; 5:70–73. Available at: <https://readera.ru/zakonmernosti-massoobmennyyh-processov-pri-pererabotke-semjan-soi-v-korm-14033692> (In Russ.)
6. Frolov V. Yu., Sysoev D. P., Klasner G. G. Simulation process of soaked soybeans crushing. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela* = Machinery and Equipment for Countryside. 2015; 212(2):20–23. Available at: [https://elibrary.ru/full\\_text.asp?id=22962197](https://elibrary.ru/full_text.asp?id=22962197) (In Russ.)
7. Gaponova L. V., Polezhaeva T. A., Volotovskaya N. V., Kuzmin A. L. [Modern technologies of soybean processing in Russia]. *Khraneniye i pererabotka selkhozsyrya* = Storage and Processing of Agricultural Raw Materials. 2005; 2:30–31. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9011015> (In Russ.)
8. Voytenko O. D. [Evaluation of the efficiency of soybean heat treatment technologies for the production of feed additives]. *Resursosberegayushchiye tekhnologii i tekhnicheskiye sredstva v zhivotnovodstve* = Resource Saving Technologies and Technical Means in Animal Husbandry. 2005; 5:211–224 (In Russ.)
9. Zverev S. V., Kozin Ye. V. Inactivation of unhealthy substances in soy beans while IR-heating treatment. *Khraneniye i pererabotka selkhozsyrya* = Storage and Processing of Agricultural Raw Materials. 2008; 4:30–31. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=10439592> (In Russ.)
10. Bermúdez-Aguirre D., Mobbs T., Barbosa-Cánovas G. V. Ultrasound applications in food processing. In: Feng H., Barbosa-Canovas G., Weiss J. Ultrasound technologies for food and bioprocessing. Food Engineering Series. New York: Springer; 2011. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3_3)
11. Awada T. S., Moharram H. A., Shaltout O. E., Askerd D., Youssef M. M. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Research International*. 2012; 48(2):410–427. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.05.004>
12. Botvinnikova V. V., Krasulya O. N. Formulation of consumer properties of fermented milk products on the basis of ultrasound exposure. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Pishchevyye i biotekhnologii* = South Ural State University Bulletin. Series: Food and Biotechnology. 2015; 3(4):30–40. DOI: <http://doi.org/10.14529/food150405> (In Russ.)
13. Gorbunova N. A. Alternative technologies – ultrasound in meat industry (on the materials of foreign literature). *Vse o myase* = All about Meat. 2016; 2:37–41. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25829026> (In Russ.)
14. Jayasooriya S. D., Bhandari B. R., Torley P., D'Arcy B. R. Effect of high power ultrasound waves on properties of meat: A review. *International Journal of Food Properties*. 2004; 2:301–319. DOI: <https://doi.org/10.1081/JFP-120030039>
15. Krasnyj V. V., Klosovskij A. V., Panasko T. A., Shvets O. M., Semenova O. T., Taran V. S., et al. Plasma sterilizer with ultrasonic cavitation. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2007; 1:188–190. Available at: [http://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT\\_2007\\_1/article\\_2007\\_1\\_188.pdf](http://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2007_1/article_2007_1_188.pdf)
16. Alzamora S. M., Guerrero S. N., Schenk M., Raffellini S., López-Malo A. Inactivation of microorganisms. In: Feng H., Barbosa-Canovas G., Weiss J. Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing. Food Engineering Series. New York: Springer; 2011. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3\\_12](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3_12)
17. Chen Z. Microbial inactivation in foods by ultrasound. *J Food Microbiol Saf Hyg*. 2017; 2(1):E102. DOI: <https://doi.org/10.4172/2476-2059.1000e102>

18. Rudik F. Ya., Kodatsky Yu. A. [The choice of rational parameters for processing soybean grain with hydrogen peroxide]. *Khreneniye i pererabotka selkhozsyrya* = Storage and Processing of Agricultural Raw Materials. 2011; 11:17–19. (In Russ.)

19. Rudik F. Ya., Morgunova N. L., Kodatskiy Yu. A. Intensifying the water processing of soya grain with ultrasound. *Nauchnoye obozreniye* = Scientific Review. 2013; 1:66–69. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18949112> (In Russ.)

20. Rudik F. Ya., Kodatskiy Yu. A. [Increasing the feed value of soybean grain by deep wet processing]. *Khreneniye i pererabotka selkhozsyrya* = Storage and Processing of Agricultural Raw Materials. 2012; 1:41–42. (In Russ.)

*Received 06.12.2017; revised 29.03.2018; published online 29.06.2018*

*About authors:*

**Felix Ya. Rudik**, Professor, Chair of Food Technology, Vavilov Saratov State Agrarian University (1 Teatralnaya Sq., Saratov 410012, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: E-8546-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0115>, [k-pappsgau@rambler.ru](mailto:k-pappsgau@rambler.ru)

**Boris P. Zagorodskih**, Professor, Chair of Technical Service and Technology of Structural Materials, Vavilov Saratov State Agrarian University (1 Teatralnaya Sq., Saratov 410012, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: E-8582-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3480-0631>, [zagorodskihbp@yandex.ru](mailto:zagorodskihbp@yandex.ru)

**Natalia L. Morgunova**, Associated Professor, Chair of Food Technology, Vavilov Saratov State Agrarian University (1 Teatralnaya Sq., Saratov 410012, Russia), Ph.D. (Agriculture), ResearcherID: H-1435-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1671-0528>, [morgunovanl@mail.ru](mailto:morgunovanl@mail.ru)

**Yury A. Kodatsky**, Technologist, PitkoFF (14 50 let Oktyabrya St., Norilsk 663300, Russia), Ph.D. (Agriculture), ResearcherID: H-1456-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5165-5723>, [yurykodatsky@yandex.ru](mailto:yurykodatsky@yandex.ru)

*Authors' contribution:*

F. Ya. Rudik – scientific management, formation of the basic concept and the research task, development of the program, writing the draft and drawing the conclusions; B. P. Zagorodskih – development of methods and analysis of research results, revising and editing the text; N. L. Morgunova – literary and patent analysis, processing the theoretical and experimental research, word processing; Yu. A. Kodatsky – carrying out theoretical and experimental studies.

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



### Информация для авторов и читателей

1. Редакция журнала «Вестник Мордовского университета» принимает оригинальные научные статьи на русском и английском языках, соответствующие профилю Журнала и отражающие результаты теоретических и/или экспериментальных исследований авторов (кандидатов и докторов наук, преподавателей и аспирантов) по следующим направлениям:

01.04.00 Физика

05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление

05.20.00 Процессы и машины агроинженерных систем

Журнал приветствует статьи, содержащие материал о значительных достижениях в указанных направлениях. Не допускается направление в редакцию ранее 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».

2. Особое внимание следует уделить качеству перевода. Желательно, чтобы он был выполнен носителем английского языка.

3. Необходимо указать **УДК**.

4. **Заголовок статьи** должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного научного исследования. *Приводится на русском и английском языках.*

5. **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 (Discussion and Conclusions).

*Приводится на русском и английском языках.*

6. **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.*

7. **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.*

8. **Основной текст** статьи излагается на русском или английском языках.

1) Введение (1–2 стр.) – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

2) Обзор литературы (1–2 стр.). Необходимо описать основные (последние по времени) исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы; выделение нерешенных вопросов в пределах общей проблемы, которым посвящена статья.

3) Материалы и методы (1–2 стр.). 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 исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно приведенные данные. **Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.**

5) Обсуждение и заключения. 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.

9. **Список использованных источников** (оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 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.*

10. **Аффилиация авторов.** 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, Researcher ID, ORCID ID, электронная почта, телефон, почтовый адрес для отправки авторского экземпляра. *Приводится на русском и английском языках.*

11. **Заявленный вклад соавторов.** В конце 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 размещенного на сайте лицензионного договора.

В журнале «Вестник Мордовского университета» принято «двустороннее слепое» рецензирование (рецензент и автор не знают имен друг друга).

Рецензент на основании анализа статьи принимает решение о рекомендации ее к публикации (без доработки или с доработкой) или 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, а также путем рассылки номеров наложенным платежом.

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

1. "Mordovia University Bulletin" accepts scholarly articles and debatable academic materials in Russian, English from holders of the following degrees: Ph.D., D.Sc., lecturer, postgraduate student. Articles should conform to the subject of the journal and report on the results of theoretical and/or experimental studies of the authors.

The journal covers the following specialties:

01.04.00 Physics

05.13.00 Computer Science, Computer Engineering and Computer Facilities and Management

05.20.00 Processes and machines of argoengineering systems

Submission of a manuscript implies that the work described has not been published previously. In the case of simultaneous submission of manuscripts to several journals, the published article may later be retracted (i.e. withdrawn from the press). Monitoring of unauthorized citations is provided by services "AntiPlagiat" and "CrossCheck". The journal gives preference to the articles with containing significant advances in considered areas of science.

2. If you translate your text into English, please do so in correct English (either American or British usage is accepted, but not a mixture of both).

3. It is necessary to indicate the **UDC** code.

4. The title of the article should be short and informative (less than 10 words) and should be convey your essential points clearly.

*The title is to be provided in Russian and English.*

5. **The abstract** plays a role of an enhanced title. The abstract should state briefly the purpose of the research, the principal results and major conclusions (200-250 words). It consists of 4 distinct parts:

1) Introduction

2) Materials and Methods

3) Results

4) Discussion and Conclusions

*The abstract is to be provided in Russian and English.*

6. The structure of the paper should contain the **list of keywords** (5–10 words) in *Russian and English*. They should reflect basic statements, results achieved and the terminology of the investigation.

7. **Acknowledgements.** List in this section those individuals who provided help during the research (e.g., providing language help, writing assistance or proof reading the article, etc.). *The acknowledgements are to be provided in Russian and English.*

8. **The main body** of the article should be presented in Russian or in English.

1) Introduction (1–2 pp.) is the challenge of the problem treated, its relevance, its connection with the chief tasks to be solved, its importance for the development of a definite area of science or for practical activity.

2) Literature Review (1–2 pp.). It is necessary to describe the recent principal studies and publications relied upon by the author; modern views on the issue; difficulties in the development of the subject; the allotment of the outstanding issues within the general problem of the article.

3) Materials and Methods (1–2 pp.). This section describes the process of the experiment, using techniques and equipment; provides detailed information about the target of research; indicates the sequence of research and justifies the choice of methods used (observation, survey, test, experiment, laboratory experience, analysis, modeling, learning and generalization, etc).

4) Results. In this section should be presented systematic analytical and statistical material. The research results should be described adequately, so that the reader can trace the process and assess the validity of the conclusions made by the author. This is the main section, which aims to prove a working hypothesis (or hypotheses) by analysis, synthesis and data clarification.

5) Discussion and Conclusions. The conclusion must contain a brief summary of research results. The main points of the work must be repeated. It is better to present any repetition of the material with new formulations. It is necessary to compare the results with the target, indicated at the beginning of the article. In conclusion, the results are to be summarized from a theoretical and practical point of view; the main directions for further research are indicated in this area.

9. **Bibliography.** The bibliography should be drawn up strictly according to the GOST P 7.0.5-2008 and in uniform format.

It would be desirable to refer to papers published in indexed journals with impact factor.

It is advisable to refer to 30–40 sources.

Citations of articles published in "Mordovia University Bulletin" should include author, title, volume number, year, page number, DOI and/or URL.

10. **Institutional affiliation of authors:** first name, last name, the name of the institution, the address of the institution, the place where the project occurred, the position and academic title of the author, Researcher ID, ORCID ID, e-mail, phone number, postal address for delivery of obligatory copy (*in Russian and English*).

11. **Authors' contribution.** At the end of the manuscript, authors should explain in the notes the actual contribution of each collaborator in the work performed. The order of the authors and co-authors of the article must be consistent in itself (*in Russian and English*).

The author agrees to the terms of the enclosed license agreement by submission of the article.

The journal has adopted a "double blind" reviewing (reviewer and author are not familiar with each other).

A reviewer analyses an article and decides recommending it for publication (after revision of without it), additional reviewing or refusing of it. In case of noncompliance of an author with the comment of a reviewer, they can address a motivated statement to editorial council.

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 journal's material is allowed for personal purposes. Free use is permitted for informational, academic, educational and cultural purposes in compliance of paragraphs 1273 and 1274 of chapter 70, part IV of Civil Codex of Russia. Other types of use are possible only after making agreements in writing with copyright 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 by subscription, requests of universities, educational institutions and individuals and pay-on-delivery mailing.

Sergey M. Vdovin – Editor in Chief. Tel.: +7 (8342) 24-48-88.

Petr V. Senin – Deputy Editor in Chief. Tel.: +7 (8342) 23-32-60.

Svetlana V. Gordina – Executive Editor. Tel.: +7 (8342) 48-14-24.



Редактор – *Л. А. Пудовкина*  
Перевод *С. В. Голованова*  
Компьютерная верстка *Е. П. Гординой*  
Информационная поддержка *Р. В. Карасева*

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Подписано в печать 09.06.2018 г. Дата выхода в свет 29.06.2018 г.

Формат  $70 \times 100^{1/16}$ . Усл. печ. л. 12,35.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 250 экз. Заказ № 893. 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 *L. A. Pudovkina*  
Translation *S. V. Golovanov*  
Desktop publishing *E. P. Gordina*  
Informational support *R. V. Karasev*

Distributed in Russian Federation and foreign countries.  
Signed to print 09.06.2018. Date of publishing 29.06.2018.

Sheet size  $70 \times 100 \frac{1}{16}$ . Conventional printed sheets 12,35.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 250 copies. Order no. 893. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia  
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)

