

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202001 ISSN 2658-4123 (Print), 2658-6525 (Online)

Том 30, № 1. 2020

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

16+



Vol. 30, no. 1. 2020

SCIENTIFIC JOURNAL
Founded in January 1990
Issued quarterly

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

DOI: 10.15507/2658-4123

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

Предыдущее название (до 2019 года):
Вестник Мордовского университета

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

The previous name until beginning of 2019:
Mordovia University Bulletin

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

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

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

Комитета по этике научных публикаций,

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и CrossRef

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

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

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

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

© ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», 2020

Научный журнал «Инженерные технологии и системы»

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

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

01.04.01 Приборы и методы экспериментальной физики

01.04.05 Оптика

01.04.13 Электрофизика, электрофизические установки

05.20.01 Технологии и средства механизации сельского хозяйства

05.20.02 Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве

05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве

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

Журнал индексируется и архивируется в базах данных:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

EBSCO

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

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

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



“Engineering Technologies and Systems” Journal

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

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Technologies and Means of Agricultural Mechanization

Electrotechnologies and Electrical Equipment in Agriculture

Technologies and Means of Maintenance in Agriculture

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

The journal is indexed and archived by databases:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Index of Scientific Citations

EBSCO

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

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



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Сенин Петр Васильевич – *заместитель главного редактора*, проректор по научной работе, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-3400-7780, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru (Саранск, Россия)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Салем Абдель-Бадех Мохамед – руководитель Исследовательских лабораторий в области искусственного интеллекта и знаний, профессор факультета компьютерных и информационных наук, университет «Ain Shams», доктор наук в области компьютерных технологий, заслуженный профессор (Каир, Египет)

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

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

Шишелова Тамара Ильинична – профессор кафедры физики, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», доктор технических наук, профессор, Scopus ID: 6507978465 (Иркутск, Россия)

Ямашкин Анатолий Александрович – заведующий кафедрой землеустройства и ландшафтного планирования, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор географических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-9995-8371 (Саранск, Россия)

EDITORIAL BOARD

Sergey M. Vdovin – *Editor in Chief*, Rector of National Research Mordovia State University, Ph.D. (Economics), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-7363-1389, rector@mrsu.ru (Saransk, Russia)

Petr V. Senin – *Deputy Editor in Chief*, Vice-Rector for Science and Research, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-3400-7780, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru (Saransk, Russia)

Svetlana V. Gordina – *Executive Editor*, Member of European Association of Science Editors (EASE), Ph.D. (Pedagogy), ORCID: 0000-0003-2265-418X, vestnik_mrsu@mail.ru (Saransk, Russia)

Surhay Allahverdi – Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Head of Forest Industry Chair, Bartin University, Professor of Ecology and Nature Management Chair, Moscow Pedagogical State University, D.Sc. (Biology), Professor (Bartin, Turkey)

Aleksey G. Bulgakov – Professor of Faculty of Architecture, Dresden University of Technology, D.Sc. (Engineering), Professor (Dresden, Germany)

Ivan I. Chuchayev – Dean of Mathematics and Information Technology Faculty, National Research Mordovia State University, Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor (Saransk, Russia)

Valeriy P. Dimitrov – Head of the Chair of Quality Management, Don State Technical University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-1439-1674 (Rostov-on-Don, Russia)

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

Natalia L. Istomina – Head of Physical Sciences Department, Russian Academy of Sciences, Deputy of Academic Secretary for Scientific and Organizational Work; Professor of Innovation Management Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University); Editor-in-Chief, Photonics Russia; D.Sc. (Phys.-Math.) (Moscow, Russia)

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

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

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

Oleg N. Kukharev – Rector of Penza State Agrarian University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0002-3519-4066 (Penza, Russia)

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

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

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

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

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

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

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

Anatoliy A. Yamashkin – Head of Land Utilization and Landscape Design Chair, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Geography), Professor, ORCID: 0000-0001-9995-8371 (Saransk, Russia)

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

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



СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Шуханов С. Н., Кузьмин А. В., Болоев П. А. Надежность работы машинно-тракторного агрегата.....	8
Игнатов В. И., Герасимов В. С., Мордасова М. С. Утилизация и ремонт техники как элементы циркулярной экономики.....	21

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Плотников С. А., Кантор П. Я., Козлов И. С., Втюрина М. Н. Оценка экологических свойств рапсовых масел для применения в качестве моторного топлива сельскохозяйственного трактора.....	43
Борисова Л. В., Нурутдинова И. Н., Димитров В. П., Тугенгольд А. К. Выбор стратегии в задаче корректировки регулировочных параметров комбайна.....	60
Денисов В. А., Соломашкин А. А. Обеспечение безотказной работы деталей машин с использованием новой системы переменных допусков.....	76
Ковалев А. А., Ковалев Д. А., Григорьев В. С. Энергетическая эффективность предварительной обработки синтетического субстрата метантенка в аппарате вихревого слоя.....	92

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Пахомов В. И., Брагинцев С. В., Бахчевников О. Н., Бенова Е. В., Рухляда А. И. Результаты экспериментальных исследований обмола колосьев в пневматическом молотильном устройстве.....	111
Дорохов А. С., Сибирёв А. В., Аксенов А. Г. Результаты полевых исследований машины для уборки лука-севка, оснащенной прутковым элеватором с асимметричным расположением встряхивателей.....	133

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Шелехов И. Ю., Шишелова Т. И., Смирнов Е. И. Исследование физическими методами нефритов различной окраски.....	149
Жалнин Р. В., Масыгин В. Ф., Пескова Е. Е., Тишкин В. Ф. Моделирование дозвуковых многокомпонентных реагирующих газовых потоков на неструктурированных сетках...	162
Информация для авторов и читателей (на рус. яз.).....	176
Информация для авторов и читателей (на англ. яз.).....	178

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

Shukhanov S. N., Kuzmin A. V., Boloyev P. A. Reliability of Machine-Tractor Aggregates Operation.....	8
Ignatov V. I., Gerasimov V. S., Mordasova M. S. Disposal and Repair of Equipment as Circular Economy Elements.....	21

PROCESSES AND MACHINES

OF AGROENGINEERING SYSTEMS

Plotnikov S. A., Kantor P. Ya., Kozlov I. S., Vtyurina M. N. Estimating Ecological Properties of Rapeseed Oils for Using as Agricultural Tractor Motor Fuel.....	43
Borisova L. V., Nurutdinova I. N., Dimitrov V. P., Tugengold A. K. Selecting a Strategy for Determining the Combine Harvester Parameter Settings.....	60
Denisov V. A., Solomashkin A. A. Ensuring Reliable Operation of Machine Parts with a New System of Variable Tolerances.....	76
Kovalev A. A., Kovalev D. A., Grigoriev V. S. Energy Efficiency of Pretreatment of Digester Synthetic Substrate in a Vortex Layer Apparatus.....	92

TECHNOLOGIES AND MEANS

OF AGRICULTURAL MECHANIZATION

Pakhomov V. I., Braginets S. V., Bakhchevnikov O. N., Benova E. V., Rukhlyada A. I. Experimental Data of the Ear Threshing Process in a Pneumatic Device.....	111
Dorokhov A. S., Sibirev A. V., Aksenov A. G. The Results of Field Tests of an Onion Set Harvesting Machine Equipped with a Shaker Arrangement Asymmetrical Bar Elevator.....	133

PHYSICS AND MATHEMATICS

Shelekhov I. Yu., Shishelova T. I., Smirnov E. I. Physical Methods for Studying Jades of Different Colors.....	149
Zhalnin R. V., Masyagin V. F., Peskova E. E., Tishkin V. F. Modeling the Flow of Multicomponent Reactive Gas on Unstructured Grids.....	162

<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in Russian)</i>	176
---	-----

<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in English)</i>	178
---	-----

МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING

УДК 631.3.072

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202001.008-020



Надежность работы машинно-тракторного агрегата

С. Н. Шуханов^{1*}, А. В. Кузьмин¹, П. А. Болоев²

¹ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А. А. Ежевского» (пос. Молодёжный, Иркутская обл., Россия)

²ФГБОУ ВО «Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова» (г. Улан-Удэ, Россия)

*shuhanov56@mail.ru

Введение. Развитие агропромышленного комплекса невозможно без создания инновационных технических средств и технологий. Ключевую роль при техническом обеспечении сельскохозяйственного производства играют машинно-тракторные агрегаты. Одной из их важнейших эксплуатационных характеристик является надежность, то есть способность выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в необходимых пределах.

Материалы и методы. Объект исследования – процессы надежности работы машинно-тракторных агрегатов. При проведении исследований использовались методы математического моделирования. Общие законы применялись для частных случаев с учетом прогнозирования изменения параметров во времени. Аналитическое описание процессов работы надежности работы машинно-тракторного агрегата опиралось на стационарные случайные и корреляционные функции. Для построения математических моделей надежности использовались обобщенные закономерности с использованием результатов испытаний предшественника (аналога). Оптимальная надежность функционирования машинно-тракторного агрегата определялась на основе математической модели ресурса объекта.

Результаты исследования. Получены аналитические зависимости прогнозирования изменения параметров во времени процессов надежности работы машинно-тракторных агрегатов. Разработаны методы построения математических моделей надежности. Определены условия, влияющие на функционирование объекта исследований.

Обсуждение и заключение. Проведенный анализ и синтез исследований в этой области науки и полученные математические модели показывают, что для достижения высоких результатов необходимо уменьшать дисперсии факторов, влияющих на надежность работы машинно-тракторных агрегатов.

Ключевые слова: надежность работы, машинно-тракторный агрегат, математическое моделирование, оптимизация параметров, трактор

Для цитирования: Шуханов, С. Н. Надежность работы машинно-тракторного агрегата / С. Н. Шуханов, А. В. Кузьмин, П. А. Болоев. – DOI: 10.15507/2658-4123.030.202001.008-020 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 8–20.

© Шуханов С. Н., Кузьмин А. В., Болоев П. А., 2020



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

Reliability of Machine-Tractor Aggregates Operation

S. N. Shukhanov^{a*}, A. V. Kuzmin^a, P. A. Boloyev^b

^a *Irkutsk State Agrarian University named after A. A. Ezhevsky (Molodezhnyy, Irkutsk Oblast, Russia)*

^b *Buryat State University (Ulan-Ude, Russia)*

*shuhanov56@mail.ru

Introduction. The development of the agro-industrial complex is impossible without creating innovative techniques and technologies. The key role in technical support of agricultural production processes is played by machine-tractor aggregates. One of their most important operational characteristics is reliability, i.e. the ability to perform specified functions, keeping over time the values of the operational indicators within the required limits.

Materials and Methods. The object of the study is the reliability of machine-tractor aggregates. The methods of mathematical modeling were used for the study. The general patterns were used for special cases, taking into account the prediction of changes in parameters over time. The analytical description of machine-tractor aggregate operation reliability was based on stationary random and correlation functions. Generalized patterns were used to construct mathematical reliability models using the results of predecessor (analogue) tests. Optimal reliability of the machine-tractor aggregate operation was determined on the basis of the mathematical model of object resource.

Results. There are obtained analytical dependences for the prediction of changes in reliability parameters of machine-tractor aggregate operation over time. The methods for creating reliability mathematical models are developed. Conditions affecting the functioning of the research object are determined.

Discussion and Conclusion. The analysis and synthesis of research in this science field and the obtained mathematical models show that to achieve high results it is necessary to decrease the variance of factors affecting the reliability of machine-tractor aggregates.

Keywords: operation reliability, machine-tractor aggregate, mathematical modeling, optimization of parameters, tractor

For citation: Shukhanov S.N., Kuzmin A.V., Boloyev P.A. Reliability of Machine-Tractor Aggregates Operation. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(1):8-20. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.008-020>

Введение

Функционирование сельскохозяйственного производства на современном этапе развития предполагает как совершенствование существующих технических средств и технологий [1–3], так и создание новых, работающих на инновационных принципах [4–6]. Одним из наиболее актуальных вопросов в этом ряду проблем является успешная реализация программы научно-технического обеспечения агропромышленного комплекса [7–9], в том числе его автотракторного сопровождения [10–12]. Значительный объем работ при механизации сельскохозяйственных процессов выполняется с помощью ма-

шинно-тракторных агрегатов (МТА). Одной из важнейших эксплуатационных характеристик является их надежность, то есть способность выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах. Поэтому повышение эффективности механизированных процессов в сельском хозяйстве является важной научно-практической задачей [13].

Обзор литературы

Вопросами функционирования МТА занимался ряд ученых, например, А. Н. Важенин, Б. А. Арютов, А. В. Пасин, Р. В. Кошелев, А. И. Новожиллов, С. А. Соколов, А. В. Бакла-

нов и Н. Н. Малыгина. Так, в работе А. Н. Важенина для улучшения показателей качества была разработана динамическая модель машинно-тракторного агрегата в различных условиях функционирования производственных процессов [14]. Труд А. В. Пасина и соавторов посвящен обоснованию оптимальной взаимосвязи сезонного расписания и темпов выполнения полевых механизированных работ [15]. Б. А. Арютов и коллеги в ряде исследований обосновали и адаптировали динамическую модель МТА, приспособленную к изменяющимся условиям функционирования технологических процессов в растениеводстве [16; 17]. А. Н. Важенин и коллектив ученых разработали методы повышения эффективности механизированных производственных процессов по условиям их работы в растениеводстве [18–21]. С. Н. Шкрабак в своем исследовании рассматривал надежность технических средств в технологических звеньях поточных линий на заготовке сенажа и силоса, то есть в достаточно узконаправленном аспекте [22]. Решением проблем повышения эффективности эксплуатации тракторов путем обеспечения их работоспособности для различных условий аграрного производства занимался И. Г. Галиев [23]. Однако все выкладки в его исследованиях выполнены применительно для хозяйств Республики Татарстан.

Среди наиболее значимых в этой области стоит отметить исследования А. И. Новожилова. В одной из статей он приводит разработанные им модели производственного процесса, технологического комплекса по внесению удобрений, а также МТА [24]. В коллективном труде «Статистическая оценка надежности машинно-тракторных агрегатов» рассчитан коэффициент готовности МТА при работе в условиях трех агропочвенных районов Нижегородской области [25]. Получен уточненный коэффициент технической готовности при работе МТА.

Несмотря на значимость перечисленных работ, вопрос надежности машинно-тракторного агрегата в полной мере не рассматривался, поэтому возникла необходимость в решении этой задачи.

Материалы и методы

Объект исследования – процессы надежности работы МТА. При проведении исследований использовались методы математического моделирования. Общие законы применялись для частных случаев с учетом прогнозирования изменения параметров во времени. При аналитическом описании процессов работы надежности МТА необходимо было опираться на стационарные случайные и корреляционные функции. Для построения математических моделей надежности применялись обобщенные закономерности с использованием результатов испытаний предшественника (аналога). Оптимальная надежность функционирования машинно-тракторного агрегата определялась на основе математической модели ресурса объекта.

Результаты исследования

Прогнозирование изменения параметров во времени

Задача прогнозирования параметров процесса изменения технического состояния изделий при эксплуатации состоит в определении их числовых характеристик для будущих моментов времени по результатам сокращенных или незавершенных испытаний [26].

При выборе и обосновании математической модели следует исходить, прежде всего, из физической сущности явлений, приводящих к изменению характеров изделий в процессе эксплуатации. Наиболее часто используемой моделью для описания процессов скорости изменения параметров является стационарная случайная функция:

$$z(t) = m_z(t) + z(t), \quad (1)$$

где $m_z(t)$ – математическое ожидание функции $z(t)$; $i(t)$ – центрированный случайный процесс.

Наглядным примером такого процесса является процесс приращений величин цикловых подач топлива насосом высокого давления. Опыт испытаний показывает, что процесс, характеризующий случайную составляющую скорости изменения параметров многих видов изделий, в подавляющем большинстве случаев является стационарным нормально распределенным случайным процессом с экспоненциальной или экспоненциально-колебательной корреляционной функцией.

Стационарными случайными функциями называются такие, вероятностные характеристики которых не изменяются во времени. К ним, прежде всего, относятся математическое ожидание и корреляционная функция.

Условия стационарности случайной функции можно записать в виде:

$$m_z(t) = \text{const};$$

$$K_z(t, t + \tau) = K_z(\tau).$$

При $\tau = 0$ значение корреляционной функции представляет собой дисперсию в сечении случайной функции:

$$K_z(\tau) = D_z(t) = \text{const}.$$

Нормированной корреляционной функцией случайного процесса является функция:

$$k_z(\tau) = K_z(\tau) / [D_z(\tau)].$$

Выражение для нормированной экспоненциальной корреляционной функции стационарного случайного процесса можно записать в виде:

$$k_z(\tau) = e^{-a[\tau]}. \quad (2)$$

Оценка математического ожидания случайного процесса по результатам за-

меров приращений параметров изделий за период испытаний производится по формуле:

$$\hat{M}[\Delta X(t)] = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^1 \Delta x_{ji}, \quad (3)$$

где N – общее число замеров величин Δx_{ji} ; 1 в эксперименте; 1 – число испытываемых изделий; m – число замеров параметров i -го изделия.

Дисперсия случайного процесса находится из соотношения:

$$\hat{D}[\Delta X(t)] = \frac{1}{N-1} \left\{ \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^1 \Delta x_{ji}^2 - \frac{1}{N} \left[\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^1 \Delta x_{ji} \right]^2 \right\}.$$

Оценка значений корреляционной функции случайного процесса производится по формуле:

$$\hat{K}_{\Delta x}(t, t') = \frac{1}{mlm-1} \left\{ \sum_{i=1}^{mlm} \Delta x_i(t) \Delta x_i(t') - \frac{1}{mlm} \left[\sum_{m=1}^{ml} \Delta x_i(t) \sum_{i=1}^{ml} \Delta x_i(t') \right] \right\}. \quad (4)$$

Рассчитанные таким образом значения корреляционной функции образуют матрицу:

$$|K_{ij}| = \begin{vmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & \dots & K_{m1} \\ K_{32} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & \dots & K_{m2} \\ K_{53} & K_{43} & K_{33} & K_{34} & \dots & K_{m3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{m1} & K_{m2} & K_{m3} & K_{m4} & \dots & K_{mm} \end{vmatrix}, \quad (5)$$

где $K_{ij} = K_{\Delta x}(t, t') = M[\Delta x(t)\Delta x(t')]$ – корреляционный момент случайных величин $\Delta x(t)$ и $\Delta x(t')$.

Корреляционная матрица симметрична относительно главной диагонали, поэтому на практике обычно заполняют лишь половину матрицы:

$$|K_{ij}| = \begin{vmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & \dots & K_{m1} \\ & K_{22} & K_{23} & K_{24} & \dots & K_{m2} \\ & & K_{33} & K_{34} & \dots & K_{m3} \\ & & & \dots & \dots & \dots \\ & & & & & K_{mm} \end{vmatrix}.$$

По главной диагонали этой корреляционной матрицы стоят дисперсии случайных величин. В ряде случаев возникает необходимость вычисления нормированной корреляционной матрицы системы m случайных величин.

$$|K_{ij}| = \begin{vmatrix} 1 & K_{12} & K_{13} & K_{14} & \dots & K_{m1} \\ & 1 & K_{23} & K_{24} & \dots & K_{m2} \\ & & 1 & K_{34} & \dots & K_{m3} \\ & & & \dots & \dots & \dots \\ & & & & & K_{mm} \end{vmatrix}, \quad (6)$$

где $k = K_{ij} / (\sigma_i \sigma_j)$ – коэффициент корреляции случайных величин функции:

$$\Delta x(t), \Delta x(t').$$

Для стационарной случайной функции $\Delta x(t)$ матрица записывается в виде:

$$|K_{ij}| = \begin{vmatrix} 1 & K_{\Delta x1} & K_{\Delta x2} & K_{\Delta x3} & \dots & K_{\Delta xm} \\ & 1 & K_{\Delta x1} & K_{\Delta x2} & \dots & K_{\Delta x-1} \\ & & 1 & K_{\Delta x1} & \dots & K_{\Delta x-2} \\ & & & \dots & \dots & \dots \\ & & & & & 1 \end{vmatrix},$$

где $K_{\Delta x1}, K_{\Delta x2}, \dots, K_{\Delta xm}$ – коэффициент корреляции случайных величин функции $\Delta x(t)$ для дискретных:

$$\tau_1 = \Delta t, \tau_2 = 2\Delta t, \tau_3 = 3\Delta t, \tau_m = m\Delta t.$$

Если нормированная корреляционная функция случайного процесса представляет собой экспоненту:

$$K_{\Delta x}(\tau) = e^{-\alpha\tau},$$

то значение α при известных корреляционных функциях находится из соотношения:

$$\alpha = \ln k_{\Delta x}(\tau) / \tau.$$

Пример. При испытании 14 топливных насосов замерены приращения величин цикловых подач топлива, интервалы наработки $\Delta t_1 = t_1 - t_0 = \Delta t_2 = t_2 - t_1 = \dots = 1000$ м/ч отражены в таблице 1 [26].

Таблица 1
Table 1

Приращения величин цикловых подач топлива
Increments in cyclic fuel feeds

Интервал наработки / Operating time interval	Приращения (%) величин цикловых подач топлива Δx_{qy} образцов насосов / Increments (%) of values of cyclic fuel supply Δx_{qy} for pump sample													
Δt , м/ч / Δt , m/h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0–1000	+0,7	–1,8	+0,8	+0,3	+1,2	–0,4	+0,3	–1,9	+2,2	+2,5	+1,4	+1,6	0,0	0,0
1000–2000	–0,7	–1,6	+1,0	+1,6	+0,6	–0,3	+0,5	+0,5	+0,4	+1,9	+1,2	–0,7	+1,2	–0,7

Требуется определить числовые характеристики случайного процесса, исходя из гипотезы его стационарности.

Решение. Оценку математического ожидания находим, подставляя табличные значения величин в формулу (2):

$$m_{\Delta x} = 11,8/28 = 0,4214.$$

Для оценки дисперсии процесса воспользуемся формулой:

$$D_{\Delta x} = 1/(28 - 1)[40,56 - (1/28)11,8^2] = 1,318.$$

Величина среднеквадратического отклонения определяется так:

$$\sigma_{\Delta x} = \sqrt{1,318} = 1,148.$$

Значение корреляционной функции для $\tau = 1000$ м/ч рассчитывается по формуле:

$$K_{\Delta x}(t, t') = (1/14 \cdot 2 - 14 - 1) \times \\ \times [9,9 - (1/14 \cdot 2 - 14) \cdot 6,9 \cdot 4,9] = 0,575.$$

Соответствующее значение нормированной корреляционной функции находим как частное:

$$K_{\Delta x}(\tau) = K_{\Delta x}(t, t') / D_{\Delta x} = 0,575 / 1,318 = 0,436.$$

Величина коэффициента в формуле (5) находится из соотношения (6):

$$a = \ln 0,436/1000 = -0,83 \cdot 10^{-3}.$$

Таким образом, выражение для корреляционной функции рассматриваемого процесса можно записать в виде:

$$K_{\Delta x}(\tau) = 1,318 \cdot e^{-0,83 \cdot 10^{-3} \tau}.$$

Полученные в результате расчета оценки моментных функций процесса приращений параметра для последующих расчетов удобно представить в виде ряда:

$$m_{\Delta x}(t) \quad D_{\Delta x}(t) \quad \sigma_{\Delta x}(t) \quad K_{\Delta x1} \quad K_{\Delta x2} \quad K_{\Delta x3} \quad K_{\Delta x4} \quad K_{\Delta x5} \\ 0,421 \quad 1,318 \quad 1,148 \quad 0,436 \quad 0,190 \quad 0,082 \quad 0,036 \quad 0,016.$$

Совокупность показателей $m_{\Delta x}$, $D_{\Delta x}$, $K_{\Delta x}(\tau)$ процесса с количественной стороны характеризует закономерности изнашивания и старения изделий и создает реальные возможности для прогнозирования моментных функций процессов изменения параметров аппаратуры в процессе эксплуатации.

Прогнозирование моментных функций $m_x(t)$, $D_x(t)$, $K_x(t, t')$ случайного процесса изменений параметра $x(t)$ может быть успешно выполнено на основе ранее полученных оценок этих параметров. Так, для непрерывных процессов прогнозируемые значения моментных функций находятся интегрированием выражений (1) и (2):

$$m_x(t_n) = \int_0^{t_n} m_{\Delta x}(t) dt, \quad (7)$$

$$D_x(t_n) = \int_0^{t_n} \int_0^{t_n} K_{\Delta x}(\tau) dt dt, \quad (8)$$

$$K_x(t_m, t_n) = \int_0^{t_n} \int_0^{t_n} K_{\Delta x}(\tau) dt dt. \quad (9)$$

Для дискретных процессов прогнозируемые значения математического ожидания случайной функции $x(t)$ определяются по формуле:

$$mx(tn) = m_{\Delta x} x(t) tn, \quad (10)$$

где t_n – время, для которого рассчитываются прогнозируемые характеристики процесса $x(t)$.

Дисперсия процесса $x(t)$ для прогнозируемых дискретных t_n определяется по известной корреляционной матрице (9) функции приращений параметра.

Учитывая, что:

$$D_x(t) = D \left[\sum_{i=1}^n \Delta x_i \right]. \quad (11)$$

Применяя теорему о дисперсии суммы случайных величин, получим следующие соотношения:

$$D_x(t) = D_{\Delta x}, \quad (12)$$

$$D_x(t_2) = D_{\Delta x} \Sigma \begin{vmatrix} 1 & k_{\Delta x1} \\ k_{\Delta x1} & 1 \end{vmatrix}, \quad (13)$$

$$D_x(t_3) = D_{\Delta x} \Sigma \begin{vmatrix} 1 & k_{\Delta x1} & k_{\Delta x2} \\ k_{\Delta x1} & 1 & k_{\Delta x1} \\ k_{\Delta x2} & k_{\Delta x1} & 1 \end{vmatrix}. \quad (14)$$

В общем виде формулу для определения дисперсии процесса изменения параметра во времени можно представить в виде:

$$D_x(t_n) = D_{\Delta x} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} c_{kj}. \quad (15)$$

где $D_{\Delta x}$ – дисперсия функции приращений параметра во времени; c_k – элементы нормированной корреляционной матрицы функции приращений.

Аналогичным путем определяются все корреляционные моменты процесса $x(t_n)$. С учетом того, что:

$$x(t_n) = \sum_{i=1}^n \Delta x_i(t), \quad (16)$$

$$K_x(t_m, t_n) = M\{[x(t_m) - m_x(t_m) - m_x(t_n)][x(t_n) - m_x(t_n)]\}. \quad (17)$$

Ниже приведены расчетные формулы при определении первых 15 корреляционных моментов процесса для дискретных $t = 2000, 3000, \dots, 6000$ м/ч [26]:

1. $K_x(t_1, t_2) = D_{\Delta x}(1+k_1)$,
2. $K_x(t_1, t_3) = D_{\Delta x}(1+k_1+k_2)$,
- ...
4. $K_x(t_2, t_3) = D_{\Delta x}(2+3k_1+k_2)$,
5. $K_x(t_1, t_6) = D_{\Delta x}(1+k_1+\dots+k_5)$,
6. $K_x(t_2, t_3) = D_{\Delta x}(2+3k_1+k_2)$,

$$7. K_x(t_2, t_4) = D_{\Delta x}(2+3k_1+2k_2+k_3),$$

...

$$9. K_x(t_2, t_6) = D_{\Delta x}(2+3k_1+2k_2+2k_3+2k_4+k_5),$$

$$10. K_x(t_3, t_4) = D_{\Delta x}(3+5k_1+3k_2+k_3),$$

$$11. K_x(t_3, t_4) = D_{\Delta x}(3+5k_1+4k_2+2k_3+k_4),$$

$$12. K_x(t_3, t_5) = D_{\Delta x}(3+5k_1+4k_2+3k_3+2k_4+k_5),$$

$$13. K_x(t_4, t_5) = D_{\Delta x}(4+7k_1+5k_2+3k_3+k_4),$$

$$14. K_x(t_4, t_6) = D_{\Delta x}(4+7k_1+6k_2+4k_3+2k_4+k_5),$$

$$15. K_x(t_5, t_6) = D_{\Delta x}(5+9k_1+7k_2+5k_3+3k_4+k_5).$$

Методы построения математических моделей надежности

Известно, что скорость изнашивания пропорциональна мощности трения:

$$\gamma = aFv, \quad (18)$$

где a – коэффициент; F – сила трения; v – относительная скорость скольжения трущихся тел.

Для повышения эффективности математической модели надежности при прогнозировании необходимо при их построении привлекать обобщенные физические закономерности, определяющие процесс исчерпания ресурса.

Преимущества построения математических методов надежности состоят в том, что данные, используемые для расчета обобщенных закономерностей, могут быть реально оценены на этапе проектирования, и на их основе можно построить методику расчета надежности с использованием результатов испытаний предшественника (аналога).

Рассмотрим процесс механического изнашивания. Износ, отнесенный к одному циклу, записывается в виде [26]:

$$\gamma_1 = aA_1^{m_1} \text{ при } A_1 A_{10}, \quad (19)$$

где A_1 – работа трения за один цикл; m – показатель степени (определяется экспериментально); A_{10} – граничное значение работы трения за цикл.

Определим коэффициент a . Износ за n циклов:

$$U_n = \gamma n = aA_1^{m_1} n. \quad (20)$$

Введем предельный износ $U_{\text{пр}}$. Тогда мера повреждения:

$$D'_n = U / U_{\text{пр}} = aA^{m_1}n / U_{\text{пр}}. \quad (21)$$

Введем базу испытаний N'_0 и предельную работу трения A_{10} , которые следует определить экспериментально. Тогда при $D_n = 1$:

$$\begin{aligned} a / U_{\text{пр}} &= 1 / N'_0 A_{10}^{m_1} \\ D'_n &= A_{10}^{m_1} n / A_{10}^{m_1} N'_0. \end{aligned} \quad (22)$$

Под $n = N$ следует понимать число циклов, при котором достигается предельное состояние.

Оптимизация надежности

На основе математической модели ресурса объекта

$$t = \varphi(x_1, x_2, \dots) \quad (23)$$

определяем оптимальную надежность, которая обеспечивается минимальным отклонением параметров объекта от желаемого значения.

В качестве функции, характеризующей отклонение возможной надежности от желаемой, введем математическое ожидание квадрата разности показателей:

$$\delta^2 = M[(z_m - z)^2], \quad (24)$$

где z_m – желаемое значение показателя надежности; z – возможное его значение. Преобразуем выражение, введя среднее значение $z_{\text{ср}}$:

$$\delta^2 = M[(z_m - z)^2] = \dots = (z_m - z_{\text{ср}})^2 + D_z. \quad (25)$$

Пусть показатель надежности связан с факторами следующим выражением:

$$z = a_0 + a_1 z_1 + a_2 z_2 + a_3 z_3 + \dots \quad (26)$$

Тогда:

$$z_{\text{ср}} = a_0 + a_1 z_{\text{ср}1} + a_2 z_{\text{ср}2} + \dots, \quad (27)$$

$$D_z = a_1^2 D_{z1} + a_2^2 D_{z2} + \dots, \quad (28)$$

$$\delta^2 = [z_{\text{ср}} - (a_0 + a_1 z_{\text{ср}1} + \dots)]^2 + a_1^2 + D_{z1} + D_{z2} + \dots \quad (29)$$

Как видим, для достижения результатов необходимо уменьшать дисперсии факторов, влияющих на надежность работы машинно-тракторных агрегатов.

Обсуждение и заключение

Путем определения числовых характеристик по результатам испытаний решена задача прогнозирования параметров изменения технического состояния изделий при эксплуатации. При этом использовались стационарные случайные функции. В качестве примера приведены результаты испытания топливных насосов. Предложены методы получения аналитических зависимостей, описывающих собственно надежность. Эффективность математической модели надежности при прогнозировании можно повысить с помощью привлечения при их построении обобщенных физических закономерностей, определяющих процесс исчерпания ресурса. Для оптимизации надежности необходимо уменьшить дисперсии факторов, влияющих на надежность работы МТА.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Shuhanov, S. N.** Interaction Elements of Particles of Grain Lots with Air during the Work of Tape Thrower / S. N. Shuhanov // *Agrarian Scientific Journal*. – 2015. – Vol. 12. – Pp. 58–59.
2. **Samoilenko, D.** Improvement of Torque and Power Characteristics of V-Type Diesel Engine Applying New Design of Variable Geometry Turbocharger (VGT) / D. Samoilenko, A. Marchenko, H. M. Cho. – DOI 10.1007/s12206-017-0950-2 // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2017. – Vol. 31, issue 10. – Pp. 5021–5027. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-017-0950-2#citeas> (дата обращения: 10.02.2020).

3. **Ovchinnikov, A. S.** Energy and Agrotechnical Indicators in the Testing of Machine-Tractor Units with Subsoiler / A. S. Ovchinnikov, A. S. Mezheva, A. E. Novikov [et al.] // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2017. – Vol. 12, issue 24. – Pp. 7150-7160. URL: http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2017/jeas_1217_6597.pdf (дата обращения: 10.02.2020).

4. **Бутенко, А. Ф.** К обоснованию эффективности использования комбинированного ленточно-го метателя зерна / А. Ф. Бутенко, А. В. Асатурян // *Международный технико-экономический журнал*. – 2018. – Вып. 1. – С. 80–86. URL: http://www.tite-journal.com/fileadmin/fail/tite-journal_1_2018/Butenko.pdf (дата обращения: 10.02.2020). – Рез. англ.

5. **Nuralin, B.** Constructive-Regime Parameters of Rotor-Brush Cleaner for Tuberous Foots Dry Cleaning / B. Nuralin, A. Bakushev, M. Janaliev [et al.] // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. – 2018. – Т. 40, № 2. – 113 p.

6. **Piven, V. V.** Determination of the Extent of Fraction in Air Separation of Grain Material / V. V. Piven. – DOI 10.1088/1742-6596/1059/1/012001 // *Journal of Physics Conference Series*. – 2018. – Vol. 1059, issue 1. – P. 012001. URL: https://www.researchgate.net/publication/326495712_Determination_of_the_Extent_of_Fraction_in_Air_Separation_of_Grain_Material (дата обращения: 10.02.2020).

7. **Алтухов, С. В.** Анализ гидродинамических характеристик распылителей форсунок ДВС / С. В. Алтухов, С. Н. Шуханов // *Тракторы и сельхозмашины*. – 2018. – № 3. – С. 3–6. URL: https://mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory_i_selhormashiny_No3_2018.pdf (дата обращения: 10.02.2020). – Рез. англ.

8. **Шуханов, С. Н.** Элементы взаимодействия зубчатых передач механических трансмиссий автотракторной техники / С. Н. Шуханов, А. Ю. Кузькин, В. В. Скutelный [и др.] // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. – 2018. – №1 (69). – С. 107–109. URL: https://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/2018/Izvestia_1_69.pdf (дата обращения: 10.02.2020).

9. **Druzyanova, V. P.** Mathematical Model of Biogas Treatment Process with a Zeolite Filter / V. P. Druzyanova, Y. Zh. Dondokov, O. M. Osmonov [et al.] // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. – 2018. – Vol. 9, issue 9. – Pp. 280–288. URL: https://www.researchgate.net/publication/328272717_Mathematical_model_of_biogas_treatment_process_with_a_zeolite_filter (дата обращения: 10.02.2020).

10. **Болоев, П. А.** Экспериментальный стенд для исследования энергетической установки с биогазовым ДВС / П. А. Болоев, В. П. Друзыанова, Н. В. Петров. – DOI 10.31992/0321-4443-2019-1-3-8 // *Тракторы и сельхозмашины*. – 2019. – № 1. – С. 3–8 URL: https://mospolytech.ru/storage/files/doi/file_7fc8ef54a8154c28341bf9a47443a5ce_1562003337.pdf (дата обращения: 10.02.2020). – Рез. англ.

11. **Друзыанова, В. П.** Методика разработки и обоснования параметров фильтра по очистке биогаза для использования в двигателях внутреннего сгорания / В. П. Друзыанова, О. П. Семенова, Г. А. Соловьев // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. – 2019. – № 1. – С. 11–14. URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2869 (дата обращения: 10.02.2020). – Рез. англ.

12. **Шуханов, С. Н.** Методика проведения тепловых испытаний агрегатов трансмиссии автотракторной техники агропромышленного комплекса / С. Н. Шуханов, В. В. Скutelный, О. Л. Маломыжев. – DOI 10.34286/1995-4646-2019-66-3-77-83 // *Международный технико-экономический журнал*. – 2019. – № 3. – С. 77–83. URL: <http://www.tite-journal.com/content/2019/vypusk-no3/#c12067> (дата обращения: 10.02.2020). – Рез. англ.

13. **Шуханов, С. Н.** Моделирование рабочих процессов машинно-тракторных агрегатов агропромышленного комплекса / С. Н. Шуханов, А. В. Кузьмин, П. А. Болоев // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. – 2019. – № 1 (75). – С. 74–75. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-rabochih-protsessov-mashinno-traktornyh-agregatov-agropromyshlennogo-kompleksa> (дата обращения: 10.02.2020).

14. **Важенин, А. Н.** Динамическая модель МТА с учетом условий его функционирования / А. Н. Важенин, Б. А. Арютов, А. В. Пасин // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. – 2007. – № 9. – С. 21–23.

15. **Пасин, А. В.** Сезонное расписание и темпы выполнения полевых механизированных работ / А. В. Пасин, Б. А. Арютов, Р. В. Кошелев [и др.] // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2007. – № 11. – С. 2–4.
16. **Арютов, Б. А.** Повышение эффективности производственных процессов в растениеводстве / Б. А. Арютов, А. И. Новожилов, А. В. Пасин [и др.] // Техника в сельском хозяйстве. – 2007. – № 6. – С. 50–51.
17. **Арютов, Б. А.** Процедуры многокритериальной оптимизации производственных процессов в растениеводстве / Б. А. Арютов, А. В. Пасин, А. В. Бакланов // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2007. – № 3 (1). – С. 61–65.
18. **Важенин, А. Н.** Оптимальная сезонная продолжительность выполнения полевых механизированных работ / А. Н. Важенин, А. В. Пасин, Б. А. Арютов [и др.] // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2007. – № 3 (2). – С. 67–69.
19. **Важенин, А. Н.** Регулирование движения МТА / А. Н. Важенин, Б. А. Арютов, А. В. Пасин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2008. – № 2. – С. 28–29.
20. **Важенин, А. Н.** Упорядочение производственных процессов в растениеводстве / А. Н. Важенин, Б. А. Арютов, А. В. Пасин [и др.] // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2008. – № 6. – С. 9–11.
21. **Важенин, А. Н.** Оптимизация технической оснащенности производственных процессов в растениеводстве с учетом условий их функционирования / А. Н. Важенин, Б. А. Арютов, А. В. Пасин [и др.] // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2008. – № 3 (2). – С. 72–76. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-tehnicheskoy-osnashchennosti-proizvodstvennyh-protsessov-v-rastenievodstve-s-uchetom-usloviy-ih-funktsionirovaniya> (дата обращения: 10.02.2020).
22. **Шкрабак, С. Н.** Оптимизация работы МТА в технологических звеньях поточных линий / С. Н. Шкрабак, А. В. Бечин // Сельский механизатор. – 2007. – № 5. – С. 40–41. URL: http://sel-mech.msk.ru/507.htm#_ТЕХНИКЕ_ДОЛГИЙ_ВЕК (дата обращения: 10.02.2020).
23. **Галиев, И. Г.** Управление работоспособностью техники с учетом условий аграрного производства / И. Г. Галиев, И. Р. Исхаков, А. Р. Шамсутдинов [и др.] // Вестник Казанского ГАУ. – 2010. – № 3 (17). – С. 86–88. URL: http://www.vestnik-kazgau.com/images/archive/2010/3/23_galiev.pdf (дата обращения: 10.02.2020). – Рез. англ.
24. **Новожилов, А. И.** К обоснованию интенсивных методов повышения эффективности использования механизированных технологических комплексов / А. И. Новожилов // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2011. – № 7. – С. 52–55. URL: http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/135/2011_7 (дата обращения: 10.02.2020). – Рез. англ.
25. **Новожилов, А. И.** Статистическая оценка надежности машинно-тракторных агрегатов / А. И. Новожилов, Б. А. Арютов, А. А. Тихонов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2011. – № 2 (14). – С. 108–110. URL: [https://vestnik.ulsau.ru/upload/iblock/923/vestnik-2011-2\(14\).pdf](https://vestnik.ulsau.ru/upload/iblock/923/vestnik-2011-2(14).pdf) (дата обращения: 10.02.2020). – Рез. англ.
26. **Николаенко, А. В.** Обоснование величин оптимальных эксплуатационных допусков на регулировочные параметры топливной дизелей сельскохозяйственных тракторов / А. В. Николаенко, В. Н. Хватов, В. Н. Сергеев // Двигателестроение. – 1983. – № 7. – С. 45–48.

Поступила 17.09.2019; принята к публикации 20.12.2019; опубликована онлайн 31.03.2020

Об авторах:

Шуханов Станислав Николаевич, профессор кафедры технического обеспечения АПК инженерного факультета ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А. А. Ежевского» (664038, Россия, Иркутская область, пос. Молодёжный), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2134-6871>, shuhanov56@mail.ru

Кузьмин Александр Викторович, профессор кафедры технического сервиса и общинженерных дисциплин инженерного факультета ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А. А. Ежевского» (664038, Россия, Иркутская область, пос. Молодёжный), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5669-2232>, kuzmin_burgsha@mail.ru

Болоев Петр Антонович, профессор кафедры машиноведения ФГБОУ ВО «Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова» (670000, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, д. 24а), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3940-1296>

Заявленный вклад соавторов:

С. Н. Шуханов – формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов; А. В. Кузьмин – анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов; П. А. Болоев – доработка текста, корректировка выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Shuhanov S.N. Interaction Elements of Particles of Grain Lots with Air during the Work of Tape Thrower. *Agrarian Scientific Journal*. 2015; 12:58-59. (In Eng.)
2. Samoilenko D., Marchenko A., Cho H.M. Improvement of Torque and Power Characteristics of V-Type Diesel Engine Applying New Design of Variable Geometry Turbocharger (VGT). *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2017; 31(10):5021-5027. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0950-2>
3. Ovchinnikov A.S., Mezhevova A.S., Novikov A.E., et al. Energy and Agrotechnical Indicators in the Testing of Machine-Tractor Units with Subsoiler. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017; 12(24):7150-7160. Available at: http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2017/jeas_1217_6597.pdf (accessed 10.02.2020). (In Eng.)
4. Butenko A.F., Asaturyan A.V. To the Basis of an Use Efficiency of a Combined Belt Grain Thrower. *Mezhdunarodny tekhniko-ekonomicheskij zhurnal* = The International Technical-Economic Journal. 2018; (1):80-86. Available at: http://www.tite-journal.com/fileadmin/fail/tite-journal_1_2018/Butenko.pdf (accessed 10.02.2020). (In Russ.)
5. Nuralin B., Bakushev A., Janaliev M., et al. Constructive-Regime Parameters of Rotor-Brush Cleaner for Tuberous Foots Dry Cleaning. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2018; 40(2). 113 p. (In Eng.)
6. Piven V.V. Determination of the Extent of Fraction in Air Separation of Grain Material. *Journal of Physics Conference Series*. 2018; 1059(1):012001. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1059/1/012001>
7. Altukhov S.V., Shukhanov S.N. Analysis of Hydrodynamic Characteristics of Sprays of Nozzles of ICE. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2018; (3):3-6. Available at: https://mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory_i_selkhoz_mashiny_No3_2018.pdf (accessed 10.02.2020). (In Russ.)

8. Shukhanov S.N., Kuzkin A.Yu., Skutelnik V.V., et al. Elements of Interaction of Gear Drives of Mechanical Transmissions of Auto-Tractor Machinery. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Orenburg State Agrarian University Bulletin. 2018; (1):107-109. Available at: https://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/2018/Izvestia_1_69.pdf (accessed 10.02.2020). (In Russ.)
9. Druzyanova V.P., Dondokov Y.Zh., Osmonov O.M., et al. Mathematical Model of Biogas Treatment Process with a Zeolite Filter. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018; 9(9):280-288. Available at: https://www.researchgate.net/publication/328272717_Mathematical_model_of_biogas_treatment_process_with_a_zeolite_filter (accessed 10.02.2020). (In Eng.)
10. Boloyev P.A., Druzyanova V.P., Petrov N.V. Experimental Test Bench for the Study of a Power Plant with a Biogas Internal Combustion Engine. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2019; (1):3-8. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2019-1-3-8>
11. Druzyanova V.P., Semyonova O.P., Solovyov G.A. Procedures for Development and Justification of Filter Parameters for Biogas Cleaning To Use It in Internal Combustion Engines. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* = Repair. Restoration. Modernization. 2019; (1):11-14. Available at: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2869 (accessed 10.02.2020). (In Russ.)
12. Shukhanov S.N., Skutelnik V.V., Malomyzhev O.L. Technique of Carrying Out Heat Tests of Units of Transmission of the Autotractor Machinery of Agro-Industrial Complex. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskyy zhurnal* = International Technical-Economic Journal. 2019; (3):77-83. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2019-66-3-77-83>
13. Shukhanov S.N., Kuzmin A.V., Boloev P.A. Modeling of the Working Processes of the Machine-Tractor Units of Agro-Industrial Complex. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Orenburg State Agrarian University Bulletin. 2019; (1):74-75. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-rabochih-protsessov-mashinno-traktornyh-agregatov-agropromyshlennogo-kompleksa> (accessed 10.02.2020). (In Russ.)
14. Vazhenin A.N., Aryutov B.A., Pasin A.V. Dynamical Model MTA (Machine-and-Tractor Unit) with Account for Conditions of Its Functioning. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2007; (9):21-23. (In Russ.)
15. Pasin A.V., Aryutov B.A., Koshelev R.V., et al. Seasonal Schedule and Pace of Execution of Field Mechanized Works. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva* = Mechanization and Electrification of Agriculture. 2007; (11):2-4. (In Russ.)
16. Aryutov B.A., Novozhilov A.I., Pasin A.V., et al. Increasing Effectiveness of Production Processes in the Plant Industry. *Tekhnika v sel'skom khozyaystve* = Machinery in Agriculture. 2007; (6):50-51. (In Russ.)
17. Aryutov B.A., Pasin A.V., Baklanov A.V. Procedures for Multi-Criteria Optimization of Production Processes in Crop Production. *Vestnik Federalnogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkin"* = Bulletin of the Goryachkin Moscow State Agroengineering University. 2007; (3):61-65. (In Russ.)
18. Vazhenin A.N., Pasin A.V., Aryutov B.A. Optimal Seasonal Duration of Field Mechanized Works. *Vestnik Federalnogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkin"* = Bulletin of the Goryachkin Moscow State Agroengineering University. 2007; (3):67-69. (In Russ.)
19. Vazhenin A.N., Aryutov B.A., Pasin A.V. Traffic Control for Machine and Tractor Units. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2008; (2):28-29. (In Russ.)
20. Vazhenin A.N., Aryutov B.A., Pasin A.V., et al. Streamlining of Production Processes in Crop Production. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva* = Mechanisation and Electrification of Agriculture. 2008; (6):9-11. (In Russ.)
21. Vazhenin A.N., Aryutov B.A., Pasin A.V., et al. Optimization of Technical Equipment for Plant Production in View of Operation Requirements. *Vestnik Federalnogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkin"* = Bulletin of the Goryachkin Moscow State Agroengineering University.

ty. 2008; (3):72-76. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-tehnicheskoy-osnaschenosti-proizvodstvennyh-protseessov-v-rastenievodstve-s-uchetom-usloviy-ih-funktsionirovaniya> (accessed 10.02.2020). (In Russ.)

22. Shkrabak S.N., Bechin A.V. Optimization of the Machine and Tractor Unit Operation in the Process Links of the Flow Lines. *Selskiy Mekhanizator* = Rural Mechanic. 2007; (5):40-41. Available at: http://selmech.msk.ru/507.htm#_ТЕХНИКЕ_–_ДОЛГИЙ_БЕК (accessed 10.02.2020). (In Russ.)

23. Galiev I.G., Iskhakov I.R., Shamsutdinov A.R., et al. Management Operability of Equipment from the Conditions of Agricultural Production. *Vestnik Kazanskogo GAU* = Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2010; (3):86-88. Available at: http://www.vestnik-kazgau.com/images/archive/2010/3/23_galiev.pdf (accessed 10.02.2020). (In Russ.)

24. Novozhilov A.I. To the Rationale of Intensive Methods of Efficiency Increasing of Use of Mechanized Technological Complexes. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova* = Vavilov Saratov State Agrarian University Bulletin. 2011; (7):52-55. Available at: http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/135/2011_7 (accessed 10.02.2020). (In Russ.)

25. Novozhilov A.I., Aryutov B.A., Tikhonov A.A. Statistical Evaluation of Reliability Machine Tractor Units. *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskohozyaystvennoy akademii* = Ulyanovsk State Agricultural Academy Bulletin. 2011; (2):108-110. Available at: [https://vestnik.ulsau.ru/upload/iblock/923/vestnik-2011-2\(14\).pdf](https://vestnik.ulsau.ru/upload/iblock/923/vestnik-2011-2(14).pdf) (accessed 10.02.2020). (In Russ.)

26. Nikolaenko A.V., Khvatov V.N., Sergeev V.N. Justification of Values of Optimal Operational Tolerances for Adjustment Parameters of Fuel Diesel Engines of Agricultural Tractors. *Dvigatelistroenie* = Engine Building. 1983; (7):45-48. (In Russ.)

Received 17.09.2019; revised 20.12.2019; published online 31.03.2020

About the authors:

Stanislav N. Shukhanov, Professor of Engineering Chair, Irkutsk State Agrarian University named after A. A. Ezhevsky (Village Molodezhnyy, Irkutsk Oblast 664038, Russia), D.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2134-6871>, shuhanov56@mail.ru

Aleksandr V. Kuzmin, Professor of Technical Service and General Engineering Chair, Irkutsk State Agrarian University named after A. A. Ezhevsky (Village Molodezhnyy, Irkutsk Oblast 664038, Russia), D.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5669-2232>, kuzmin_burgsha@mail.ru

Petr A. Boloyev, Professor of Engineering Chair, Buryat State University (24a Smolin St., Ulan-Ude 670000, Russia), D.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3940-1296>

Contribution of the authors:

S. N. Shukhanov – formulating the basic concept, goals and objectives of the study, making calculations, writing the draft, drawing the conclusions; A. V. Kuzmin – analysis of the research results, revision of the text, correction of conclusions; P. A. Boloyev – revision of the text, correction of conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.



Утилизация и ремонт техники как элементы циркулярной экономики

В. И. Игнатов*, В. С. Герасимов, М. С. Мордасова

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

**ignatoww@inbox.ru*

Введение. В статье приведены результаты исследований, целью которых являлось определение критерия для дальнейшего использования сельскохозяйственной техники, достигшей предельного состояния: проводить капитальный ремонт или утилизировать ее, максимально сохранив материальные ресурсы, как этого требуют принципы циркулярной экономики.

Материалы и методы. Для решения поставленных задач были проведены исследования технического состояния и стоимости компонентов, входящих в состав техники, поступающей на ремонтные предприятия отрасли в 12 регионах России. Были определены зависимости изменения структуры деталей при различных сроках использования сельхозмашин.

Результаты исследования. Полученные результаты показали, что цена ремонта машины зависит от уровня потери годности ее деталей, которые были разделены на три группы: годные без ремонта, годные после восстановления и утильные, которые не подлежат восстановлению. Были построены зависимости цены капитального ремонта машины и дохода от реализации компонентов утилизируемой машины при различной потере годности, которые позволили определить границы дальнейшего использования машины, достигшей предельного состояния.

Обсуждение и заключение. Было установлено, что потеря годности практически всех машин, поступающих сейчас на ремонтные предприятия, находится за границами предельного состояния, и они должны утилизироваться. Предельное состояние машины наступает при потере годности в интервале 0,45...0,5. В этом интервале владелец машины может выбрать любой из двух вариантов дальнейшего ее использования: отремонтировать или утилизировать. При потере годности меньше 0,45 более предпочтительным является капитальный ремонт. При потере годности больше 0,5 потребуется утилизация, при которой будет обеспечиваться максимально возможное ресурсосбережение.

Ключевые слова: сельскохозяйственная техника, цифровая экономика, предельное состояние машины, утилизация, капитальный ремонт

Для цитирования: Игнатов, В. И. Утилизация и ремонт техники как элементы циркулярной экономики / В. И. Игнатов, В. С. Герасимов, М. С. Мордасова. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202001.021-042 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 21–42.



Disposal and Repair of Equipment as Circular Economy Elements

V. I. Ignatov*, V. S. Gerasimov, M. S. Mordasova

Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russia)

*ignatoww@inbox.ru

Introduction. The article deals with the criteria for the further use of agricultural machinery that has reached the serviceability limit state: to carry out major repairs or dispose of it, as much as possible saving material resources, as required by the principles of the circular economy.

Materials and Methods. The technical conditions and costs of the equipment components at the agricultural repair workshops in 12 Russian regions were studied. The study was based on the changes in the structure of parts with different use periods.

Results. The results of the study showed that the cost of repairing the equipment components depends on serviceability status of the components, which are divided into three groups: the components fit for use without repair, components fit for use after repair, and irreparable components to be disposed of.

Discussion and Conclusion. It was found that nearly all machines, taken to the workshops for repairs, are outside the serviceability limit state and should be disposed of. The serviceability limit state of the machine occurs at loss of serviceability with a coefficient of less than 0.5. In this rate, the machine owner can choose whether it will be repaired or disposed of. When loss of serviceability less than 0.45, an overhaul is preferable. When loss of serviceability more 0.5, disposal is required. These measures will provide the greatest possible resource efficiency.

Keywords: agricultural machinery, digital economy, serviceability limit state, disposal, overhaul

For citation: Ignatov V.I., Gerasimov V.S., Mordasova M.S. Disposal and Repair of Equipment as Circular Economy Elements. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(1):21-42. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.021-042>

Введение

Бурное развитие за последние годы техники и технологий, направленных на поиск оптимальных устойчивых решений по использованию материальных ресурсов как вновь добываемых, так и используемых повторно, явилось одной из причин четвертой промышленной революции.

В широком смысле Индустрия 4.0 характеризует положительный тренд развития автоматизации и обмена данными, который включает в себя облачные технологии, большие данные (big data), краудсорсинг, биотехнологии, «интернет вещей» (Internet of Things – IoT), 3D-печать, системную интеграцию, аддитивные технологии, автономных роботов, моделирование и симуляцию, виртуальную и допол-

ненную реальность, кибербезопасность и прочие технологии.

До начала текущего века в большинстве стран преобладала линейная экономика, базирующаяся на принципе «take, make, waste» (брать, производить, выбрасывать). В настоящее время эти страны, используя компоненты Индустрии 4.0, переходят от линейной экономики к новой концепции «циркулярной экономики», в основе которой лежит цепочка «take, make, reuse» (бери, делай, используй повторно), принцип «ноль отходов» (zero waste), обеспечивающий максимально возможное сохранение материальных ресурсов, которые имеются в отходах.

Россия катастрофически отстает от стран-лидеров в решении этой проблемы на десятилетия. Только в 2018 г.

распоряжением Правительства России утверждена «Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года», в которой продекларирована необходимость создания в России промышленности по утилизации отходов. Но, как видно из текста этой Стратегии, она направлена на решение узкой задачи социального характера: создание системы утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО)¹.

В Стратегии игнорируется опыт стран-лидеров, которые разработали и эффективно применяют более 20 лет системы утилизации выведенной из эксплуатации техники (ВЭТ), степень утилизации которой приближается к 95 %. А если учесть, что основные материальные ресурсы стран (в том числе России) расходуются на производство техники различных видов, то рентабельность утилизационных предприятий этих стран (кроме России) находится на уровне машиностроения. Специфика России состоит в том, что в ней отсутствует система утилизации, а следовательно, и ее инфраструктура. Это, в свою очередь, снижает интерес научного сообщества страны к решению целого ряда специфических задач, касающихся этой проблемы.

В некоторых отраслях промышленности России парк машин состоит в основном из устаревшей импортной техники. Так, например, в агропромышленном комплексе (АПК) России более половины технологических машин и оборудования используются от 10 до 17 лет, то есть 2-3 нормативных срока службы, поэтому ежегодно выводится из эксплуатации до 10 % парка сельхозтехники, утилизацией которой

занимаются «черные утилизаторы», работающие вне законодательного поля.

В масштабах страны ежегодные материальные потери и экологический урон от несвоевременной и неквалифицированно проводимой утилизации оцениваются экспертами в сотни миллиардов рублей. Собственники техники не имеют мотиваций для проведения утилизации и не заинтересованы в услугах утилизационных предприятий, чиновники высшего уровня не проявляют государственного интереса к этой непростой проблеме, несмотря на имеющуюся законодательную и экономическую базу.

К проблеме утилизации ВЭТ примыкает задача поиска предельного состояния техники (определение оптимального срока службы), при котором ее целесообразно не ремонтировать, а утилизировать. Несмотря на то, что задача определения предельного состояния техники решается не первое столетие, принципы циркулярной экономики изменили отношение к технике как к объекту утилизации. Но для реализации этих принципов эта техника должна своевременно выводиться из эксплуатации и утилизироваться с учетом в первую очередь выгодных условий для собственников техники.

В ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» проводятся работы по формированию системы утилизации этой техники. При этом решается широкий спектр задач, в том числе задача определения предельного состояния техники, при котором она должна утилизироваться. Исследования ведутся в соответствии с современными мировыми тенденциями развития мирового сообщества и зарубежного опыта в этом направлении.

¹ Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года: утв. постановлением Правительства Рос. Федерации от 25 января 2018 г. № 84-п. URL: <http://static.government.ru/media/files/y8PMkQGZLfbY7jhn6QMruaKoferAowzJ.pdf> (дата обращения: 15.01.2020).

Обзор литературы

Мировое сообщество в течение XX века увеличило производство продукции машиностроения более чем в 100 раз, США – более чем в 300 раз, Япония – более чем в 500 раз [1]. В последние годы объемы производства продукции машиностроения продолжают увеличиваться. Пропорционально увеличению объемов продукции увеличиваются и объемы добычи полезных ископаемых.

С. П. Капица не был одинок в своих убеждениях по поводу того, что в истории человечества уже имелись локальные случаи исчерпания ресурсов и дефицита территории, которые заканчивались в лучшем случае мирным переселением, но чаще – войнами [2]. Американский экономист К. Боулдинг рассматривал экономику будущего как экологическую систему подобную одиноко летящему во Вселенной космическому кораблю, имеющему ограниченные возможности пополнения запасов и использования отработанных веществ [3].

Многие технически развитые страны практически использовали имеющиеся у них природные ресурсы, и проблема дефицита сырья для производства продукции становится все острее. Но, несмотря на этот дефицит, технически развитые страны увеличивают объемы производства продукции и в первую очередь – продукции машиностроения.

В 2011 году Клаус Шваб, президент Всемирного экономического форума в Давосе, сформулировал Концепцию четвертой промышленной революции². Промышленная революция 4.0 порождает

Индустрию 4.0, которая открывает перед мировой экономикой широчайшие возможности роста, но и одновременно ставит абсолютно новые вызовы. Одним из следствий и структурных проблем в мировой экономике становится обострение конкуренции на геоэкономическом уровне. Странам с развивающейся экономикой необходимо прилагать колоссальные усилия, чтобы не оставаться на обочине нового динамичного мира, а встроиться в глобальные цепочки поставок³.

Россия обладает самой большой территорией и занимает первое место по имеющимся на этой территории природным ископаемым. Но она существенно отстает в реализации компонентов Индустрии 4.0 и должна учитывать, что находится в окружении стран, израсходовавших или обделенных природными ископаемыми. Для своего устойчивого развития Россия должна интенсивно использовать все компоненты Индустрии 4.0.

Тем не менее эксперты считают, что в этих сложных условиях, которые объективно затрагивают абсолютно все страны мира, Россия вынуждена выдерживать дополнительную нагрузку в виде экономических санкций, введенных рядом стран. Но при этом делаются оптимистические прогнозы, и, несмотря на все сложности, с которыми столкнулась наша экономика, у России есть все необходимое для того, чтобы занять достойное положение в системе новых реалий⁴. Для этого Россия должна в ближайшее время перенять богатый опыт и перейти на принципы, сформированные в циркулярной экономике.

² **K. Schwab.** The Fourth Industrial Revolution // Foreign Affairs. 12.12.2015. URL: https://www.foreignaffairs.com/articles/2015-12-12/fourth-industrial-revolution?fa_anthology=1116078 (дата обращения: 15.01.2020).

³ **Кобяков А.** Вызовы XXI века: как меняет мир четвертая промышленная революция // РБК. 12.02.2016. URL: <https://www.rbc.ru/opinions/economics/12/02/2016/56bd9a4a9a79474ca8d33733> (дата обращения: 15.01.2020).

⁴ **Россия 4.0: четвертая промышленная революция как стимул глобальной конкурентоспособности** // ТАСС. 20.05.2019. URL: <https://tass.ru/pmef-2017/articles/4277607> (дата обращения: 15.01.2020).

Под циркулярной экономикой специалистами понимается экономика, которой свойственен восстановительный и замкнутый характер использования невосполнимых ресурсов⁵ [4].

Ресурсосбережение при эксплуатации техники осуществляется по двум направлениям за счет:

- максимально возможного использования остаточного ресурса машины, выработавшей часть ресурса путем повторного применения работоспособных деталей (агрегатов) и восстановления ресурса деталей (агрегатов), частично израсходованного при эксплуатации с последующим применением по назначению. Это позволяет максимально использовать возможности техники, сохраняя ее материальную часть для продолжения свойственных ей работ;

- проведения работ, обеспечивающих ресурсосбережение при своевременной утилизации компонентов машины, которые нет возможности использовать по прямому назначению или восстановить, а именно – работ по подготовке этих компонентов к переработке во вторичное сырье и использованию этого сырья для производства новой продукции.

Для этого применяются эффективные технологии проведения работ по двум обозначенным направлениям, обеспечивающим приближение к параметру «ноль отходов».

I направление осуществляется на базе следующих основных подходов:

- 1) техническое обслуживание (maintain), которое является эффективным способом сохранения или восстановления продукции до необходимого уровня надежности и производительности с целью продления ее жизненного цикла [5];

- 2) повторное использование продукции (reuse of goods) для первоначальных или новых целей в исходном

виде либо с некоторыми изменениями и улучшениями [6];

- 3) восстановительный ремонт продукции и/или ее компонентов, (refurbishment, remanufacturing), а именно:

- восстановительный (капитальный) ремонт продукции для приведения ее в рабочее состояние путем замены или ремонта узлов, которые вышли из строя;

- восстановление агрегатов (агрегатный ремонт) или отдельных деталей. При этом подлежащие восстановлению агрегаты (детали) изымаются из бывшей в эксплуатации машины, проходят чистку, восстановление и позиционируются как «новые», но имеет меньшую стоимость [7].

Высокое качество выполнения работ **I направления** и получение на выходе из ремонтного предприятия «новой» продукции обеспечивается проведением на высоком уровне работ по дефектации и восстановлению технических характеристик деталей и агрегатов. Примером такого положения может служить программа Cat Reman компании Caterpillar, в рамках которой восстанавливаются детали с помощью дифференцированной технологии и используются экологически сбалансированные методы для полного восстановления деталей, агрегатов и сложных материалоемких машин до состояния новых. Источники позволяют познакомиться с аналогичными технологиями проведения такого вида ремонта на предприятиях John Deere⁶.

Каждый из перечисленных подходов **I направления** применяется на практике во многих странах, в том числе в России, для продления жизненного цикла электропоездов, автомобилей, самоходной и бытовой техники, электроники, станков и другой техники.

⁵ Towards the Circular Economy // Ellen MacArthur Foundation. 30.01.2012. URL: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/news/towards-the-circular-economy> (дата обращения: 15.01.2020).

⁶ Завод John Deere в Мангейме [Электронный ресурс]. URL: <https://youtu.be/mhvyoArqIOI> (дата обращения: 15.01.2020); Завод John Deere по производству лесозаготовительной техники [Электронный ресурс]. URL: <https://youtu.be/H0p9JJ0rHpo> (дата обращения: 15.01.2020).

Все большее распространение в последние годы получают работы по техническому обслуживанию и текущему ремонту (подход 1). Активно развивается ремануфактуринг (remanufacturing) – вид восстановительного ремонта (подход 3), в рамках которого происходит восстановление продукции до первоначального уровня с возможностью его превышения при использовании в новом производственном цикле комбинаций повторно использованных, восстановленных и новых частей [8; 9].

Ремануфактуринг наиболее развит в автомобильной промышленности, на долю которой приходится около 70 % всей отрасли восстановления. В сегменте задействовано более 4 000 компаний, разбросанных по всему миру, к числу которых относятся такие лидеры отрасли, как Nissan, Mercedes-Benz, Mitsubishi Motors, Rolls-Royce, ZF Friedrichshafen AG, Volvo Cars, Renault, имеющие в своем составе соответствующие подразделения [4]. В данном сегменте создаются и ассоциации, например, в США активно работает Ассоциация по восстановлению автомобильных запасных частей (APRA), которая объединяет свыше 1 000 предприятий, размещенных в различных странах, а также около 20 тысяч специалистов.

Активное развитие ремануфактуринга автотранспортных средств связано с существенными выгодами, которые получают производители и общество в целом в результате восстановления автомобильных узлов и деталей. Так, по оценкам специалистов, экономия ресурсов может достигать до 98 %, энергии – до 68–83 %, сокращение выбросов углекислого газа достигает 73–87 % [10]. Одновременно с этим, по данным Automotive Parts Remanufacturers Association (APRA), снижение стоимо-

сти готового изделия может составить 30–40 %⁷. Если говорить о США, которые располагают одним из самых развитых сегментов ремануфактуринга, то до 90 % автозапчастей в этой стране являются восстановленными (двигатели, стартеры, коробки передач, тормоза и др.), в то время как в ЕС только 10 %. Что касается занятости, то в США численность персонала, занятого в секторе ремануфактуринга, достигла 180 000 человек, а в странах ЕС – более 32 000⁸.

Организационную базу проведения утилизации и рециклинга техники составляют системы ее рециклинга, созданные более 20 лет назад. Инициатором создания таких систем выступила Германия, сформировавшая законодательную базу и принявшая в 1996 г. Федеральный закон «Об экономическом рециклинге Германии». Данный закон сегодня многими экспертами признан образцом в вопросах организации авторециклинга. В настоящее время уже около 60 стран создали аналогичные системы рециклинга не только автомобилей, но и тяжелой самоходной, в том числе сельскохозяйственной, техники.

При работе с материалоемкой техникой, используемой по назначению, а также достигшей предельного состояния, образуются значительные объемы отходов, содержащие полезные компоненты, рабочие характеристики которых невозможно или нецелесообразно восстанавливать, используя подходы **I направления**. В этом случае реализуется **II направление** – проведение утилизационных работ, направленных на раздельный сбор полезных компонентов с целью их последующей переработки во вторичное сырье на перерабатывающих предприятиях.

Чаше всего зарубежные предприятия проводят одновременно работы

⁷ Automotive Parts Remanufacturers Association (APRA) [Электронный ресурс]. URL: <http://apra.org/> (дата обращения: 15.01.2020).

⁸ Automotive Parts Remanufacturing Market: Global Industry Analysis and Forecast 2016–2024 // SRC Logistics, Inc. 15.05.2016. URL: <https://www.srclogisticsinc.com/news/2016/6/15/automotive-parts-remanufacturing-market-global-industry-analysis-and-forecast-2016-2024> (дата обращения: 15.01.2020).

по I и II направлениям. Весь этот комплекс работ, включая захоронение образующихся при проведении этих работ неиспользуемых отходов, обеспечивается принцип «от колыбели до колыбели» [8].

Утилизация материалоемких технологических машин (колесных и самоходных и т.п.) существенно отличается от утилизации автомобилей по различным характеристикам: масса, габариты и сложность этих видов техники; малые серии производства; требования к надежности, которая влияет на выполнение запланированных работ качественно и в срок (пахота, уборка урожая и пр.); высокая стоимость, по сравнению со стоимостью производимой ими продукции; интенсивная эксплуатация машины при высоких нагрузках на рабочие органы и т.д.

Материалы и методы

Любая техника в процессе использования теряет свои эксплуатационные свойства по мере изнашивания ее конструктивных и неконструктивных элементов⁹. В теории машин в основном рассматривается трехуровневая иерархия систем, которая определяет момент наступления предельного состояния этих элементов. Но в некоторых работах рассматривается IV уровень с позиции целесообразности использования отремонтированных или новых машин в парке, которому поставлен конкретный объем работ¹⁰.

Отсчет в иерархии систем начинается с детали¹¹. В общем случае деталь можно рассматривать как систему, образованную поверхностями и другими элементами. Параметры этих эле-

ментов могут принимать предельные значения и определять таким образом содержание процедур контроля, а также восстановления или утилизации.

Под предельным состоянием изделия понимается такое его состояние, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно, либо восстановление его исправного или работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно¹².

В общем случае при наличии статистической информации, связывающей величину износа детали U с ее наработкой (выработанным ресурсом T), и информации о предельном износе $U_{пр}$ ¹³.

Если рассматривать партию аналогичных деталей, то величина накопленных повреждений (например, износа U) у каждой детали в момент контроля $t = T_k$ (рис. 1) будет различная, и параметр состояния объекта U_k будет иметь различную величину в пределах $U_{k\min} < U_k < U_{k\max}$.

Соответственно, момент достижения предельного состояния $T_{пр}$, то есть момент наступления отказа, для каждой конкретной детали будет находиться в интервале $T_{пр\min} < T_{пр} < T_{пр\max}$. Вероятностный характер наступления предельного состояния в значительной мере затрудняет определение его значения для конкретной детали в конкретной машине.

Следующей ступенью иерархии является агрегат (сборочная единица), например, двигатель трактора. Основной задачей исследования выходных характеристик системы II уровня является описание процесса исчерпания ее годности как технико-экономической

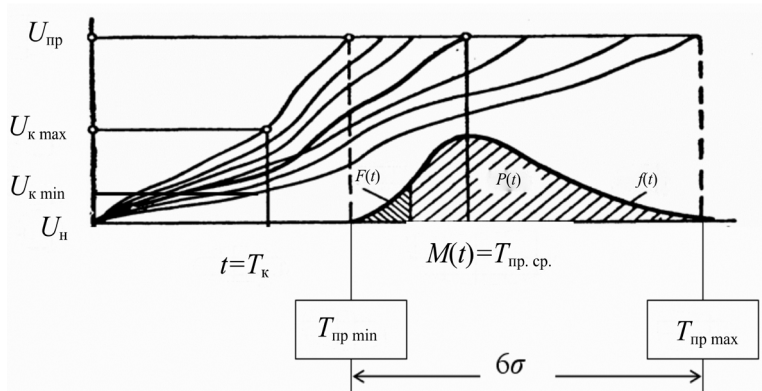
⁹ Селиванов А. И. Основы теории старения машин. М.: «Машиностроение», 1970. 408 с.; Проников А. С. Надежность машин. М.: «Машиностроение», 1978. 592 с.

¹⁰ Еремеев Н. С. Повышение эффективности технической эксплуатации лесозаготовительных машин на основе управления их остаточным ресурсом: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2005. 387 с.

¹¹ Современные тенденции формирования системы рециклинга техники: научная монография / В. И. Игнатов [и др.]. М.: «Перо», 2019. 557 с.

¹² ГОСТ 30479-97. Обеспечение износостойкости изделий. Методы установления предельного износа, обеспечивающего требуемый уровень безопасности. Общие требования.

¹³ Проников А. С. Надежность машин.



Р и с. 1. Схема формирования закона распределения времени T безотказной работы детали
F i g. 1. Scheme of developing the law of time T distribution for trouble-free operation of the part

категории до соответствующего предельного состояния, при наступлении которого выбирается альтернативный вариант: капитальный ремонт агрегата или его утилизация.

Систему III уровня (машину в сборе) предлагается рассматривать как совокупность ее агрегатов.

Современная техника представляет собой сложные технические системы, определение предельного состояния которых всегда вызывает определенные трудности. Одной из первых работ, посвященных определению предельного состояния технических объектов, была работа Дж. Тейлора [11]. Под оптимальным сроком службы (оптимальной долговечностью) в этой работе понимался такой срок службы машины, при котором достигается минимум затрат $\Phi(n)$ на ее приобретение, эксплуатацию и ремонт единицы продукции (наработки). Задача сводится к минимизации следующего выражения:

$$\Phi(n) = \frac{S_H(1+p)^n - S_{\text{ост}} + \sum_{i=1}^n (1+p)^{n-i} Q_i}{\sum_{i=1}^n (1+p)^{n-i} T_i} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $\Phi(n)$ – приведенные удельные затраты; n – год использования; S_H – цена новой машины; $S_{\text{ост}}$ – остаточная стоимость машины к концу n -го года (выручка от реализации подержанной машины); Q_i – эксплуатационные затраты, включающие устранение неисправностей и ремонт в i -й год; T_i – наработка машины в i -й год эксплуатации; p – процент на капитал.

Если в формуле (1) предположить, что $p = 0$, то есть не учитывать влияние разновременности затрат, то она превратится в простое и широко распространенное соотношение (2):

$$\Phi = \frac{S_H - S_{\text{ост}} + \sum_{i=1}^n Q_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \rightarrow \min. \quad (2)$$

Именно в таком виде принципиальная схема этой модели была применена многими авторами.

Последователями Дж. Тейлора выполнено большое количество работ для решения проблемы определения предельного состояния систем различного уровня. Эту проблем решали Г. Хотеллинг [12], Р. Л. Шаффер [13], Р. М. Пе-

тухов¹⁴, А. И. Селиванов¹⁵, А. С. Проников¹⁶, Н. С. Еремеев¹⁷. Широко известны работы И. В. Крагельского, Б. И. Костецкого, И. М. Хрущева, Г. Я. Ямпольского, Ю. А. Конкина, В. И. Черноиванова и многих других.

А. И. Селиванов предложил рассматривать состояние технического объекта (детали, агрегата, машины) как его «годность» G , связав его (объекта) технические и экономические характеристики¹⁸.

Годность G_i любого i -го элемента системы I уровня:

$$G_i = \gamma_i \cdot r_i, \quad (3)$$

где r_i – остаточный ресурс i -го элемента в момент контроля, нормированный в долях его исходного ресурса τ_i ; n – число i -х элементов в рассматриваемой машине, ресурс которых оценивается в момент контроля; γ_i – коэффициент, характеризующий весомость i -го элемента в машине.

Коэффициент γ_i в первом приближении можно оценивать отношением стоимости i -го элемента C_i к стоимости (цене) новой машины в целом C_m , то есть:

$$\gamma_i = \frac{C_i}{\sum_{i=1}^n C_i} = \frac{C_i}{C_m}, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n \gamma_i = 1. \quad (5)$$

Годность сборочной единицы (запас годности):

$$G_{3\Sigma} = \sum_{i=1}^n G_{3i} = \sum_{i=1}^n (\gamma_i \cdot r_i). \quad (6)$$

Величину $G_{3\Sigma}$, противоположную запасу годности, можно рассматривать как характеристику изношенности, которая определяет уровень потери годности (износа) рассматриваемого объекта. При этом:

$$G_{3\Sigma} + G_{n\Sigma} = 1. \quad (7)$$

Систему III уровня (машину в сборе) предлагается рассматривать как совокупность ее агрегатов. Современная техника представляет из себя сложные технические системы, определение предельного состояния которых всегда вызывает трудности. Но для анализа этой системы также можно использовать вышеописанную методику.

Сложность определения годности машины (агрегата) состоит в том, что она состоит из деталей трех категорий: I – быстроизнашиваемых деталей со сроком службы $T_{1пр}$ и могут заменяться несколько раз; II – деталей (агрегатов), имеющих различные наработки на отказ со сроком службы $T_{2пр} \gg T_{1пр}$; III – базовой детали (агрегата), которая определяет срок службы $T_{3пр} \gg T_{2пр}$ этого агрегата (машины). Схема потери годности условной сборочной единицы, состоящей из деталей различных категорий показана на рисунке 2¹⁹. Номер детали на ри-

¹⁴ Петухов Р. М. Методика экономической оценки износа и сроков службы машин. М.: Экономика, 1965. 167 с.; Игнатов В. И., Макуев В. А., Сиротов А. В. Техническая эксплуатация и технология ремонта машин и оборудования лесного комплекса: учебник. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2006. 489 с.

¹⁵ Селиванов А. И. Основы теории старения машин.

¹⁶ Проников А. С. Надежность машин.

¹⁷ Еремеев Н.С. Повышение эффективности технической эксплуатации...

¹⁸ Селиванов А. И. Основы теории старения машин.

¹⁹ Петухов Р. М. Методика экономической оценки износа и сроков службы машин; Игнатов В. И., Макуев В. А., Сиротов А. В. Техническая эксплуатация и технология ремонта машин и оборудования лесного комплекса: учебник.

сунке соответствует указанной выше категории.

Детали со сроком службы T_{1np} могут заменяться несколько раз, при этом в момент t^{1*} годность детали 2-й категории достаточно низкая и через промежуток времени ΔT_{12} также откажет. Если деталь 1 заменить в этот момент, то придется в момент t^{2*} снова проводить ремонтные работы.

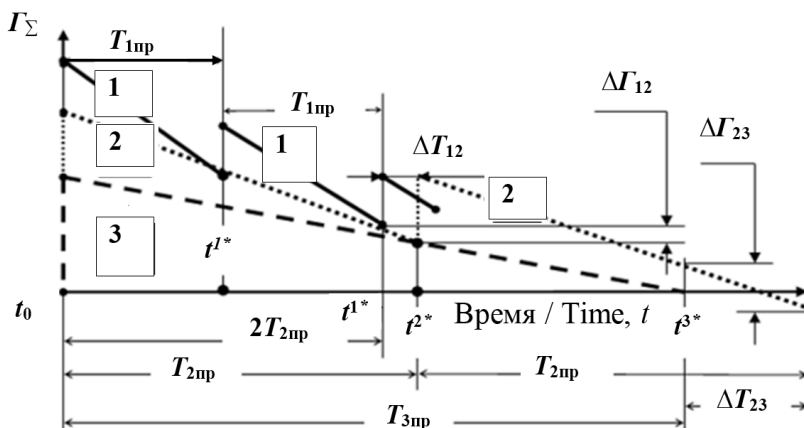
Для правильного выбора альтернативного варианта (заменить только деталь 1 или детали 1 и 2) необходимо определить годность (износ) детали.

Здесь следует отметить, что на рисунке 2 показаны детали с усредненными сроками службы и фиксированным моментом полной потери годности. Если учесть вероятностный характер сроков службы деталей (рис. 1), то нормативные сроки их службы редко совпадают с фактическими. Большинство результатов теоретических работ по определению сроков службы конкретных деталей, агрегатов (машины в целом) используются в основном для определения потребности в запасных частях на весь период использования машины.

Единственным способом получить наиболее полную и достоверную информацию о состоянии деталей, определяющих годность агрегатов и машины в целом, является их дефектация, результаты которой однозначно определяют годность деталей, а следовательно, агрегатов и машины в целом. Затраты времени и средств на проведение этих работ, особенно при проведении капитального ремонта, окупаются повышением качества восстановления агрегатов и машины в целом. Такие работы в обязательном порядке проводятся на зарубежных предприятиях, осуществляющих техническое сопровождение техники, в том числе капитальный ремонт. Это позволяет уточнить остаточную стоимость машины, цену капитального ремонта и определить целесообразность его проведения.

Получение информации такого рода позволяет разработать модель ценообразования при ремонте машины. Авторы данной работы, используя подход к определению технического состояния А. И. Селиванова, сформировали методику определения критерия, позволяющего обоснованно выбрать

Годность / Suitability



Р и с. 2. Схема влияния разнопрочности деталей различных категорий на состояние сборочной единицы в конкретный момент времени

Fig. 2. Diagram of the influence of different strength of parts of different categories on the state of the assembly unit at a particular time

альтернативный вариант использования машины, достигшей граничного состояния: капитальный ремонт или утилизация.

Для решения этой задачи была использована информация о наступлении предельного состояния сельхозтехники, при котором проводился ее капитальный ремонт на ремонтных заводах. На основании этой информации в свое время были разработаны отраслевые нормативы общего износа полнокомплектных машин в зависимости от сроков их эксплуатации (табл. 1). Остаточная стоимость машины рассчитывалась в зависимости от износа машины. Поэтому эти параметры в первом приближении можно графически представить на рисунке 3а.

Как видно из рисунка, характер изменения остаточной стоимости рассматриваемых машин практически одинаков с разницей в годах ее использования. А поскольку величина износа характеризует потерю годности, то эти зависимости можно представить по-другому (рис. 3б).

Авторами также были проведены исследования остаточной стоимости подержанных машин на вторичном рынке с различной наработкой в АПК России²¹ [14]. Было выявлено, что характер изменения остаточной стоимости по нормативам и рыночным ценам существенно различается. Эти различия будут учтены ниже при формировании модели целесообразности утилизации.

Была также разработана модель ценообразования материалоемкой техники с использованием положений теории старения А. И. Селиванова [15].

При ее разработке учитывалось, что в процессе использования машины, по мере увеличения потери ее годности $\Gamma_{n\Sigma i}$ в различные i -е моменты контроля цена ремонта $U_{pm i} = f(\Gamma_{n\Sigma i})$ увеличивается.

В общем случае цена необезличенного ремонта машины U_{pm} включает в себя следующие статьи затрат (рис. 4):

$$U_{pm i} = C_{\text{пост}} + C_{\text{пер } i} = C_{\text{пост}} + (C_{\text{вд } i} + C_{\text{нд } i} - C_{\text{yi}}), \quad (8)$$

Т а б л и ц а 1

Table 1

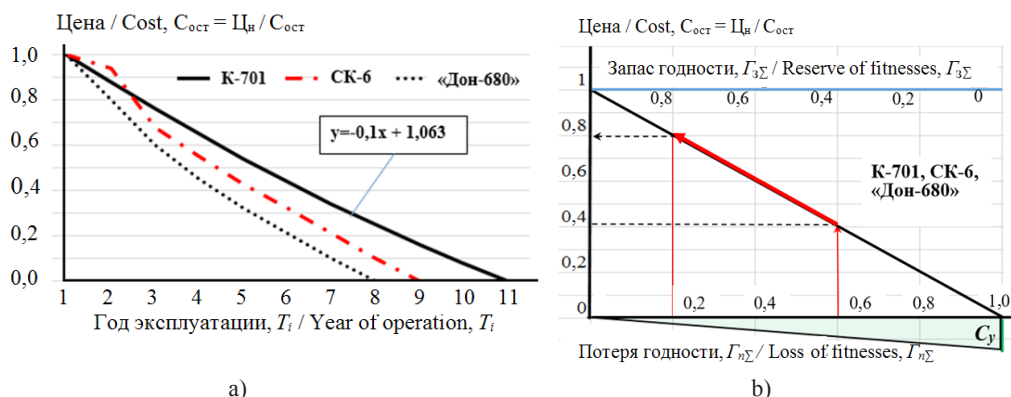
Нормативные оценки износа машин по срокам эксплуатации

Normative estimates of machine wear by service life²⁰

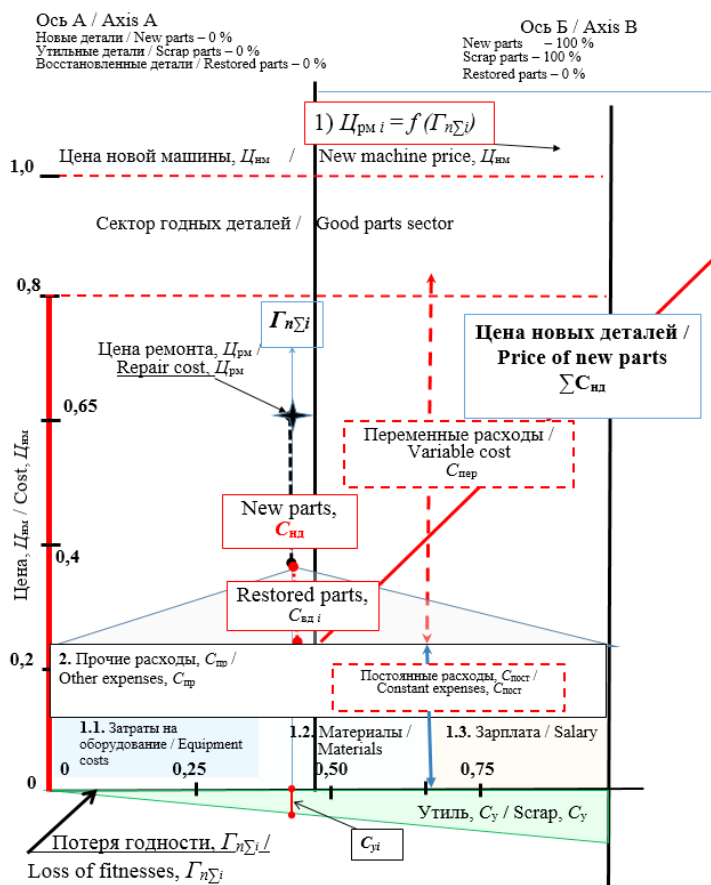
Марки машин / Machin brands	Величина износа по годам эксплуатации машин / Amount of wear on the years of operation of machines									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тракторы / Tractors										
К-700, К-701 / K 700, K 701	0,12	0,24	0,35	0,46	0,56	0,66	0,75	0,84	0,92	1,00
Зерноуборочные комбайны / Grain harvesters										
СК-5, СК-6 / SK 5, SK 6	0,16	0,32	0,45	0,57	0,68	0,79	0,90	1,00	x	x
Кормоуборочные комбайны / Forage harvesters										
«Дон-680» / Don 680	0,20	0,40	0,55	0,68	0,79	0,90	1,00	x	x	x

²⁰ Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве: учебное пособие. 2-е изд. / под ред. В. И. Черноиванова. Москва – Челябинск: Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации, машинно-тракторного парка Россельхозакадемии, ЧГАУ, 2003. 992 с.

²¹ Создание вторичного рынка сельскохозяйственной техники / В. И. Черноиванов [и др.]. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2011. 80 с.



Р и с. 3. Модели изменения остаточной стоимости машин в зависимости: а) от сроков эксплуатации T_i ; б) от уровня потери годности $\Gamma_{n\Sigma}$
 F i g. 3. Models of changes in the residual value of machines depending on: а) the service life T_i ; б) the level of loss of usability $\Gamma_{n\Sigma}$



Р и с. 4. Модель формирования цены ремонта машины
 F i g. 4. Model of the prices for repairing machines

где $C_{\text{пост}}$ – условно постоянные затраты; $C_{\text{пер } i}$ – переменные затраты, которые требуются для ремонта машины, имеющей уровень потери годности $\Gamma_{n\Sigma i}$; $C_{\text{вд } i}$ – стоимость восстановленных деталей; $C_{\text{нд } i}$ – стоимость новых деталей; $C_{y i}$ – стоимость утильных деталей при том же уровне $\Gamma_{n\Sigma i}$.

На осях абсцисс показана цена новой машины в относительных единицах, то есть $U_{\text{нм}} = 1$. На оси ординат – уровень потери ее годности $\Gamma_{n\Sigma i}$. Все виды затрат, связанные с ремонтом изношенной машины «привязываются» к цене новой машины и откладываются на этой же оси как относительная величина $U_{\text{рм}} / U_{\text{нм}}$. Во всех промежуточных состояниях цена ремонта машины зависит от уровня потери годности $U_{\text{рм } i} = f(\Gamma_{n\Sigma i})$. На рисунке 6 имеются две гипотетические оси. Ось А определяет состояние новой машины, при котором $\Gamma_{n\Sigma i} = 0$, а цена ремонта $U_{\text{рм min}} = C_{\text{пост}}$, а ось Б – состояние, при котором цена соответствует (3) при $\Gamma_{n\Sigma i} = 1$. Более подробно методика построения модели ценообразования при ремонте изложена в других работах²² [15].

Проводя ремонт, собственники машины используют для достижения различных целей два основных варианта дальнейшего использования машины:

- вернуть машину в парк (после качественного ремонта, в процессе которого ее технико-экономические параметры приблизятся к параметрам новой машины) для продолжения ее эксплуатации и получения дохода на собственном производстве;

- продать машину после ремонта и получить доход от ее продажи, превышающий цену ремонта.

В общем случае основным критерием определения границы целесообразности проведения ремонта здесь является величина прибыли $\Delta\Pi(T)$ за расчетный период T , которую может по-

лучить владелец от использования машины до ремонта $\Pi_{\text{до}}(T)$ и после него $\Pi_{\text{после}}(T)$, которая должна быть больше цены ремонта $U_{\text{р}}$:

$$\Delta\Pi(T) = \Pi_{\text{после}}(T) - \Pi_{\text{до}}(T) > U_{\text{р}}. \quad (9)$$

Реализацию этого критерия в виде функции времени можно определить из выражения:

$$\Pi(T) = D(T) - Z(T) - Y(T) \rightarrow \Pi_{\text{max}}, \quad (10)$$

где $D(T)$, $Z(T)$ – соответственно доходы и затраты от производственной деятельности за расчетный период; $Y(T)$ – величина ущерба, вызванная простоем техники.

Определение дохода с использованием (5) будет зависеть от наличия и достоверности статической информации по всем компонентам этого выражения. Доход в общем случае зависит от производительности машины $Q_i(T)$, цены единицы продукции C_j и наработки конкретной машины T_i .

$$D(T) = \sum Q_i(T) \cdot C_j \cdot T_i \cdot K_{i\text{м}}, \quad (11)$$

где $K_{i\text{м}}$ – коэффициент использования потенциала машины.

Ущерб можно оценить экономически, поскольку его величина пропорциональна времени простоя $t_{\text{пр}}$ оборудования и потерям в единицу времени y_i :

$$Y(T) = \sum y_i(T) \cdot t_{\text{пр}}, \quad (12)$$

где y_i – величина ущерба в единицу времени.

Учитывая состояние статистических данных, имеющихся у владельца машины, точность прогнозирования параметров, входящих в выражения (4) и (5), чрезвычайно низкая и не отражает реальных значений рассматриваемого критерия.

²² Современные тенденции формирования системы рециклинга техники...

При этом следует помнить, что по отраслевым нормативам капитальный ремонт (в силу того, что при его проведении не все детали заменяются на новые) должен обеспечить не менее 80 % начального ресурса, то есть снизить потерю годности машины, например, с величины 0,6 до 0,2 (линия 1 на рис. 5а).

В доперестроечный период государство выделяло потребителям техники субсидии на проведение капитального ремонта – около 50 % от стоимости новой машины. В капитальный ремонт сдавали технику с потерей годности не менее 50 %. По этой причине, с учетом того, что значительная часть деталей, которые можно было восстановить, заменялись новыми, стоимость проведения технологических операций (разборка-сборка, моечно-очистные, дефектовочные и прочие работы) составляла около 20–25 %, цена ремонта существенно превышала 50 %. Ремонтные предприятия стремились экономить, снижая затраты на различные технологические операции ремонта, от чего страдало качество ремонта. В значительной мере по этой причине после перехода на рыночную экономику большинство заводов обанкротилось. Тем не менее потеря годности ремонтируемой машины не превышала $G_{n\Sigma 0,4} \dots G_{n\Sigma 0,5}^{23}$.

Иная ситуация складывается при реализации второго варианта – продажи машины на вторичном рынке. Естественно, что приобретать машину, техническое состояние которой приближается к предельному, нет смысла. Поэтому на вторичный рынок попадают в основ-

ном машины с незначительной потерей годности. Но при этом остаточная стоимость существенно «падает» даже при незначительном снижении годности (рис. 5б). В некоторых случаях продавцы подержанной машины проводят так называемый «предпродажный ремонт», однако уровень восстановления годности машины невелик, поскольку полномасштабный капитальный ремонт продавцам невыгоден, ибо при этом не выполняется условие (4).

Поэтому, приобретая на вторичном рынке относительно дешевую машину, ее новый собственник обязательно столкнется в будущем с необходимостью выбора варианта дальнейшего использования машины при достижении предельного состояния: ремонтировать ее или утилизировать.

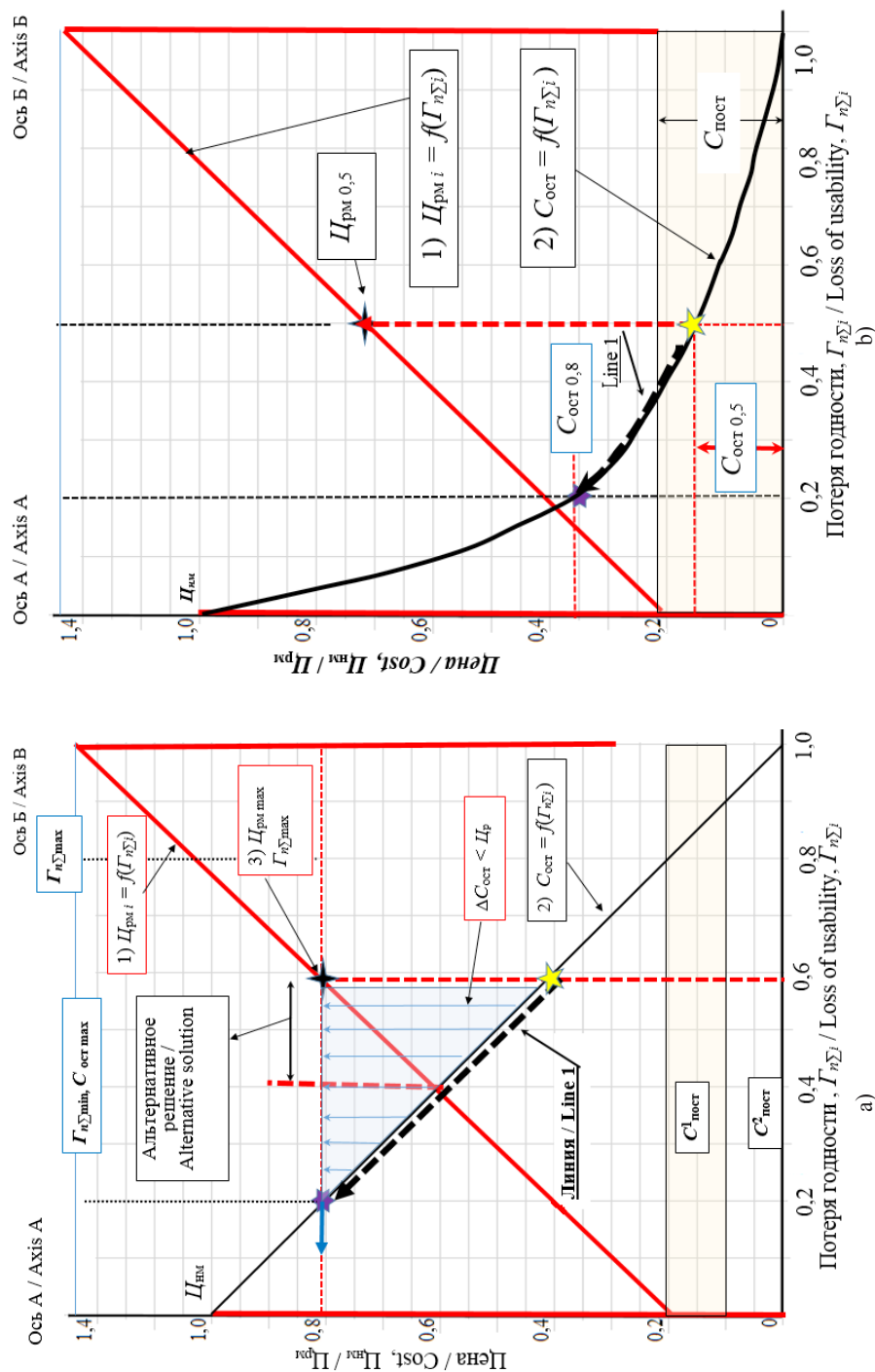
Сотрудниками ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» в процессе научно-исследовательских работ, проводимых в последние 6 лет в 12 различных регионах России (Краснодарском крае, Пензенской, Курганской, Тверской и других областях), были получены данные о структуре деталей машин, утилизируемых на ремонтных предприятиях при разных сроках их использования от начала эксплуатации до момента утилизации (рис. 6)²⁴. Полученные результаты были обработаны с использованием математической статистики.

Результаты исследования

В процессе исследования парка сельхозмашин были определены техническое состояние и стоимость всех

²³ Конкин Ю. А. Экономика ремонта сельскохозяйственной техники: учебник. 4-е изд. М.: Агропромиздат, 1990. 366 с.

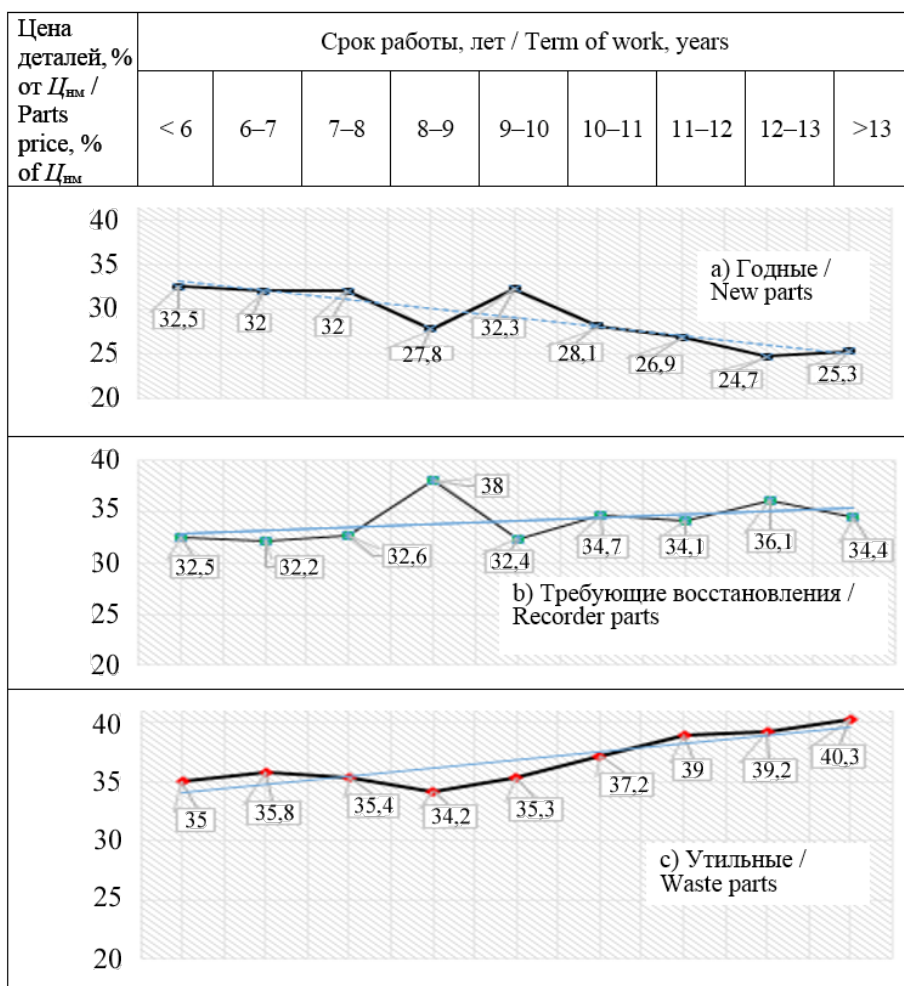
²⁴ Разработать ресурсосберегающие экологоориентированные технологии и нормативно-техническую документацию по утилизации сельскохозяйственной техники / В. С. Герасимов [и др.]. Отчет о НИР, рег. № НИР 114123040052. М.: ГОСНИТИ, 2013. 135 с.; «Актуализация Стратегии развития сельскохозяйственного машиностроения России на период до 2020 года» по разделу подпрограммы: «Обоснование размеров утилизационного сбора для отдельных видов и категорий сельскохозяйственных машин (тракторы сельскохозяйственные, комбайны зерноуборочные, комбайны кормоуборочные, опрыскиватели, машины для уборки корнеплодов, машины для внесения минеральных и органических удобрений)» / В. С. Герасимов [и др.]. Отчет о НИР, договор от 18.09.2014 г. М.: ГОСНИТИ, 2014. 123 с.; Игнатов В. И. Методология и технологические решения для проведения рециклинга машин и агрегатов в АПК: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2018. 560 с.



Р и с. 5. Модель целесообразности проведения капитального ремонта машины при различных вариантах ее последующего использования:

а) для использования по назначению; б) при продаже на вторичном рынке

Fig. 5. Model of the feasibility of overhaul of the machine with different options for its subsequent use: a) for use as intended; b) for sale on the secondary market



Р и с. 6. Усредненная структура деталей утилизированной сельскохозяйственной техники в процентах от стоимости машин при различных сроках их службы, лет

F i g. 6. Averaged structure of parts of disposed agricultural machinery in percent of the cost of machines at different periods of their service, years

категорий деталей, входящих в состав этого вида техники: годные без ремонта $C_{\text{г}}$; детали, пригодные для восстановления $C_{\text{в}}$; подлежащие восстановлению (утильные) $C_{\text{у}}$. Отклонения результатов наблюдений этих величин от среднего значения составляли от 5 до 15 %, что объясняется различными условиями утилизации, техническим оснащением предприятий и пр.

На рисунке 6 представлена информация о структуре деталей утилизи-

рованной сельскохозяйственной техники в процентах от стоимости машин при различных сроках их службы. Как видно из полученных результатов исследований, тренды изменения всех категорий деталей близки к линейному закону: тренд остаточной стоимости годных без ремонта деталей нисходящий, два других – восходящие.

Аналогичные исследования проводились и ранее. В таблице 2 приведена информация о техническом состоянии

машин, полученная в 1980–1990 гг. прошлого столетия советским и российским экономистом академиком РАН Ю. А. Конкиным, специалистом по износу, амортизации технических средств производства и оптимальным срокам службы машин²⁵.

Исследовались подвергавшиеся капитальному ремонту сельхозмашины и списанные машины, которые утилизировались. При исследованиях техники определялась структура и стоимость

тех же трех категорий деталей. Практически аналогичные данные о структуре и стоимости деталей того же порядка приведены и в других работах²⁶. Стабильность полученных результатов говорит о том, что капитальному ремонту подвергались машины, потери годности которых находилось в пределах $\Gamma_{n\Sigma 0,4} \dots \Gamma_{n\Sigma 0,5}$.

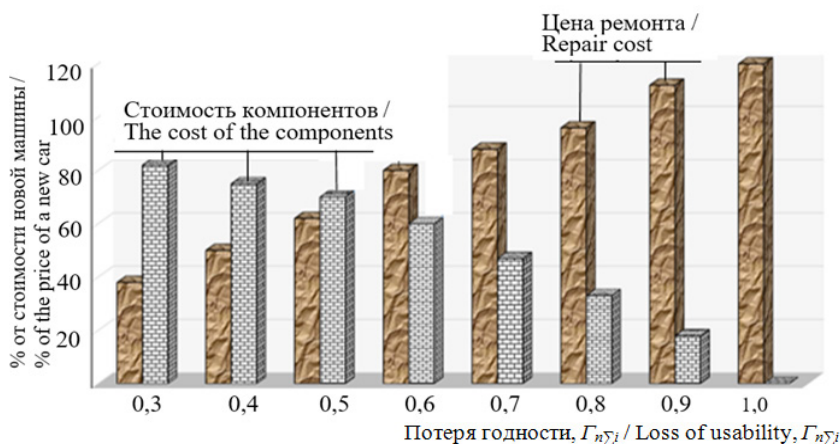
На рисунке 7 показана зависимость цены капитального ремонта $\Pi_{\text{рм}}$ и дохода от продаж компонентов утилизируе-

Таблица 2

Table 2

Структура годности деталей и узлов сельскохозяйственных тракторов на ремонтных заводах Министерства сельского хозяйства СССР
Suitability structure of parts and components of agricultural tractors at repair plants Ministry of agriculture of the USSR

Степень годности деталей / Suitability of parts	Детали по оптовым ценам, % / Details at wholesale prices, %		
	пригодные / suitable	восстановленные / restored	утильные / recycling
Поступившие в 1-й капитальный ремонт / Received in the 1 st overhaul	43,0	41,2	15,8
Поступившие во 2-й капитальный ремонт / Received in the 2 nd overhaul	37,6	48,0	14,4
Утилизируемые / Recyclable	36,7	43,0	20,3



Р и с. 7. Зависимость цены капитального ремонта машины и дохода от продаж компонентов утилизируемой машины при различной потере ее годности

F i g. 7. Averaged structure of parts of recycled agricultural machinery, in percent of the cost of machines at different periods of their service, years

²⁵ Конкин Ю. А. Экономика ремонта сельскохозяйственной техники...

²⁶ Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве...

мой машины D_j от потери ее годности $G_{n\Sigma i}$ в соответствии с моделью целесообразности проведения капитального ремонта при различных вариантах ее последующего использования.

Как показали исследования прошлых лет²⁷ и исследования авторов в течение последних лет²⁸, предельное состояние машины наступает при потере годности в интервале $0,45 < G_{n\Sigma i} < 0,5$. В этом интервале $G_{n\Sigma i}$ владелец машины может выбрать любой из двух вариантов дальнейшего ее использования: ремонтировать или утилизировать. При $G_{n\Sigma i} < 0,45$ более предпочтительным является капитальный ремонт. При $0,45 < G_{n\Sigma i} > 0,5$ – утилизация, при которой будет обеспечиваться максимально возможное ресурсосбережение.

Обсуждение и заключение

Важным результатом проведенных исследований является выявление факта использования в АПК России сельхозтехники с высоким уровнем потери ее годности. Уже на 6-м году использования машины в ней имеется около 35 % деталей, достигших предельного состояния, и почти столько же деталей, требующих ремонта. Это говорит о том, что устаревшая техника имеет низкие технико-экономические показатели. Для повышения эффективности функционирования АПК России существующий парк машин необходимо обновлять, а устаревшую технику своевременно утилизировать.

Утилизация техники, достигшей предельного состояния, даст возможность собственнику техники, не прибегая к достаточно дорогому капитальному ремонту, получить доход от

реализации компонентов машины различных категорий и использовать этот доход для приобретения новой техники. Это, в свою очередь, будет способствовать развитию отечественного машиностроения, максимально возможному ресурсосбережению, на которое нацелена циркулярная экономика, повышению производительности труда как отдельно взятого предпринимателя, так и АПК в целом.

Решение этих задач потребовало развития цифровых и коммуникационных технологий. На базе этих технологий сформировались «большие данные» (big data). В программе Еврокомиссии «Горизонт 2020», крупнейшей в истории Европейского Союза программы по исследованиям и инновациям, «большие данные» рассматриваются как «топливо для новой цифровой экономики»²⁹.

Если учесть, что циркулярная экономика, которая направлена на максимальное ресурсосбережение также базируется на big data, то создание программного обеспечения для определения остаточной и утилизационной стоимости машины, а также цены ее ремонта, дело недалекого будущего.

По сути дела, предельное состояние машины можно рассматривать как аналогичную ситуацию, характеризующую выбор варианта дальнейшего использования машины: ремонтировать или утилизировать.

Производители техники на настоящий момент используют цифровые технологии для разработки интерактивных руководств по эксплуатации, в которых определены предельное состояние детали, агрегата и машины в целом яв-

²⁷ Там же; Конкин Ю. А. Экономика ремонта сельскохозяйственной техники...

²⁸ Разработать ресурсосберегающие экологоориентированные технологии и нормативно-техническую документацию...; «Актуализация Стратегии развития сельскохозяйственного машиностроения России на период до 2020 года» по разделу подпрограммы...; Игнатов В. И. Методология и технологические решения...

²⁹ Горизонт 2020. Рабочая программа ЕС по исследованиям и инновациям. Практическое руководство для исследователей из России 2014–2020 [Электронный ресурс]. URL: <http://ncp.tsagi.ru/horizon2020/upload/doc1.pdf> (дата обращения: 15.01.2020).

ляется частью этих руководств. В соответствии с п.14.3 ГОСТа 2.610-2006 производитель техники должен разрабатывать «инструкции по утилизации, инструкции по переводу изделия в категорию утилизируемого»³⁰. А в руководствах по эксплуатации приводится информация о трудоемкости и стоимости проведения ремонтных работ, включая разборочно-сборочные, дефектовочные и остальные технологические операции ремонта. Эта информация служит базой для программного обеспечения при определении цены ремонта, остаточной и утилизационной стоимости машины при наступлении страхового случая по ОСАГО.

На сегодняшний день ГОССТРАХ уже имеет не только методику, но и использует программное обеспечение для определения этих величин при

возникновении страхового случая по ОСАГО³¹. Так, например, программа Silver DAT II (12/2010 Rus) по расчету стоимости ремонта импортных автомобилей, содержит нормативы трудоемкости работ и цены на автомобильные запчасти³². В основе компьютерных программ лежат базы цифровых данных производителей техники, для которой разрабатывается программное обеспечение, касающееся страховых случаев по ОСАГО³³.

В настоящее время сотрудники ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», в том числе авторы данной статьи, взаимодействуют с разработчиками программ по страховым случаям с целью доработки определения варианта целесообразности ремонта или утилизации для техники, достигшей предельного состояния.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Игнатов, В. И.** Методика определения величины утилизационного сбора для выведенной из эксплуатации самоходной техники / В. И. Игнатов, А. С. Дорохов, В. С. Герасимов [и др.]. – DOI 10.15507/2658-4123.029.201901.124-139 // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 1. – С. 124–139. URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/ru/articles2/81-19-1/686-10-15507-0236-2910-029-201901-9> (дата обращения: 15.01.2020). – Рез. англ.

2. **Капица, С. П.** Феноменологическая теория роста населения Земли / С. П. Капица. – DOI 10.3367/UFNr.0166.199601c.0063 // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166, № 1. – С. 63–80. URL: <https://ufn.ru/ru/articles/1996/1/c/> (дата обращения: 15.01.2020). – Рез. англ.

3. **Boulding, K. E.** The Economics of the Coming Spaceship Earth. Environmental Quality in a Growing Economy, Resources for the Future / K. E. Boulding. – Baltimore : Johns Hopkins University Press, 1966. – Pp. 3–14. URL: [https://www.scirp.org/\(S\(czeh2tfqyw2orz553klw0r45\)\)/reference/ReferencesPages.aspx?ReferenceID=1673862](https://www.scirp.org/(S(czeh2tfqyw2orz553klw0r45))/reference/ReferencesPages.aspx?ReferenceID=1673862) (дата обращения: 15.01.2020).

4. **Пахомова, Н. В.** Переход к циркулярной экономике и замкнутым цепям поставок как фактор устойчивого развития / Н. В. Пахомова, К. К. Рихтер, М. А. Ветрова. – DOI 10.21638/11701/spbu05.2017.203 // Вестник СПбГУ. Экономика. – 2017. – Т. 33, Вып. 2. – С. 244–268. URL: <https://dspace.spbu.ru/handle/11701/6488> (дата обращения: 15.01.2020). – Рез. англ.

³⁰ ГОСТ 2.610-2006. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Правила выполнения эксплуатационных документов

³¹ Р 03112194-0376-98. Методика оценки остаточной стоимости транспортных средств с учетом технического состояния [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902171791> (дата обращения: 15.01.2020).

³² Silver DAT II (12/2010 Rus) Программа по расчету стоимости ремонта импортных автомобилей [Электронный ресурс]. URL: <https://avtovodu.livejournal.com/650280.html> (дата обращения: 15.01.2020).

³³ Там же.

5. **Ajukumar, V. N.** Evaluation of Green Maintenance Initiatives in Design and Development of Mechanical Systems Using an Integrated Approach / V. N. Ajukumar, O. P. Gandhi. – DOI 10.1016/j.jclepro.2013.01.010 // Journal of Cleaner Production. – 2013. – Vol. 51. – Pp. 34–46. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652613000152?via%3Dihub> (дата обращения: 15.01.2020).
6. **Amelia, L.** Initiating Automotive Component Reuse in Malaysia / L. Amelia, P. A. Wahab, C. H. Che Haron [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2009. – Vol. 17, issue 17. – Pp. 1572–1579. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652613000152?via%3Dihub> (дата обращения: 15.01.2020).
7. **Guide, D.** The Evolution of Closed-Loop Supply Chain Research / D. Guide, L. Wassenhove. – DOI 10.1287/opre.1080.0628 // Operations Research. – 2009. – Vol. 57, issue 1. – Pp. 10–18. URL: <https://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/opre.1080.0628> (дата обращения: 15.01.2020).
8. **Braungart, M.** Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things / M. Braungart, W. McDonough. – New York : North Point Press, 2002. – 208 p. – ISBN-13 978-1400157617. URL: <https://mcdonough.com/writings/cradle-cradle-remaking-way-make-things/> (дата обращения: 15.01.2020).
9. **Johnson, M. R.** Product Recovery Decisions within the Context of Extended Producer Responsibility / M. R. Johnson, I. P. McCarthy. – DOI 10.1016/j.jengtecman.2013.11.002 // Journal of Engineering and Technology Management. – 2014. – Vol. 34. – Pp. 9–28. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0923474813000817?via%3Dihub> (дата обращения: 15.01.2020).
10. **Yang, S. S.** The Impact of Automotive Product Remanufacturing on Environmental Performance / S. S. Yang, H. Y. Ngiam, S. K. Ong [et al.]. – DOI 10.1016/j.procir.2015.01.017 // Procedia CIRP. – 2015. – Vol. 29. – Pp. 774–779. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115000190?via%3Dihub> (дата обращения: 15.01.2020).
11. **Taylor, J. S.** A Statistical Theory of Depreciation / J. S. Taylor. – DOI 10.1080/01621459.1923 // American Statistical Association. – 1923. – Vol. 18, issue 144. – Pp. 1010–1023. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1923.10502133> (дата обращения: 15.01.2020).
12. **Hotelling, H.** A General Mathematical Theory of Depreciation / H. Hotelling. – DOI 10.2307/2965518 // American Statistical Association. – 1925. – Vol. 20, issue 151. – Pp. 340–353. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1925.10503499> (дата обращения: 15.01.2020).
13. **Scmeaffer, R. L.** Optimum Age Replacement Policies with an Increasing Cost Factor / R. L. Scmeaffer. – DOI 10.1080/00401706.1971.10488760 // Technometrics. – 1971. – Vol. 13, issue 1. – Pp. 139–144. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00401706.1971.10488760> (дата обращения: 15.01.2020).
14. **Герасимов, В. С.** Создание вторичного рынка поддержанной сельскохозяйственной техники в агропромышленном комплексе Российской Федерации / В. С. Герасимов // Труды ГОСНИТИ. – 2013. – Т. 113. – С. 33–43. URL: <http://www.gosniti.com/publish1.html> (дата обращения: 15.01.2020). – Рез. англ.
15. **Игнатов, В. И.** Теоретическое обоснование границ целесообразности утилизации машин / В. И. Игнатов, Н. С. Еремеев // Научный журнал КубГАУ. – 2016. – № 8. – С. 318–337. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskoe-obosnovaniya-granits-tselesoobraznosti-utilizatsii-mashin> (дата обращения: 15.01.2020). – Рез. англ.

Поступила 10.09.2019; принята к публикации 18.11.2019; опубликована онлайн 31.03.2020

Об авторах:

Игнатов Владимир Ильич, главный специалист ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), доктор технических наук, доцент, Researcher ID: T-4807-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8154-6379>, ignatoww@inbox.ru

Герасимов Валерий Сергеевич, ведущий специалист ФГБНУ «Федеральный научный агро-инженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), Researcher ID: T-4186-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4540-7408>, rosagroserv@list.ru

Мордасова Маргарита Сергеевна, научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), mzakh68@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. И. Игнатов – подготовка начального варианта текста; В. С. Герасимов – анализ и доработка текста; М. С. Мордасова – обработка статистических данных, редактирование текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Ignatov V.I., Dorokhov A.S., Gerasimov V.S., et al. The Principles for Determining Recycling Fee on Decommissioned Equipment. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(1):124-139. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.124-139>
2. Kapitsa S.P. The Phenomenological Theory of World Population Growth. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* = Advances in Physical Sciences. 1996; 166(1):63-80. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0166.199601c.0063>
3. Boulding K.E. The Economics of the Coming Spaceship Earth. In: Environmental Quality in a Growing Economy, Resources for the Future. Baltimore: Johns Hopkins University Press; 1966. Pp. 3-14. Available at: [https://www.scirp.org/\(S\(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45\)\)/reference/References.aspx?ReferenceID=1673862](https://www.scirp.org/(S(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45))/reference/References.aspx?ReferenceID=1673862) (accessed 15.01.2020). (In Eng.)
4. Pakhomova N.V., Richter K.K., Vetrova M.A. Transition to Circular Economy and Closedloop Supply Chains as Driver of Sustainable Development. *Vestnik SPbGU. Ekonomika* = St Petersburg University Journal of Economic Studies. 2017; 33(2):244-268. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21638/11701/spbu05.2017.203>
5. Ajukumar V.N., Gandhi O.P. Evaluation of Green Maintenance Initiatives in Design and Development of Mechanical Systems Using an Integrated Approach. *Journal of Cleaner Production*. 2013; 51:34-46. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.01.010>
6. Amelia L., Wahab D.A., Che Haron C.H., et al. Initiating Automotive Component Reuse in Malaysia. *Journal of Cleaner Production*. 2009; 17(17):1572-1579. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.06.011>
7. Guide D., Wassenhove L. The Evolution of Closed-Loop Supply Chain Research. *Operations Research*. 2009; 57(1):10-18. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1287/opre.1080.0628>
8. Braungart M., McDonough W. Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things. New York: North Point Press; 2002. 208 p. Available at: <https://mcdonough.com/writings/cradle-cradle-remaking-way-make-things/> (accessed 15.01.2020). (In Russ.)
9. Johnson M.R., McCarthy I.P. Product Recovery Decisions within the Context of Extended Producer Responsibility. *Journal of Engineering and Technology Management*. 2014; 34:9-28. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2013.11.002>
10. Yang S.S., Ngiam H.Y., Ong S.K., et al. The Impact of Automotive Product Remanufacturing on Environmental Performance. *Procedia CIRP*. 2015; 29:774-779. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.017>
11. Taylor J.S. A Statistical Theory of Depreciation. *American Statistical Association*. 1923; 18(144):1010-1023. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.1923.10502133>

12. Hotelling H. A General Mathematical Theory of Depreciation. *American Statistical Association*. 1925; 20(151):340-353. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2307/2965518>
13. Scmeaffer R.L. Optimum Age Replacement Policies with an Ikcreasing Cost Factor. *Technometrics*. 1971; 13(1):139-144. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/00401706.1971.10488760>
14. Gerasimov V.S. Creating a Secondary Market of Used Agricultural Machinery in the Agricultural Complex of the Russian Federation. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2013; 113:33-43. Available at: <http://www.gosniti.com/publish1.html> (accessed 15.01.2020). (In Russ.)
15. Ignatov V.I., Yermeev N.S. Theoretical Justification of the Limits of Feasibility of Machine Recycling. *Nauchnyy zhurnal KubGAU* = Scientific Journal of KubSAU. 2016; (8):318-337. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskoe-obosnovaniya-granits-tselesoobraznosti-utilizatsii-mashin> (accessed 15.01.2020). (In Russ.)

Received 10.09.2019; revised 18.11.2019; published online 31.03.2020

About the authors:

Vladimir I. Ignatov, Leading Researcher of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Researcher ID: T-4807-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8154-6379>, ignatoww@inbox.ru

Valeriy S. Gerasimov, Leading Specialist of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Researcher ID: T-4186-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4540-7408>, rosagroserv@list.ru

Margarita S. Mordasova, Researcher of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), mzakh68@yandex.ru

Contribution of the authors:

V. I. Ignatov – writing the draft; V. S. Gerasimov – revision of the text; M. S. Mordasova – processing statistical data, editing text.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

УДК 621.892.096

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202001.043-059



Оценка экологических свойств рапсовых масел для применения в качестве моторного топлива сельскохозяйственного трактора

**С. А. Плотников^{1*}, П. Я. Кантор¹, И. С. Козлов¹,
М. Н. Втюрина²**

*¹ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»,
(г. Киров, Россия)*

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

**plotnikovSA@bk.ru*

***Введение.** Актуальность исследования диктуется необходимостью оценки влияния смесового топлива, включающего дизельное и биотопливо (рапсовое масло), на экологические показатели дизеля сельскохозяйственного трактора при выполнении полевых и транспортных работ. Цель исследования – прогнозирование, получение и проверка количественных зависимостей выхода токсичных компонентов при работе дизеля трактора «Беларус-922» на смесовом топливе при выполнении операций в сельском хозяйстве.*

***Материалы и методы.** Для достижения цели проведены: определение количественных показателей компонентного состава образцов рапсового масла различного происхождения, теоретическая оценка, сравнение расчетных и экспериментальных экологических характеристик тракторного двигателя с использованием необходимого оборудования.*

***Результаты исследования.** Впервые получены количественные значения показателей компонентного состава образцов рапсового масла различного происхождения. Анализ показал, что наиболее предпочтительным для использования в качестве топлива является образец с максимальной долей непредельных кислот в его составе, что позволит иметь максимальную скорость и полноту сгорания. Расчеты показывают снижение рабочей температуры вследствие добавки рапсового масла на 200 К, что должно приводить к уменьшению константы скорости реакции и концентрации оксидов азота приблизительно в 2,7 раза. На концентрацию оксидов азота в отработавших газах существенно влияет эндогенное происхождение соединений азота.*

***Обсуждение и заключение.** На основе анализа механизмов образования оксидов азота при сгорании рапсового масла теоретически обосновано и экспериментально подтверждено выражение расчета константы скорости реакции, показывающее их результат на полуколичественном уровне.*

© Плотников С. А., Кантор П. Я., Козлов И. С., Втюрина М. Н., 2020



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

Ключевые слова: экологические показатели, рапсовое масло, моторное топливо, токсичные компоненты, стендовые испытания

Для цитирования: Плотноков, С. А. Оценка экологических свойств рапсовых масел для применения в качестве моторного топлива сельскохозяйственного трактора / С. А. Плотноков, П. Я. Кантор, И. С. Козлов [и др.]. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202001.043-059 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 43–59.

Estimating Ecological Properties of Rapeseed Oils for Using as Agricultural Tractor Motor Fuel

S. A. Plotnikov^{a*}, P. Ya. Kantor^a, I. S. Kozlov^a,
M. N. Vtyurina^b

^aVyatka State University (Kirov, Russia)

^bVyatka State Agricultural Academy (Kirov, Russia)

*plotnikovSA@bk.ru

Introduction. The relevance of the study is determined by the need to estimate the influence of mixed fuel, including diesel and biofuel (rapeseed oil), on ecological parameters of an agricultural tractor diesel in working in agricultural fields and transporting. The objective of the study is forecasting, obtaining and comparing the calculated and experimental environmental performance indicators of the Belarus-922 tractor diesel engine using mixed fuel for farming operations.

Materials and Methods. To achieve the objective of the study, the quantitative indicators of component structure of rapeseed oil samples of various origins have been defined, a theoretical estimation and the comparison of calculated and experimental environmental performance indicators of tractor diesel engine have been made with the use of the necessary equipment.

Results. For the first time, quantitative values of indexes of the component composition of rapeseed oils of various origins have been obtained. The analysis has shown that the most recommended to be used as fuel is the sample with the maximum content of unsaturated acids that will allow providing the maximum speed and combustion efficiency. The calculations show a decrease in working temperature by 200 K as a result of added rapeseed oils that should lead to a reduction of the constant of the reaction speed and concentration of nitrogen oxides approximately by a factor of 2.7. The endogenous origin of nitrogen compounds influences essentially on the concentration of nitrogen oxides in worked-out gases. **Discussion and Conclusions.** Based on the analysis of nitrogen oxide mechanisms on combustion of rapeseed oils, the calculation of the semi-quantitative reaction rate is theoretically proved and experimentally confirmed.

Keywords: ecological parameters, rapeseed oil, motor fuel, toxic components, bench tests

For citation: Plotnikov S.A., Kantor P.Ya., Kozlov I.S., et al. Estimating Ecological Properties of Rapeseed Oils for Using as Agricultural Tractor Motor Fuel. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(1):43-59. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.043-059>

Введение

Актуальность исследования диктуется необходимостью оценки влияния смесового топлива (СТ), включающего дизельное (ДТ) и биотопливо – рапсовое масло (РМ) – на экологические показатели дизеля сельскохозяйственного трактора при выполнении полевых и транспортных работ. Цель исследования – прогнозирование, получение и проверка количественных зависимостей выхода токсичных компонентов при работе дизеля трактора «Беларус-922» на СТ, включающем ДТ и РМ, предназначен-

тора при выполнении полевых и транспортных работ. Цель исследования – прогнозирование, получение и проверка количественных зависимостей выхода токсичных компонентов при работе дизеля трактора «Беларус-922» на СТ, включающем ДТ и РМ, предназначен-

ного для выполнения операций в сельском хозяйстве. Для этой цели проведены лабораторные и теоретические исследования образцов РМ и составов СТ. В результате впервые получены сравнительные количественные результаты хроматографического анализа нескольких образцов рапсового масла, произведенного в РФ, странах ближнего зарубежья и Западной Европы. Анализ полученных масс-спектров путем подбора и сравнения с максимально сходными масс-спектрами из электронных библиотек позволил установить образец РМ, позволяющий, предположительно, обеспечивать наибольшую скорость и полноту сгорания впрыснутого в цилиндр дизеля смесового топлива. В результате теоретического анализа механизмов образования оксидов азота (NO_x) при сгорании РМ обосновано выражение расчета константы скорости реакции, показывающее результат на полуколичественном уровне. Данные расчетов подтверждаются экспериментально – в случае сгорания смеси, содержащей 55 % РМ, концентрация NO_x снижется в 2–2,5 раза. Полученные аналитические и экспериментальные результаты объясняют противоречивость и неоднозначность данных различных литературных источников, доказывают экологическую целесообразность применения РМ в качестве моторного топлива для сельскохозяйственного трактора, позволяют прогнозировать уровень выбросов оксидов азота в отработавших газах (ОГ) тракторного дизеля. В связи с изменением условий и параметров работы двигателя на смеси ДТ и РМ такого рода анализ будет способствовать оптимизации режима работы дизеля и минимизации вредных экологических последствий.

Жиры (глицериды), входящие в состав растительных масел, представля-

ют собой сложные эфиры трехатомного спирта глицерина и высших карбоновых кислот, содержащих, как правило, четное количество атомов углерода¹. Жиры растительного происхождения содержат в большом количестве остатки непредельных карбоновых кислот, которые встречаются в природе только в цис-форме. Углеводородная цепь молекулы такой кислоты имеет характерный излом в области двойной связи с углом около 120° между прямолинейными фрагментами. Более сложная по сравнению с прямолинейными молекулами предельных кислот форма затрудняет формирование из молекул растительных жиров компактной кристаллической структуры, вследствие чего последние при комнатной температуре существуют в виде густых жидкостей или масел.

В состав жиров входят преимущественно остатки предельных кислот, пальмитиновой $\text{C}_{15}\text{H}_{31}\text{COOH}$ и стеариновой $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$, а также остатки непредельных высших карбоновых кислот:

– олеиновой – $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_7 - \text{CH} = \text{CH} - (\text{CH}_2)_7 - \text{COOH}$;
 – линолевой – $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_4 - \text{CH} = \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH} = \text{CH} - (\text{CH}_2)_7 - \text{COOH}$;
 – линоленовой – $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH} = \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH} = \text{CH} - (\text{CH}_2)_7 - \text{COOH}$.

Известно, что увеличение числа кратных связей в молекуле органического соединения приводит к его более легкому окислению по сравнению с молекулами, содержащими только одинарные связи [1]. Энергия разрыва одинарной связи $\text{C} - \text{C}$ составляет в среднем 3,52 эВ (339 кДж/моль), тогда как энергия разрыва π -связи, входящей в состав двойной, равна 2,81 эВ (271 кДж/моль). В силу экспоненциальной зависимости скорости реакции

¹ Ребиндер П. А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия. Избранные труды. М.: Наука, 1978. 368 с.

от энергии активации ($e^{-\frac{E_a}{kT}}$) сравнительно небольшое уменьшение энергии разрыва связи должно приводить к значительному возрастанию скорости горения². Окисление происходит за счет образования пероксидных мостиков по месту разрыва π -связи и дальнейшей деструкции углеводородного радикала, то есть образования более коротких цепочек (свободных радикалов).

Механизмы дальнейшего окисления (горения) могут быть различными:

- свободные радикалы могут взаимодействовать с образованием новых соединений (углеводородов), в том числе и высокомолекулярных;

- могут образовываться различные кислородсодержащие соединения: альдегиды, кетоны, кислоты, вода, оксид углерода (IV) оксид углерода (II), а также углерод в виде сажи.

Полнота окислительных процессов, а также кинетика окисления, то есть скорость реакции, в значительной степени зависят от количества входящих в состав жиров остатков ненасыщенных карбоновых кислот.

Существующих в литературе данных по исследованию моторных и экологических свойств топливной смеси ДТ и РМ крайне мало.

Обзор литературы

Учеными ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» был проведен анализ видов биотоплива и их физико-химических свойств, рассмотрены технологии получения биотоплива. Исследованы проблемы снижения токсичности отработавших газов двигателей. Представлены результаты экспериментальных исследований. Установлена возможность применения биотоплива в двигателях транспортных средств³.

Китайскими исследователями была проведена оценка состава масла, экстрагированного из семян рапса, произрастающего на юго-востоке Китая (провинция Хунань) [2]. Исследование проводилось методами газовой и жидкостной хроматографии в сочетании с масс-спектрометрией. Выяснено, что порядка 80 % состава приходится на молекулы, содержащие 54 атома углерода. Из жирных кислот, входящих в состав триацилглицеридов, преобладает олеиновая, на молекулы которой приходится также около 80 % от их общего количества.

Группа польских исследователей проводила оценку состава РМ, выделенного из семян генномодифицированного рапса с низким содержанием полиненасыщенной линоленовой кислоты, произрастающего в Польше (г. Познань) [3]. Была выявлена сильная отрицательная корреляция между наличием мутантных аллелей генов и содержанием линоленовой кислоты. Авторы также отмечают, что масло с низким содержанием линоленовой кислоты, вследствие высокой стабильности, является важным источником сырья для производства биотоплива.

Корреляция между окислительной стабильностью рапсового масла и его химическим составом исследовалась на сортах рапса, произрастающих в Литве [4]. Обнаружено, что наивысшая окислительная стабильность при температуре 110 °С характерна для сортов с максимальным содержанием мононенасыщенных жирных кислот.

В одной из наших работ были исследованы закономерности изменения кинематической вязкости смесей дизельного топлива с рапсовым маслом и влияние на вязкость цетаноповышающей присадки [5]. Построены математические модели формирования вязкости смеси. Показано, что зависимость вяз-

² Зельдович Я. Б. Теория горения и детонации газов. М.: АН СССР, 1944. 396 с.

³ Биотоплива для двигателей внутреннего сгорания / В. А. Марков [и др.]. М.: НИЦ «Инженер», 2016. 292 с.

кости от массовой концентрации и от мольной доли рапсового масла удовлетворительно описывается соответственно квадратичной и линейной регрессиями. Кроме того, обнаружен и интерпретирован эффект снижения вязкости смеси за счет добавления цетаноповышающей присадки, возрастающей при повышении концентрации масла.

Иностранцами коллегами экспериментально исследовалось влияние различных факторов на содержание диоксида азота NO_2 и других оксидов азота NO_x в отработавших газах дизельного двигателя. Обнаружено, что при изменении параметров впрыска или состава топливовоздушной смеси выбросы NO_2 и NO_x ведут себя аналогичным образом, однако с ростом концентрации NO_x доля NO_2 по отношению к другим оксидам азота уменьшается. Для интерпретации результатов измерений предполагалось, что основную роль в образовании оксидов азота играет механизм Зельдовича [6].

В другой статье тех же авторов отмечается, что образованию NO_2 способствует повышение коэффициента избытка воздуха, а также низкая частота вращения коленчатого вала двигателя. Последний факт связывается с увеличением времени образования диоксида азота, причем основную роль в этом процессе, по мнению авторов, играет доокисление NO пероксидными радикалами [7].

В работе Л. Новопашина и Л. Денежко было проведено сравнительное исследование мощностных и эксплуатационных показателей, а также токсичности отработавших газов при работе тракторного двигателя Д-144 на чистом дизельном топливе и на смесях этанола с рапсовым маслом. Отмечается, что содержание оксидов азота в отработавших газах при использовании топливной смеси уменьшалось в 2,4...4 раза [8].

Группой ученых из г. Дублина (Ирландия) исследовались моторные свойства топливных смесей, содержащих до

25 % рапсового масла. Отмечается, что при максимальном содержании РМ цетановое число снижалось до 32,4 единицы относительно значения 38,1 единицы для чистого дизельного топлива [9].

Целью исследования С. А. Плотникова и соавторов явилось определение показателей токсичности дизеля на стенде и в составе тракторного агрегата [10]. Проведенные стендовые и полевые исследования и их анализ позволили определить технико-экономическую эффективность применения рапсового масла в дизельном двигателе. Установлено, что при переводе дизеля для работы на смесях рапсового масла с дизельным топливом концентрация сажи при добавлении 45 % рапсового масла уменьшается во всем диапазоне частот на 7–15 % по сравнению с работой на чистом дизельном топливе.

В обзоре испанских исследователей анализируются различные аспекты использования РМ в качестве топлива. Касаясь эксплуатационных свойств РМ, авторы констатируют пониженное (до 37,6 единицы), по сравнению с дизельным топливом (47 единиц), цетановое число, а также более низкое содержание СО и твердых частиц в отработавших газах. Отмечается также, что вопрос о том, понижает или повышает РМ выбросы оксидов азота и углеводородов, требует дополнительного исследования [11].

Й. Меркиш измерил параметры автобусного дизельного двигателя, работающего на метиловом эфире рапсового масла в условиях г. Познань (Польша). Измерения показали снижение выбросов твердых частиц на 9 %, углеводородов на 14 % и угарного газа на 19 % по сравнению с работой на дизельном топливе. В то же время наблюдалось увеличение выбросов оксидов азота на 7 %. Причины указанных изменений не анализируются [12].

К. Туцким и соавторами исследовалось влияние давления и начальной температуры в камере сгорания на самовоспламенение и дальнейшее го-

рение рапсового масла и его смесей с дизельным топливом. Обнаружено, что понижение температуры приводит к увеличению времени задержки самовоспламенения – тем более значительно, чем выше содержание рапсового масла в смеси [13].

Командой ученых во главе с Ж. М. Де-зантом сделана попытка расчета концентрации оксидов азота NO в отработавших газах дизеля с учетом нескольких возможных механизмов его образования: термического, известного также как расширенный механизм Зельдовича, «быстрого» (механизм Фенимора) и так называемого промежуточного механизма, который обусловлен тройными столкновениями молекул реагентов и играет существенную роль при высоких давлениях в бедных рабочих смесях. Показано, что отношение концентрации NO, рассчитанной по термическому механизму, к полной концентрации слабо зависит от условий протекания реакции и может быть аппроксимировано полиномом 4-й степени относительно «термической» концентрации. Это обстоятельство, согласно утверждению авторов, позволяет с высокой точностью предсказать концентрацию оксидов азота в продуктах сгорания любого топлива с использованием сравнительно простого расчета, основанного на термическом механизме [14].

Дж. Янг и соавторы методами химической кинетики выполнили расчет образования NO при сгорании биодизеля. Установлено, что приблизительно 89 % оксидов азота в продуктах сгорания обусловлено термическим механизмом и 11 % – быстрым механизмом. Отмечается также, что при сопоставимых условиях, биодизель дает NO на 10 % больше по сравнению с обычным дизельным топливом. По мнению авторов, это связано с наличием атомов кислорода в молекулах метилового эфира рапсового масла, что приводит к обеднению рабочей смеси [15].

Индийскими исследователями измерялась концентрация загрязняющих выбросов при работе двигателя на смесях дизельного топлива с метиловыми эфирами растительных масел. Отмечается тенденция к некоторому росту концентрации оксидов азота в отработавших газах при увеличении содержания эфира в топливной смеси, что, по мнению авторов, связано с более высокой температурой горения биодизеля по сравнению с чистым дизельным топливом [16].

В статье В. И. Головитчева и Дж. Янга была построена полуэмпирическая модель сгорания органического топлива, включающая 1472 реакции с участием 309 промежуточных веществ, примененная к дизельному топливу и метиловому эфиру рапсового масла. Согласно гипотезе авторов, процесс начинается с расщепления молекулы эфира, содержащей от 17 до 19 атомов углерода, на несколько более мелких фрагментов. Расчет показал уменьшение максимальной температуры с 2790 К при горении дизельного топлива до 2670 К при горении эфира и, как следствие, некоторое снижение концентрации NO в продуктах сгорания в последнем случае [17].

Цель данного исследования – определение количественных показателей компонентного состава образцов РМ различного происхождения, теоретическая оценка, сравнение расчетных и экспериментальных экологических характеристик тракторного двигателя.

Материалы и методы

Общий вид и перечень используемого оборудования и приборов представлен на рисунках 1, 2 и в таблице 1.

Лабораторные опыты производились в химической лаборатории ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет». Экспериментальные исследования проводились в испытательной лаборатории и на опытном поле УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия».

В исследованиях использовались пять образцов РМ, произведенных на территории Российской Федерации, Республики Беларусь и Германии.

Подготовка проб проводилась с использованием методики получения метиловых эфиров жирных кислот из триглицеридов переэтерификацией с метанольным раствором гидроксида калия в соответствии с ГОСТом 31665-2012⁴.

Жирокислотный состав образцов масел исследовался методом капиллярной газовой хроматомасс-спектрометрии на газовом хроматомасс-спектрометре производства Японии с масс-фильтром квадрупольного типа. Прибор был оснащен капиллярной кварцевой колонкой с полидиметилфенилсилоксановой неподвижной жидкой фазой. Относительное процентное содержание кислот в исследуемых маслах определялось по площадям хроматографических пиков соответствующих метиловых эфиров.

Получаемые экспериментальные масс-спектры интерпретировались с помощью программного обеспечения. Анализ нормализованных данных позволил определить образец РМ, обеспечивающий наибольшую скорость и полноту сгорания. Идентификация химических соединений производилась также по их временам (индексам) удерживания, зависящим от природы соединения, неподвижной жидкой фазы колонки и условий проведения эксперимента.

Теоретический анализ образования оксидов азота при сгорании РМ производился с учетом общепринятых путей их образования, известных первичных способов их снижения и процессов дожигания топлива [22]. Получение экспериментальных экологических характеристик осуществлялось при полном нагружении тракторного дизеля при его работе на топливе, содержащем 20 % и 55 % РМ⁵.

Т а б л и ц а 1

Table 1

Приборы и оборудование в составе экспериментальной установки
Devices and equipment as a part of experimental installation

Вид исследования / Research	Оборудование / Equipment	Тип, марка / Type, mark	Примечание / Note
Хроматомасс-спектрометрия / Chromatography-mass spectrometry	Хроматомасс-спектрометр / Chromatography-mass spectrometer	GCMS-QP2010 «Шимадзу» / GCMS-QP2010 Shimadzu	Метод внутренней нормализации / Method of intrinsic normalisation
Интерпретация масс-спектров / Interpretation of mass spectra	Программное обеспечение / Software	GCMSSolution 2.5	250 000 масс-спектров / 250 000 mass spectra
Стендовые испытания / Bench tests	Автотракторный дизель / Autotractor Diesel	Д-245.5S2 / D-245.S2	Мощность 70 кВт / Power 70 kWt
Топливная экономичность / Fuel economy	Расходомер / Flowmeter	АИР-50 / ACE-50	Точность $\pm 1\%$ / Accuracy $\pm 1\%$
Токсичность ОГ / Flue gas toxicity	Газоанализатор / Gas analyzer	MGT 5	Погрешность $\pm 3\%$ / Error $\pm 3\%$

⁴ ГОСТ 31665-2012. Масла растительные и жиры животные. Получение метиловых эфиров жирных кислот.

⁵ Коробейников А. Т., Лихачёв В. С., Шолохов В. Ф. Испытания сельскохозяйственных тракторов. М.: Машиностроение, 1985. 239 с.



Р и с. 1. Хроматомасс-спектрометр
F i g. 1. Chromatography-mass spectrometer



Р и с. 2. Тракторный дизель с устройством регулирования состава смеси
F i g. 2. Tractor diesel with blending control device

Работа тракторного дизеля исследовалась при номинальной частоте вращения коленчатого вала 1800 мин⁻¹ и частоте вращения, соответствующей максимальному крутящему моменту 1400 мин⁻¹ ⁶.

Первоначально двигатель прошел обкатку продолжительностью 60 мото-часов на режимах, утвержденных технической документацией завода-изготовителя⁷. Перед началом проведения испытаний выполнялся прогрев двигателя. После прогрева двигатель выводился на номинальный скоростной режим работы. Этот режим являлся контрольным⁸. Для уменьшения

погрешностей измерений замер показателей при испытаниях в каждом опыте повторялся не менее 3 раз, брался усредненный результат. Полученные данные приводилось к стандартным атмосферным условиям, температуре и плотности топлива согласно ГОСТу 18509-88⁹.

Результаты исследования

В таблице 2 приведены результаты хроматографического анализа нескольких образцов рапсового масла; на рисунке 3 – хроматограмма, соответствующая образцу № 19.

Известно, что добавление РМ приводит к увеличению времени сгорания

Т а б л и ц а 2

Table 2

Процентное содержание кислотных остатков в образцах рапсового масла

Percentage of the acid rests in samples rape seed oils

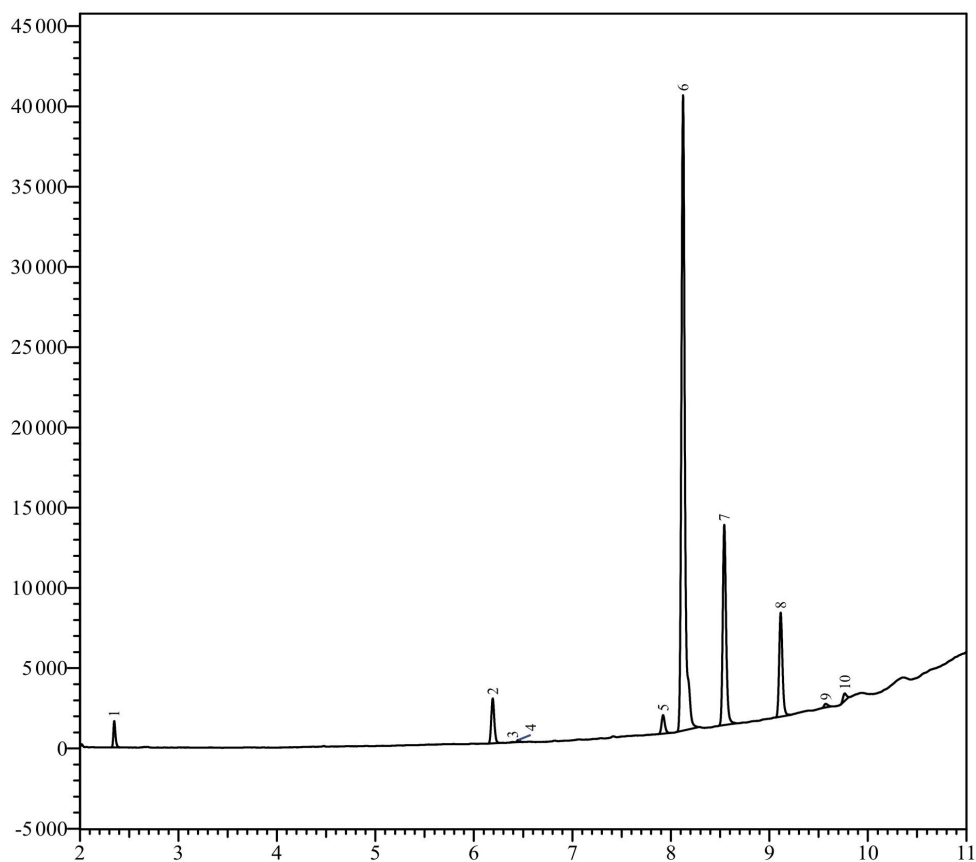
Название кислоты / Acid	Число атомов углерода / Number of carbon atoms	Число двойных связей / Number of double links	Образец / Sample				
			2	3	4	12	19
Пальмитиновая / Palmitic acid	16	Нет / No	4,67	4,72	4,73	0,69	3,92
Маргариновая / Margarinic acid	17	Нет / No	0,19	0,19	0,19	–	0,17
Стеариновая / Stearic acid	18	Нет / No	1,75	1,65	1,47	0,75	1,74
Олеиновая / Oleic acid	18	1	63,55	64,74	65,10	89,86+0,94	63,79
Линолевая / Linoleic acid	18	2	19,58	18,71	19,65	7,52	19,27
Линоленовая / Linolenic acid	18	3	8,15	8,10	7,83	–	9,94
Арахидиновая / Arachidic acid	20	Нет / No	0,42	0,32	0,28	–	0,41
Эйкозеновая / Eicosenoic acid	20	1	1,68	1,56	0,74	–	0,76
Бегеновая / Behenic acid	22	Нет / No	–	–	–	0,24	–

⁶ Барский И. Б., Анилович В. Я., Кутьков Г. М. Динамика трактора. М.: Машиностроение, 1973. 280 с.

⁷ Руководство по эксплуатации «Беларус 812/822/912/922» 822-0000010РЭ: утв. ПО «Минский тракторный завод». Минск, 1999. 339 с

⁸ Тракторные дизели: справочник / Под общ. ред. Б. А. Взорова. М.: Машиностроение, 1981. 585 с.

⁹ ГОСТ 18509-88. Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний (с Изменением N 1).



Р и с. 3. Хроматограмма

Fig. 3. Chromatogram

Т а б л и ц а 3

Table 3

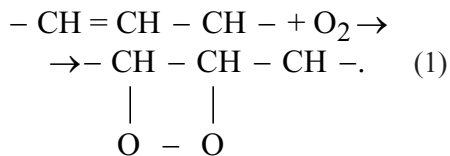
Данные анализа хроматограммы
Data of the analysis of the chromatogramm

Peak#	Height	Ret.Time	Area	Conc.	Units	Name
1	1 614	2,349	2 442	1,573	%	RT2.349
2	2 664	6,191	5 999	3,864	%	
3	27	6,395	43	0,028	%	RT6.395
4	132	6,451	256	0,165	%	!
5	1 141	7,921	2 651	1,707	%	“
6	38 070	8,124	97 466	62,774	%	
7	12 422	8,542	29 439	18,960	%	
8	6 409	9,115	15 185	9,780	%	
9	228	9,573	625	0,402	%	#
10	450	9,766	1 160	0,747	%	\$%&'
Total	63 157		155 266	100,000		



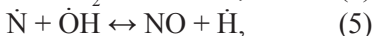
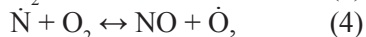
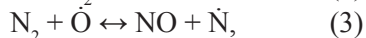
топливной смеси. В связи с этим предпочтительным для приготовления топливной смеси является образец № 19, поскольку массовая доля непредельных кислот в его составе максимальна (93 %). Данное обстоятельство напрямую влияет на увеличение скорости процесса сгорания.

Цепная реакция горения протекает предположительно по следующему механизму. Молекула кислорода присоединяется по месту двойной связи с образованием пероксида:



Молекула пероксида крайне неустойчива, происходит ее термическая деструкция с разрывом связей O – O и C – C. Образовавшиеся свободные радикалы химически чрезвычайно реакционноспособны; дальнейшее окисление происходит с образованием различных карбонильных, карбоксильных соединений до H₂O и CO₂.

Согласно литературным данным, образование оксидов азота, из которых на NO приходится более 90 %, при горении углеводородного топлива в воздухе обусловлено двумя механизмами [18]. Термический механизм предполагает цепную реакцию, основными элементарными актами которой являются¹⁰:



Как известно, добавка РМ существенно замедляет горение топливной смеси, что в свою очередь приводит к понижению средней температуры. Следовательно, содержание оксидов азота в ОГ двигателя, работающего на топливной смеси, должно снижаться по сравнению с работой на чистом ДТ.

Вследствие высокой энергии диссоциации молекулы кислорода (496 кДж/моль) и энергии активации реакции (2) (316 кДж/моль) указанные реакции протекают при достаточно большой температуре.

В частности, в работе Я. Б. Зельдовича рассматриваются главным образом температуры, характерные для взрыва и достигающие 3000 К и более¹¹. Тогда как максимальная температура в цилиндре дизельного двигателя не превышает 1800 К. По-видимому, при таких температурах существенную роль играет «быстрый» механизм [18; 19] с участием углеводородных радикалов:



На полуколичественном уровне этот результат может быть обоснован с использованием полученного Л. В. Москалевой [19] выражения для константы скорости реакции (11):

$$k_3 = 2,22 \cdot 10^7 T^{1,48} \times \exp(-11760/T), \text{ см}^3/(\text{моль} \cdot \text{с}). \quad (11)$$

Согласно работе Л. В. Москалевой, указанное выражение справедливо в интервале температур 1500...4000 К при давлении 0,5...2 атм. [19]. Образующийся в результате последующих реакций (2)–(5) оксид азота в высокотемпе-

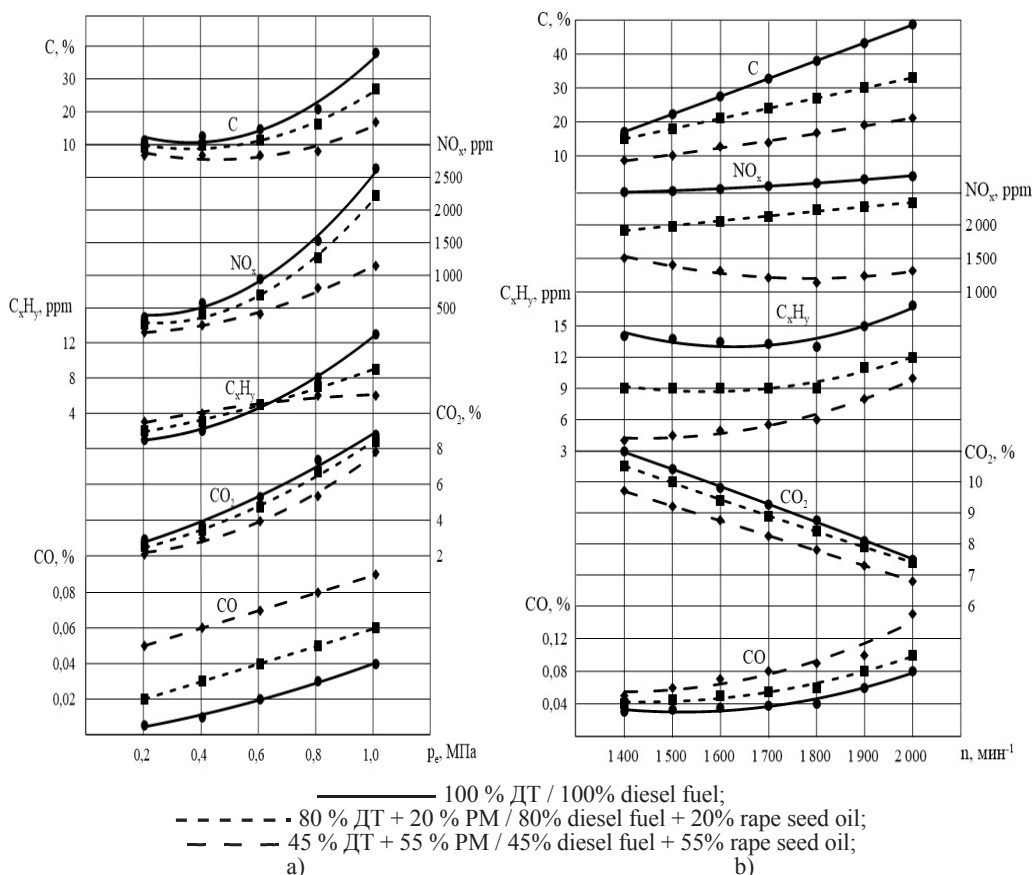
¹⁰ Зельдович Я. Б., Садовников П. Я., Франк-Каменецкий Д. А. Окисление азота при горении. Москва – Ленинград: Изд-во АН СССР, 1947. 148 с.

¹¹ Там же.

ратурной области быстро разрушается; «выживают» лишь те молекулы, которые за время сгорания топливной смеси успевают диффундировать в низкотемпературную пристеночную область цилиндра. Так или иначе, содержание оксида азота в отработавшем газе пропорционально скорости k_3 инициирующей реакции (11). При характерной для горения топлива в дизельном двигателе температуре 1800 К значение k_3 составляет $2,12 \cdot 10^9 \text{ см}^3/(\text{моль} \cdot \text{с})$; снижение рабочей температуры вследствие добавки РМ на 200 К должно приводить к умень-

шению k_3 до $7,88 \cdot 10^8 \text{ см}^3/(\text{моль} \cdot \text{с})$, то есть приблизительно в 2,7 раза.

Однако следует учитывать эндогенное происхождение соединений азота. Содержание фосфолипидов в растительных маслах может достигать 4 %. Кроме того, свое влияние оказывают пигменты группы хлорофилла, которые придают РМ желтовато-зеленоватый оттенок. Их содержание значительно меньше (до 0,008 %). Все они содержат связанный азот, который в процессе горения легко превращается в NO_x . И в случае, если рапс усиленно



Р и с. 4. Экологические показатели дизеля:

а) при переменной нагрузке; б) при переменной частоте вращения коленчатого вала

F i g. 4. Diesel engine environmental performance: а) at variable loading; б) at variable engine speed

удобряли популярным в этом отношении карбамидом, то содержание азота в РМ и продуктах его сгорания может возрастать.

Одновременно должно наблюдаться увеличение концентрации CO , причем увеличение тем больше, чем выше частота вращения коленчатого вала. Отсюда следует, что желательно также растянуть во времени процесс впрыска топливной смеси в цилиндр. Это должно привести к дополнительному снижению выбросов оксидов азота, увеличению времени горения и, соответственно, уменьшению содержания CO в отработавших газах.

Теоретические выкладки подтверждаются экспериментально: в случае работы на смеси, содержащей 55 % РМ, концентрация NO_x снижается в 2–2,5 раза (рис. 4).

Обсуждение и заключение

В результате проведенных исследований впервые получены количественные значения показателей компонентного состава образцов РМ различного происхождения. Анализ полученных масс-спектров позволил установить, что наиболее предпочтительным для использования в качестве моторного топлива является образец № 19 с максимальной долей непредель-

ных кислот в его составе (93 %), что позволит иметь максимальную скорость и полноту сгорания.

Выявлен предположительный механизм протекания цепной реакции горения смесового топлива. На основе анализа механизмов образования оксидов азота (NO_x) при сгорании РМ теоретически обосновано и экспериментально подтверждено выражение расчета константы скорости реакции, показывающее их результат на полуколичественном уровне. Объяснены основные причины, вызывающие рост или снижение выбросов оксидов азота в ОГ двигателя.

Установлено, что на концентрацию оксидов азота NO_x в ОГ существенно влияет эндогенное происхождение соединений азота. Наличие в РМ фосфолипидов и пигментов группы хлорофилла может повысить эмиссию оксидов азота при работе двигателя. Тем самым разрешено существующее противоречие научных данных различных исследователей.

Результаты теоретических разработок и анализа экспериментальных данных позволят осуществлять выбор наиболее рациональных путей использования различных видов растительных масел в двигателе внутреннего сгорания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Williams, F. A.** Combustion theory / F. A. Williams. – [2nd ed.]. – Menlo Park, California : The Benjamin/Cummings Publishing Company, 1985. – 665 p. – ISBN 0-8053-9801-5. URL: <http://behineh-sazan.ir/wp-content/uploads/2016/12/Williams-F.A.-Combustion-Theory-2ed.-Benjamin-Pub.-1985.pdf> (дата обращения: 20.01.2020).
2. **Guana, M.** A Study on Triacylglycerol Composition and the Structure of High-Oleic Rapeseed Oil / M. Guana, H. Chen, X. Xiong [et al.]. – DOI 10.1016/J.ENG.2016.02.004 // Engineering. – 2016. – Vol. 2, issue 2. – Pp. 258–262. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809916309523?via%3Dihub> (дата обращения: 20.01.2020).
3. **Bocianowski, J.** Determination of Fatty Acid Composition in Seed Oil of Rapeseed (Brassica Napus L.) by Mutated Alleles of the FAD3 Desaturase Genes / J. Bocianowski, K. Mikołajczyk, I. Bartkowiak-Broda. – DOI 10.1007/s13353-011-0062-0 // Journal of Applied Genetics. – 2012. – Vol. 53, issue 1. – Pp. 27–30. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs13353-011-0062-0> (дата обращения: 20.01.2020).

4. **Gruzdienė, D.** Chemical Composition and Stability of Rapeseed Oil Produced from Various Cultivars Grown in Lithuania / D. Gruzdienė, E. Anelauskaitė // The 11th International Congress of Engineering and Food. – Athens, 2011. – Pp. 1–4. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Chemical-composition-and-stability-of-rapeseed-oil-Gruzdienė%CC%87-Anelauskaitė%CC%97/11a8693031c52d96ebd81d52b2c204535a070466> (дата обращения: 20.01.2020).

5. **Плотников, С. А.** Исследование моторных свойств смесей дизельного топлива с рапсовым маслом / С. А. Плотников, П. Я. Кантор, И. С. Козлов [и др.] // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. – 2018. – № 2 (121). – С. 169–174. URL: <https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2018/02/2018-02.pdf> (дата обращения: 20.01.2020).

6. **Röbber, M.** Formation of Engine Internal NO₂: Measures to Control the NO₂/NO_x Ratio for Enhanced Exhaust After Treatment / M. Röbber, A. Velji, C. Janzer [et al.]. – DOI 10.4271/2017-01-1017 // SAE Int. J. Engines. – 2017. – Vol. 10, issue 4. – Pp. 1880–1893. URL: <https://saemobilus.sae.org/content/2017-01-1017/> (дата обращения: 20.01.2020).

7. **Röbber, M.** Mechanisms of the NO₂ Formation in Diesel Engines / M. Röbber, T. Koch, C. Janzer [et al.] // MTZ worldwide. – 2017. – Issue 7–8. URL: https://www.fvv-net.de/fileadmin/user_upload/medien/fachzeitschriften/2017-07_08_MTZ_1173_NO2_Formation_Mechanisms_EN.pdf (дата обращения: 20.01.2020).

8. **Новопашин, Л. А.** Получение и исследования свойств биодизеля в качестве топлива для тракторов в условиях Урала / Л. А. Новопашин, Л. В. Денежко // Аграрный вестник Урала. – 2014. – № 4 (122). – С. 43–49. URL: <http://avu.usasa.ru/ru/issues/63/articles/1630> (дата обращения: 20.01.2020).

9. **McDonnell, K.** Properties of Rapeseed Oil for Use as a Diesel Fuel Extender / K. McDonnell, S. Ward, J. J. Leahy, [et al.]. – DOI 10.1007/s11746-999-0001-y // Journal of the American Oil Chemists' Society. – 1999. – Vol. 76, issue 5. – Pp. 539–543. URL: <https://aocs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1007/s11746-999-0001-y> (дата обращения: 20.01.2020).

10. **Плотников, С. А.** Исследование экономической эффективности от снижения токсичности дизеля 4ЧН 11,0/12,5 путем применения рапсового масла / С. А. Плотников, А. Н. Карташевич, П. Н. Черемисинов [и др.] // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. – 2019. – № 1 (124). – С. 204–209. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-ekonomicheskoy-effektivnosti-ot-snizheniya-toksichnosti-dizelya-4chn-11-0-12-5-putem-primeneniya-rapsovogo-masla> (дата обращения: 20.01.2020).

11. **Baquero, G.** Use of Rapeseed Straight Vegetable Oil as Fuel Produced in Small-Scale Exploitations / G. Baquero, B. Esteban, J.-R. Riba [et al.]. – DOI 10.5772/18183 // Biofuel's Engineering Process Technology. – IntechOpen, 2011. URL: <https://www.intechopen.com/books/biofuel-s-engineering-process-technology/use-of-rapeseed-straight-vegetable-oil-as-fuel-produced-in-small-scale-exploitations> (дата обращения: 20.01.2020).

12. **Merkisz, J.** Rapeseed Oil Methyl Esters (RME) as Fuel for Urban Transport / J. Merkisz, P. Fuć, P. Lijewski [et al.]. – DOI 10.5772/62218 // Alternative Fuels, Technical and Environmental Conditions. – IntechOpen, 2016. URL: <https://www.intechopen.com/books/alternative-fuels-technical-and-environmental-conditions/rapeseed-oil-methyl-esters-rme-as-fuel-for-urban-transport> (дата обращения: 20.01.2020).

13. **Tucki, K.** The Effects of Pressure and Temperature on the Process of Auto-Ignition and Combustion of Rape Oil and Its Mixtures / K. Tucki, R. Mruk, O. Orynych [et al.]. – DOI 10.3390/su11123451 // Sustainability. – 2019. – Vol. 11, issue 12. – Pp. 34–51. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/12/3451> (дата обращения: 20.01.2020).

14. **Desantes, J. M.** Evaluation of the Evaluation of the Thermal NO Formation Mechanism under Low-Temperature Diesel Combustion Conditions / J. M. Desantes, J. J. Lopez, P. Redon [et al.]. – DOI 10.1177/1468087411429638 // International Journal of Engine Research. – 2012. – Vol. 13, issue 6. – Pp. 531–539. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1468087411429638> (дата обращения: 20.01.2020).

15. **Yang, J.** Chemical Kinetic Study of Nitrogen Oxides Formation Trends in Biodiesel Combustion / J. Yang, V. I. Golovitchev, P. R. Lurbe [et al.]. – DOI 10.1155/2012/898742 // International Journal of Chemical Engineering. – 2012. – Vol. 2012. – 22 p. URL: <https://www.hindawi.com/journals/ijce/2012/898742/> (дата обращения: 20.01.2020).

16. **Chaurasiya, P. K.** Combustion and Emission Characteristics of Diesel Fuel Blended with Raw Jatropha, Soybean and Waste Cooking Oils / P. K. Chaurasiya, S. K. Singh, R. Dwivedi [et al.]. – DOI 10.1016/j.heliyon.2019.e01564 // Heliyon. – 2019. – Vol 5, issue 5. – Pp. 1–7. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844019319942?via%3Dihub> (дата обращения: 20.01.2020).

17. **Golovitchev, V. I.** Construction of Combustion Models for Rapeseed Methyl Ester Bio-Diesel Fuel for Internal Combustion Engine Applications / V. I. Golovitchev, J. Yang. – DOI 10.1016/j.biotechadv.2009.04.024 // Biotechnology Advances. – 2009. – Vol. 27, issue 5. – Pp. 641–655. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S073497500900072X?via%3Dihub> (дата обращения: 20.01.2020).

18. **Fenimore, C. P.** Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames / C. P. Fenimore. – DOI 10.1016/S0082-0784(71)80040-1 // Symposium (International) on Combustion. – 1971. – Vol. 13, issue 1. – Pp. 373–380. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0082078471800401?via%3Dihub> (дата обращения: 20.01.2020).

19. **Moskaleva, L. V.** The Spin-Conserved Reaction $\text{CH} + \text{N}_2 \rightarrow \text{H} + \text{NCN}$: a Major Pathway to Prompt No Studied by Quantum/Statistical Theory Calculations And Kinetic Modeling of Rate Constant / L. V. Moskaleva, M. C. Lin. – DOI 10.1016/S0082-0784(00)80652-9 // Proceedings of the Combustion Institute. – 2000. – Vol. 28, issue 2. – Pp. 2393–2401. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0082078400806529?via%3Dihub> (дата обращения: 20.01.2020).

Поступила 21.10.2019; принята к публикации 18.12.2019; опубликована онлайн 31.03.2020

Об авторах:

Плотников Сергей Александрович, профессор кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36), доктор технических наук, Researcher ID: R-8491-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-4591>, plotnikovSA@bk.ru

Кантор Павел Яковлевич, доцент кафедры физики и методики обучения физике ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36), кандидат физико-математических наук, Publons ID: <https://publons.com/researcher/3178809/pavel-kantor/>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3033-6512>, shawl@list.ru

Козлов Илья Сергеевич, аспирант кафедры машин и технологий деревообработки ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36), Publons ID: <https://publons.com/researcher/3299873/ilya-kozlov/>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1448-5144>, vz-43@mail.ru

Втюрина Марина Николаевна, доцент кафедры почвоведения, мелиорации, землеустройства и химии ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133), кандидат химических наук, Researcher ID: AAC-7407-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2366-3929>, vturina-60@mail.ru

Заявленный вклад соавторов

С. А. Плотников – общее руководство, постановка задач исследования, формулирование выводов; П. Я. Кантор – проведение теоретического анализа; И. С. Козлов – проведение стендовых испытаний тракторного дизеля; М. Н. Втюрина – проведение экспериментальных исследований в химической лаборатории.

Благодарности: Работа выполнена в рамках плана НИР ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет». Авторы выражают благодарность сотрудникам УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» за помощь в проведении полевых испытаний.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Williams F.A. Combustion Theory. 2nd ed. Menlo Park, California: The Benjamin/Cummings Publishing Company; 1985. 665 p. Available at: <http://behineh-sazan.ir/wp-content/uploads/2016/12/Williams-F.A.-Combustion-Theory-2ed.-Benjamin-Pub.-1985.pdf> (accessed 20.01.2020). (In Eng.)
2. Guana M., Chen H., Xiong X., et al. A Study on Triacylglycerol Composition and the Structure of High-Oleic Rapeseed Oil. *Engineering*. 2016; 2(2):258-262. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.02.004>
3. Bocianowski J., Mikołajczyk K., Bartkowiak-Broda I. Determination of Fatty Acid Composition in Seed Oil of Rapeseed (*Brassica Napus L.*) by Mutated Alleles of the FAD3 Desaturase Genes. *Journal of Applied Genetics*. 2012; 53(1):27-30. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s13353-011-0062-0>
4. Gruzdiene D., Anelauskaite E. Chemical Composition and Stability of Rapeseed Oil Produced From Various Cultivars Grown in Lithuania. In: The 11th International Congress of Engineering and Food. Athens; 2011. Pp. 1-4. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Chemical-composition-and-stability-of-rapeseed-oil-Gruzdiene%CC%87-Anelauskait%C4%97/11a8693031c52d96ebd81d52b2c204535a070466> (accessed 20.01.2020). (In Eng.)
5. Plotnikov S.A., Kantor P.Ya., Kozlov I.S., et al. Research of Motor Properties of Mixes of Diesel Fuel with Rape Seed Oil. *Trudy NGTU im. R.Ye. Alekseeva* = Works of Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University. 2018; (2):169-174. Available at: <https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2018/02/2018-02.pdf> (accessed 20.01.2020). (In Russ.)
6. Rößler M., Velji A., Janzer C., et al. Formation of Engine Internal NO₂: Measures to Control the NO₂/NO_x Ratio for Enhanced Exhaust After Treatment. *SAE Int. J. Engines*. 2017; 10(4):1880-1893. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4271/2017-01-1017>
7. Rößler M., Koch T., Janzer C., et al. Mechanisms of the NO₂ Formation in Diesel Engines. *MTZ Worldwide*. 2017; (7-8). Available at: https://www.fvv-net.de/fileadmin/user_upload/medien/fachzeitschriften/2017-07_08_MTZ_1173_NO2_Formation_Mechanisms_EN.pdf (accessed 20.01.2020). (In Eng.)
8. Novopashin L.A., Denezhko L.V. Biodiesel Production and Study of the Properties of Biodiesel as Fuel for Tractors under Conditions of the Urals. *Agrarnyy Vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals. 2014; (4):43-49. Available at: <http://avu.usaca.ru/ru/issues/63/articles/1630> (accessed 20.01.2020). (In Russ.)
9. McDonnell K., Ward S., Leahy J.J., et al. Properties of Rapeseed Oil for Use as a Diesel Fuel Extender. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 1999; 76(5):539-543. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11746-999-0001-y>
10. Plotnikov S.A., Kartashevich A.N., Cheremisinov P.N. Research of Economic Efficiency from Reduction in Toxicity of the Diesel Engine 4CHN 11.0/12.5 by Application Rape Seed Oil. *Trudy NGTU im. R.Ye. Alekseeva* = Works of Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University. 2019; (1):204-209. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-ekonomicheskoy-effektivnosti-ot-snizheniya-toksichnosti-dizelya-4chn-11-0-12-5-putem-primeneniya-rapsovogo-masla> (accessed 20.01.2020). (In Russ.)
11. Baquero G., Esteban B., Riba J.-R., et al. Use of Rapeseed Straight Vegetable Oil as Fuel Produced in Small-Scale Exploitations. In: Biofuel's Engineering Process Technology. IntechOpen; 2011. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5772/18183>
12. Merksiz J., Fuć P., Lijewski P., et al. Rapeseed Oil Methyl Esters (RME) as Fuel for Urban Transport. In: Alternative Fuels, Technical and Environmental Conditions. IntechOpen; 2016. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5772/62218>
13. Tucki K., Mruk R., Orynycz O., et al. The Effects of Pressure and Temperature on the Process of Auto-Ignition and Combustion of Rape Oil and Its Mixtures. *Sustainability*. 2019; 11(12):34-51. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/su11123451>
14. Desantes J.M., Lopez J.J., Redon P., et al. Evaluation of the Thermal NO Formation Mechanism under Low-Temperature Diesel Combustion Conditions. *International Journal of Engine Research*. 2012; 13(6):531-539. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/1468087411429638>

15. Yang J., Golovitchev V.I., Lurbe P.R., et al. Chemical Kinetic Study of Nitrogen Oxides Formation Trends in Biodiesel Combustion. *International Journal of Chemical Engineering*. 2012; 2012. 22 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1155/2012/898742>
16. Chaurasiya P.K., Singh S.K., Dwivedi R., et al. Combustion and Emission Characteristics of Diesel Fuel Blended with Raw Jatropa, Soybean and Waste Cooking Oils. *Heliyon*. 2019; 5(5):1-7. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01564>
17. Golovitchev V.I., Yang J. Construction of Combustion Models for Rapeseed Methyl Ester Bio-Diesel Fuel for Internal Combustion Engine Applications. *Biotechnology Advances*. 2009; 27(5):641-655. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2009.04.024>
18. Fenimore C.P. Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames. *Symposium (International) on Combustion*. 1971; 13(1):373-380. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(71\)80040-1](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(71)80040-1)
19. Moskaleva L.V., Lin M.C. The Spin-Conserved Reaction $\text{CH} + \text{N}_2 \rightarrow \text{H} + \text{NCN}$: a Major Pathway to Prompt No Studied by Quantum/Statistical Theory Calculations And Kinetic Modeling of Rate Constant. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2000; 28(2):2393-2401. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(00\)80652-9](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(00)80652-9)

Received 21.10.2019; revised 18.12.2019; published online 31.03.2020

About the authors:

Sergey A. Plotnikov, Professor of Chair of Mechanical Engineering Technology, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: R-8491-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-4591>, plotnikovSA@bk.ru

Pavel Ya. Kantor, Associate Professor of Chair of Physics and Methods of Teaching Physics, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia), Ph.D. (Physics and Mathematics), Publons ID: <https://publons.com/researcher/3178809/pavel-kantor/>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3033-6512>, shawl@list.ru

Ilya S. Kozlov, Postgraduate Student of Chair of Woodworking Machinery and Technology, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia), Publons ID: <https://publons.com/researcher/3299873/ilya-kozlov/>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1448-5144>, vz-43@mail.ru

Marina N. Vtyurina, Associate Professor of Chair of Soil Science, Land Reclamation, Land Management and Chemistry, Vyatka State Agricultural Academy (133 Oktyabrskiy Prospekt, Kirov 610017, Russia), Ph.D. (Chemistry), Researcher ID: AAC-7407-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2366-3929>, vtyurina-60@mail.ru

Contribution of the authors:

S. A. Plotnikov – the general management, statement of research problems, the formulation of conclusions; P. Ya. Kantor – carrying out of the theoretical analysis; I. S. Kozlov – carrying out of bench tests of a tractor diesel engine; M. N. Vtyurina – carrying out of experimental researches in chemical laboratory.

Acknowledgements: The work was carried out as part of the research work of Vyatka State University. The authors thank the staff of the Belarussian State Agricultural Academy for their assistance in conducting field trials.

All authors have read and approved the final manuscript.



Выбор стратегии в задаче корректировки регулировочных параметров комбайна

Л. В. Борисова, И. Н. Нурутдинова, В. П. Димитров*,
А. К. Тугенгольд

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

*kaf-qm@donstu.ru

Введение. В статье рассматривается задача корректировки регулировочных параметров рабочих органов зерноуборочного комбайна, функционирующего в меняющихся внешних условиях. Для технологической регулировки сложных иерархических многоуровневых систем, к которым относятся комбайны, широко применяются интеллектуальные информационные системы, основанные на нечеткой экспертной информации. При проведении технологической настройки комбайна в процессе уборки анализируется поступающая количественная, качественная и оценочная информация. Различные виды неопределенности при рассмотрении семантических пространств факторов внешней среды и регулируемых параметров машины обуславливают применение логико-лингвистического подхода и математического аппарата нечеткой логики для нахождения оптимальных начальных значений регулируемых параметров. Сложная система взаимосвязей между регулировочными параметрами, показателями качества уборки урожая и факторами внешней среды обуславливает необходимость корректировки параметров рабочих органов комбайна в процессе уборки. Эту функцию выполняет блок корректировки в интеллектуальной системе поддержки принятия решений. В настоящей статье подробно рассмотрены вопросы создания базы знаний для корректировки регулировочных параметров в случаях, когда наблюдаются отклонения значений показателей качества уборки от нормативных.

Материалы и методы. Поскольку причин появления нарушения много и заранее неизвестно, какая из них привела к отклонению, то способов реагирования на них тоже достаточно много. Взаимосвязи между показателями качества работы и регулируемыми параметрами устанавливаются в основном эмпирическими правилами, полученными на основе сбора и анализа экспертной информации. Для оптимизации работы механизма вывода интеллектуальной информационной системы (сокращения времени принятия решения) возникает необходимость установления значимости используемых правил базы знаний. Для решения этой задачи привлечен теоретико-игровой подход, введены понятия матрицы показателей эффективности и матрицы рисков принятия неэффективного решения, позволяющие использовать критерии оптимальности.

Результаты исследования. Приведен пример выбора стратегии поиска адекватного реагирования на появление нарушения показателей уборки в виде «потери щуплого зерна с половой». Рассмотрен выбор стратегий реагирования на нарушение на основе критериев Лапласа, математического ожидания и критерия Сэвиджа, используемых для принятия решений в «играх с природой». Проиллюстрирована методика процедуры принятия решения в рассматриваемой задаче с применением указанных критериев, проведен анализ полученных результатов.

© Борисова Л. В., Нурутдинова И. Н., Димитров В. П., Тугенгольд А. К., 2020



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

Обсуждение и заключение. Предложенный подход существенно повышает результативность работы блока корректировки интеллектуальной системы. Он позволяет структурировать базу экспертных знаний и устанавливать оптимальную последовательность применения продукционных правил, что обеспечивает эффективность процесса корректировки регулируемых параметров комбайна, а также сокращает время принятия решений. Данный подход может быть использован при решении проблем корректировки технологических настроек в различных технических системах и устройствах, а также для поиска причин возникающих в них неисправностей.

Ключевые слова: интеллектуальная информационная система, принятие решений, зерноуборочный комбайн, технологическая регулировка, лингвистическая переменная, функция принадлежности

Для цитирования: Борисова, Л. В. Выбор стратегии в задаче корректировки регулировочных параметров комбайна / Л. В. Борисова, И. Н. Нурутдинова, В. П. Димитров [и др.]. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202001.060-075 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 60–75.

Selecting a Strategy for Determining the Combine Harvester Parameter Settings

L. V. Borisova, I. N. Nurutdinova, V. P. Dimitrov*,
A. K. Tugengold

Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia)

* *kaf-qm@donstu.ru*

Introduction. The article deals with adjusting the parameter settings of a combine harvester working bodies. For adjustment of complex hierarchical multilevel systems, the intellectual methods based on fuzzy expert information are used. The incoming quantitative, qualitative and evaluation information is analyzed when adjusting the combine harvester. The different types of uncertainty in considering semantic spaces of external environment factors and regulated parameters of the machine cause the application of logical and linguistic approach and mathematical apparatus of fuzzy logic for determining the optimal initial settings. The complex system of interrelations between parameters, indicators of quality of harvest, and factors of external environment causes the necessity to adjust the parameters of combine working elements in the process of harvesting. This function is performed by the correction unit in the intelligent decision support system. In the present article, the questions of creating a knowledge base for correcting adjustment parameters in cases when there are deviations of values of harvesting quality indicators from normative values are considered in detail.

Materials and Methods. Interrelations between performance indicators and regulated parameters are established by empirical rules obtained through the collection and analysis of expert information. To optimize the mechanism of intellectual information system output and reduce the time of decision making, there is a necessity to establish the relevance of used knowledge base rules. To solve this problem, theoretical and game approaches are used, concepts of the matrix of performance indicators and the matrix of risks of making an inefficient decision are used.

Results. An example of choosing a strategy of searching for an adequate response to the fault of the harvesting indices in the form of “losses of feeble grain with chaff” has been given. The choice of fault response strategies on the basis of Laplace criterion, expected-value criterion, and Savage test used for decision-making in “games with nature” has been considered. The method of the decision-making process in the problem under consideration with the application of the mentioned criteria were illustrated, the analysis of the obtained results was carried out.

Discussion and Conclusion. The suggested approach substantially increases performance of the unit of intelligent system updating. It allows structuring the expert knowledge base and establishing an optimal sequence of application of production rules; this provides efficiency of the updating process of the adjustable harvester parameters and also reduces the time for decision-making. This approach can be used while solving the problems of updating technological adjustments in different technical systems and devices.

Keywords: intelligent information system, decision-making, combine harvester, technological adjustment, linguistic variable, membership function

For citation: Borisova L.V., Nurutdinova I.N., Dimitrov V.P., et al. Selecting a Strategy for Determining the Combine Harvester Parameter Settings. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(1):60-75. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.060-075>

Введение

Эффективность уборочных работ в значительной степени определяется установленными значениями регулируемых параметров зернокомбайна. Недостаточно точная предварительная технологическая настройка рабочих органов комбайна, неработоспособное состояние его агрегатов, изменение внешних условий приводят к снижению показателей качества уборочных работ, что проявляется в значительных потерях, дроблении зерна и т.п.¹ Оперативно найденная причина нарушения качества работы и соответствующая корректировка параметров функционирования комбайна в полевых условиях позволят избежать значительных потерь финансовых и трудовых ресурсов [1]. Этим обусловлена актуальность задачи создания блока корректировки в интеллектуальной информационной системе (ИИС), который предназначен для обнаружения нарушений качества уборки и оперативной корректировки технологических настроек рабочих органов комбайна. Место задачи корректировки регулируемых параметров комбайна показано на рисунке 1. На основании экспертной оценки внешних факторов, а также нечеткой базы знаний, решается задача предварительной настройки регулируемых парамет-

тров комбайна. Среди этих параметров для иллюстрации выбрана частота вращения вентилятора очистки (ЧВВО). Выявление нарушений показателей качества уборки обуславливает необходимость корректировки параметров.

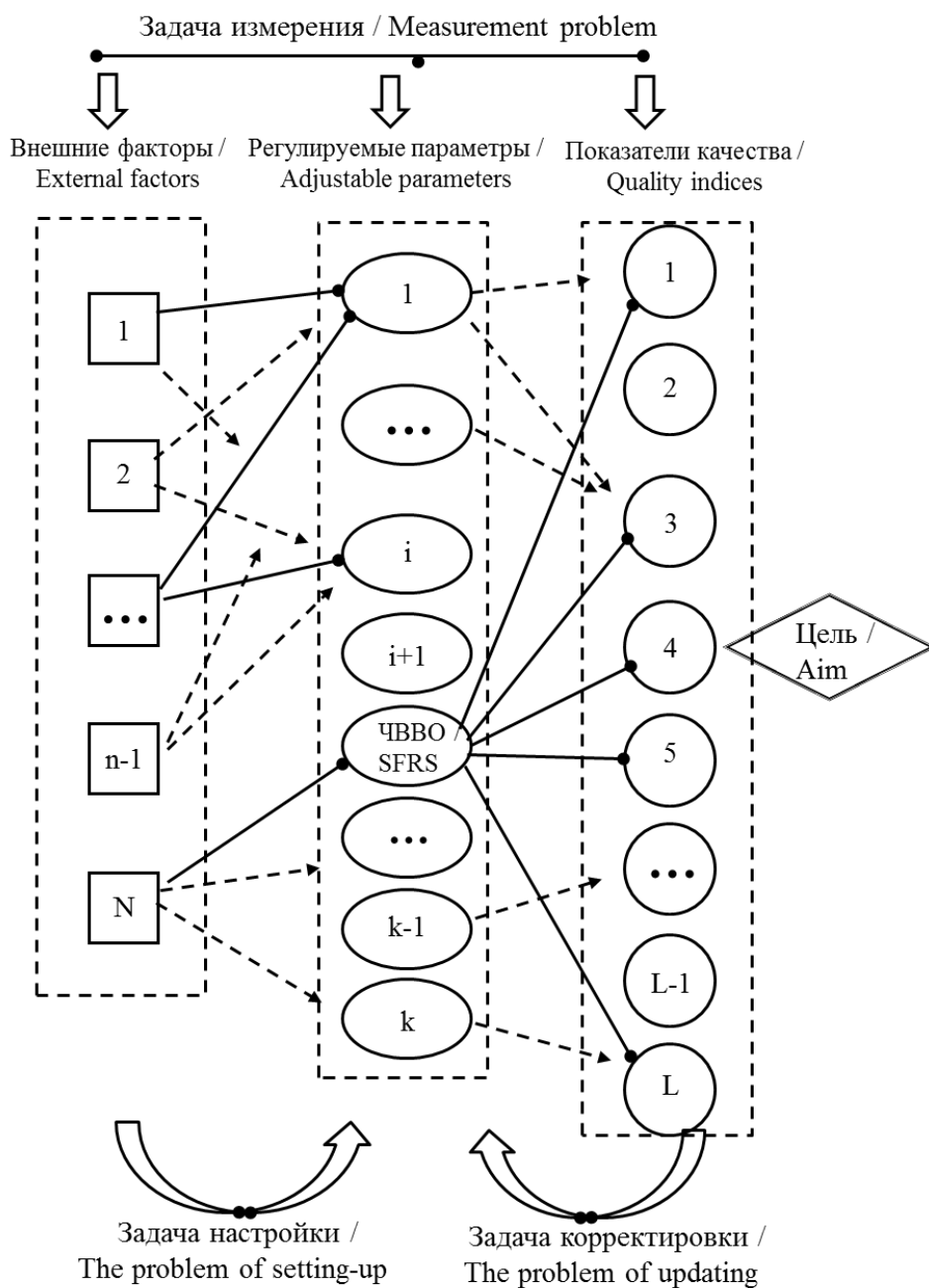
Данная статья посвящена проблемам формирования экспертной информации для блока корректировки ИИС, предназначенной для поддержки принятия решений о параметрах технологической настройки комбайна в полевых условиях.

Обзор литературы

В ряде работ подробно рассмотрены проблемы выбора значений регулируемых параметров комбайна [2–5], описан алгоритм работы блока предварительной настройки ИИС управления комбайном [2; 6]. Не менее важной задачей является оперативная корректировка технологических настроек в случае обнаружения нарушений качества уборки.

Комбайн относится к многоуровневым иерархическим системам, функционирующим в меняющихся внешних условиях. Экспертная информация о внешних условиях, а также о взаимосвязях этих условий и регулируемых параметров комбайна носит нечеткий характер. Очевидно, что для описания таких систем использование традици-

¹ Рыбалко А. Г. Особенности уборки высокоурожайных зерновых культур (настройка и регулировка машин): учебное пособие. М.: Агропромиздат, 1988. 120 с.



Р и с. 1. Задача корректировки параметров в общей схеме технологической регулировки комбайна

F i g. 1. Diagram showing position of the problem of updating adjustable parameters

онных математических подходов, таких как регрессионные модели [7–9], экспериментально-статистические методы [1; 10], малоэффективно в силу того, что получающиеся в них громоздкие математические конструкции сложно или даже невозможно оптимизировать. Помимо этого, нужно отметить еще два существенных ограничения для использования подобных подходов. Во-первых, регрессионные модели применимы только в рассматриваемом диапазоне параметров модели; во-вторых, решения об изменении значений параметров должны приниматься оперативно в полевых условиях на основе большого числа внешних факторов, которые не учитываются в модели.

Для описания процессов принятия решений и контроля технологических процессов в подобных сложных системах используется математический аппарат теории нечетких множеств [11; 12]. Он позволяет оперировать нечеткими ограничениями и целями, задавать их с помощью лингвистических переменных.

Материалы и методы

Эффективность принятия решения на основе нечетких моделей существенно зависит от того, насколько экспертная информация адекватна реальной ситуации. Применительно к рассматриваемой задаче корректировки параметров комбайна требование адекватности экспертной информации включает в себя целый ряд аспектов, среди которых, во-первых, оценка причин нарушения качества технологического процесса уборки; во-вторых, установление возможных вариантов реагирования (стратегий), то есть прописывание нечетких продукционных правил их последовательности в соответствии с оценкой эффективности каждой из стратегий.

В иерархии решения задачи оперативной корректировки технологических регулировок первый уровень занимает выявление причин нарушений

качества работы. Система взаимосвязей между внешними признаками нарушения процесса уборки урожая, причинами, приводящими к этим признакам, и способами устранения нарушений носит сложный, не всегда однозначный характер. В результате исследований установлена идентификация взаимосвязей, указано 40 внешних признаков нарушения технологического процесса [13]. Как правило, появление нарушения показателя технологического процесса обусловлено влиянием 5 и более регулировочных параметров, а также параметров технического состояния агрегата или рабочего органа. Наличие двух групп факторов, между которыми существует неоднозначная система взаимосвязей, усложняет задачу технологической корректировки.

Следующий уровень в иерархии решения задачи корректировки занимает выбор стратегии реагирования на отклонение показателей качества работы от номинальных значений. Принятие решений об изменении регулировочных параметров осложняется рядом обстоятельств, наиболее значимые из которых:

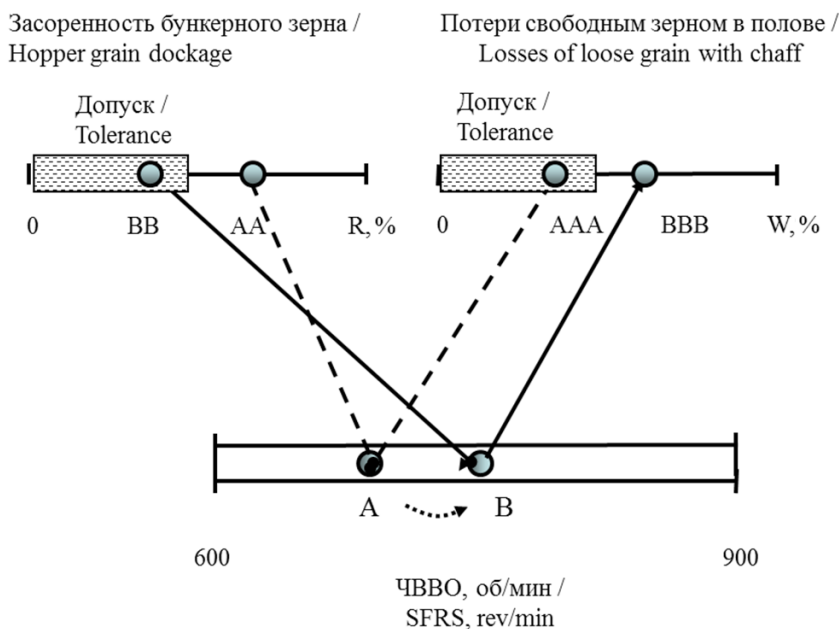
- возможность одновременного наличия нескольких нарушений качества работы;
- возможность существования нескольких причин одного и того же нарушения;
- наличие нескольких вариантов устранения нарушения;
- неизвестность точной причины нарушения.

Формализация процесса принятия решения о корректировке технологических регулировок комбайна носит гибридный характер. Для построения иерархического дерева решений целесообразно использование экспертного подхода, базирующегося на нечетких экспертных знаниях, а для оценки эффективности выбранных стратегий принятия – применение критериев «игр с природой».

Задача корректировки осложняется наличием перекрестных зависимостей между регулировочными параметрами и показателями качества работы. Для иллюстрации этих зависимостей на рисунке 2 в качестве регулируемого параметра представлена ЧВВО. На горизонтальной шкале приведены рекомендуемые границы изменения значений ЧВВО для конкретной культуры (например, 600–850 об/мин). Примем, что в соответствии с конкретными целями уборки и внешними условиями значение ЧВВО соответствует точке А. На вертикальных шкалах (в целях упрощенного представления условий задачи) представлены только 2 показателя качества – «засоренность бункерного зерна» и «потери свободным зерном с половой». На каждой из этих шкал приведены границы изменчивости показателя качества и условно отображены границы допустимых значений данного показателя в соответствии с агротехническими требованиями (допуск).

Предположим, обнаружено, что значение показателя «засоренность бункерного зерна» превышает допустимое значение (точка АА). Одновременно значение показателя качества «потери свободным зерном с половой» находится в допуске и соответствует точке ААА. Для того чтобы устранить нарушение («засоренность бункерного зерна»), необходимо увеличить значение ЧВВО (из точки А перейти в точку В). В этом случае значение показателя «засоренность бункерного зерна» входит в допуск (точка ВВ), но возможно, что значение второго показателя качества «потери свободным зерном с половой» увеличится (точка ВВВ). Таким образом, выявляется сложность процесса корректировки, так как при устранении одного нарушения возможно появление другого.

Для построения математической модели реальной системы и протекающих в ней процессов технологической регулировки необходимо установить



Р и с. 2. Схема взаимосвязи: регулируемый параметр – показатель качества

F i g. 2. The diagram of the interrelation: adjustable parameter – quality index

достаточную степень абстракции. Поэтому будем считать, что система обладает следующими свойствами:

1. За достаточно малый промежуток времени появление более чем одного внешнего признака нарушения качества технологического процесса невозможно.

2. Заранее известна значимость вклада технических и регулировочных параметров системы в вероятность отклонения значения параметра качества техпроцесса.

Остановимся более подробно на данных свойствах, поскольку они лежат в основе модели. Свойство 1 обеспечивает возможность использования экспертной информации о формах реагирования на признак нарушения в некоторой системе предпочтений. Наличие более чем одного признака нарушений требует создания значительно более сложной, учитывающей возможную корреляцию, системы экспертной информации. На начальном этапе в этом нет необходимости, что обеспечивается малостью рассматриваемого промежутка времени. Свойство 2 предполагает наличие базы знаний о зависимостях признаков нарушения техпроцесса от регулировочных параметров. Эта база знаний представляет собой иерархически структурированную информацию, сформированную на основе экспертных знаний и теоретических соображений.

Экспертная информация устанавливает связи между семантическими группами признаков предметной области в виде системы лингвистических нечетких высказываний. В данной задаче система высказываний – это эмпирические правила, определяющие зависимость показателей качества технологического процесса уборки от множества регулировочных параметров рабочих органов комбайна.

Для решения задачи корректировки воспользуемся логико-лингвистическим подходом [13; 14]. Множества входных

признаков образуют регулировочные параметры комбайна, в качестве выходного признака будем рассматривать один из показателей качества уборки. В ряде работ представлена модель рассматриваемой предметной области в виде композиции нечетких отношений [13–15].

Пусть в процессе эксплуатации зерноуборочного комбайна обнаружено отклонение показателя качества работы, которое может быть обусловлено как изменением внешних условий, так и изменением технического состояния комбайна. Для принятия решения о корректировке регулировочных параметров комбайна необходима база знаний в виде системы логических высказываний, содержащих экспертную информацию о возможных вариантах корректировки. Рассмотрим механизм формирования последовательности применения структурированных по значимости правил базы знаний.

Каждую из причин, которые могут привести к наблюдаемому отклонению показателя качества уборки, обозначим V_j , а все множество таких предпосылок обозначим $S = \{V_j\}_{j=1}^n$. Для оценки актуальности каждой из причин используется экспертный анализ эмпирических данных, а также принимаются во внимание теоретические соображения. Для достижения цели, то есть устранения обнаруженного отклонения, возможно несколько вариантов реагирования. Каждый из способов реагирования будем называть допустимой стратегией и обозначать St_i , а все множество допустимых стратегий обозначим $G = \{St_i\}_{i=1}^m$. Введем понятие эффективности стратегии, понимая под ней степень успешности ликвидации обнаруженного отклонения показателя качества при применении данной стратегии. Эффективность стратегии определяется совокупным действием причины V_j , вызвавшей отклонение, и рядом других, в том числе случайных, факторов.

Эффективность применения стратегии St_i для устранения нарушения, вызванного причиной V_j , обозначим c_{ij} . Значения c_{ij} ($i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$) определяются на основе экспертных данных и образуют матрицу C размерности $m \times n$. Будем называть ее матрицей показателей эффективности. Нормируем величины элементов матрицы C в пределах от 0 до 1. Очевидно, что чем эффективнее применение стратегии St_i для устранения нарушения, вызванного причиной V_j , тем ближе значение элемента c_{ij} к единице. Рассматриваемые элементы есть исходные данные для реализации алгоритма принятия решения в условиях неопределенности².

На практике нашли применение нескольких критериев оптимальности обоснованного выбора решения [16–19].

Примем допущение, что причины V_j равновероятны. Тогда выбирается решение $St^* \in G = \{St_i\}_{i=1}^m$, обеспечивающее наибольшее ожидаемое значение эффективности [17; 20] и используется критерий Лапласа:

$$\max_i L(i) = \max_i \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m c_{ij}. \quad (1)$$

В отсутствии априорных вероятностей используют также критерий Сэвиджа, суть которого заключается в минимизации риска принятия неэффективного решения. При известной причине появления отклонения показателя качества работы V_j целесообразно использовать стратегию St_i (соответствует максимальному элементу в столбце j). Обозначим данный элемент β_j . В этом случае целесообразно использовать понятие риска r_{ij} :

$$r_{ij} = \beta_j - c_{ij}, \quad (2)$$

где β_j – максимальная эффективность при достоверном наличии V_j .

Матрица R , состоящая из элемента r_{ij} ($i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$), характеризует риски неэффективного решения. В соответствии с критерием Сэвиджа минимальная величина риска в наихудших условиях будет оптимальной стратегией:

$$\min_i S(i) = \min_i \max_j r_{ij}. \quad (3)$$

Если заранее известны значения вероятностей p_j ($j = \overline{1, m}$) появления причины отклонения V_j , используется критерий максимального математического ожидания [17; 20]:

$$\max_i M(i) = \max_i \sum_{j=1}^m c_{ij} p_j. \quad (4)$$

Данный случай возможен либо при наличии экспертных оценок значений вероятностей, либо оценок, полученных в результате обработки экспериментальных данных.

Использование рассматриваемых критериев является слабо формализуемым (в значительной степени субъективным) процессом. Его результат в большой степени обусловлен практическим опытом лица, принимающего решение. Помимо перечисленных, могут быть использованы другие синтетические критерии [21; 22], а также иные подходы к учету неопределенности [23–25].

Результаты исследования

Рассматриваемый подход реализован на примере установления способа устранения нарушений техпроцесса для внешнего признака «потери шуплого зерна с половой». Ранее нами было показано, что данный внешний признак может быть обусловлен некорректно установленными значениями следующих параметров: Par_1 – скорость движения машины; Par_2 – частота вращения вентилятора очистки; Par_3 – зазор жалюзи верхнего решета; Par_4 – зазор жалюзи

² Таха Х. А. Введение в исследование операций. М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. 912 с.

удлинителя верхнего решета³. Для ликвидации рассматриваемого нарушения в практических условиях целесообразны следующие действия: St_1 – уменьшить незначительно скорость движения комбайна; St_2 – уменьшить значительно скорость движения комбайна; St_3 – уменьшить незначительно частоту вращения вентилятора; St_4 – уменьшить значительно частоту вращения вентилятора; St_5 – уменьшить зазор жалюзи верхнего решета; St_6 – уменьшить зазор жалюзи удлинителя верхнего решета; St_7 – выполнить ремонт механизма открытия и самих жалюзи верхнего решета; St_8 – выполнить ремонт механизма открытия и самих жалюзи удлинителя верхнего решета.

Приведем лингвистическое описание внешнего признака нарушения показателей качества работы комбайна «потери щуплого зерна с половой» и одного из параметров комбайна, который связан с данным признаком – «скорость движения комбайна».

Кортеж лингвистической переменной «потери щуплого зерна с половой» имеет вид:

< Потери щуплого зерна с половой, %
{Низкие, Высокие}, [0–2 %]>.

Кортеж лингвистической переменной «скорость движения комбайна» имеет вид:

< Скорость движения комбайна, км/ч
{Низкая, Номинальная, Высокая},
[0–10 км/ч]>.

Графики функций принадлежности указанных лингвистических переменных приведены на рисунке 3.

Матрица показателей эффективности $\{C_{ij}\}$ и значения критерия Лапласа приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Table 1

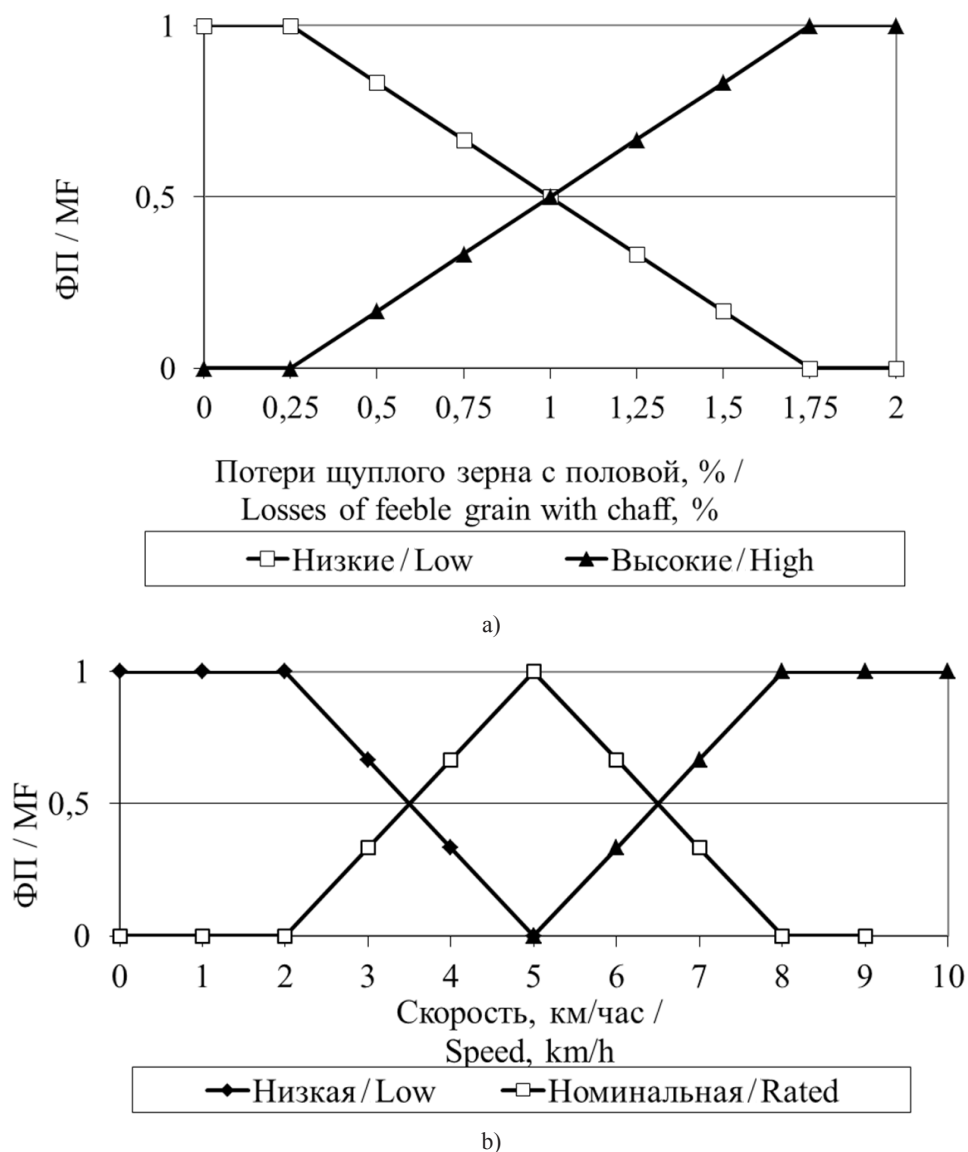
Матрица показателей эффективности
Matrix of the efficiency indices values

$St_i \backslash V_j$	V_1	V_2	V_3	V_4	$L(i)$
St_1	0,85	0,40	0,30	0,30	0,4625
St_2	0,65	0,20	0,20	0,20	0,3125
St_3	0,45	0,80	0,40	0,35	0,5000
St_4	0,30	0,70	0,25	0,20	0,3625
St_5	0,20	0,25	0,80	0,75	0,5000
St_6	0,15	0,15	0,65	0,45	0,3500
St_7	0,10	0,05	0,40	0,30	0,2125
St_8	0,10	0,05	0,10	0,50	0,1875
$\max_i c_{ij} = \beta_j$	0,85	0,80	0,80	0,75	

Предполагая, что неизвестны априорные вероятности причин V_j , положим их равными и применим критерий Лапласа (1). Вычисленные значения критерия приведены в таблице 1 в крайней правой колонке. Очевидно, что оптимальных стратегий по этому критерию две: стратегия St_3 – уменьшить незначительно частоту вращения вентилятора и стратегия St_5 – уменьшить зазор жалюзи верхнего решета. Далее иерархия выбора стратегий выстраивается в соответствии с уменьшением значения критерия и в результате имеет вид: $St_3, St_5, St_1, St_4, St_6, St_2, St_7, St_8$. При этом стратегии St_3 и St_5 равнозначны и могут быть выбраны в любой последовательности.

Для применения критерия Сэвиджа (3) получим матрицу рисков принятия неэффективного решения R . Найдем максимальные элементы в каждом столбце (они приведены в последней строке таблицы 1) и вычислим элементы матрицы рисков по формуле (2). Матрица рисков приведена в таблице 2.

³ 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.



Р и с. 3. Функции принадлежности (ФП) лингвистических переменных:
а) потери щуплого зерна с половой, %; б) скорость движения комбайна, км/час

F i g. 3. Membership functions (MF) of the linguistic variables:
a) losses of feeble grain with chaff, %; b) harvester speed, km/h

Таблица 2

Table 2

Матрица рисков
Risks matrix

$St_i \backslash V_j$	V_1	V_2	V_3	V_4	$\max_j r_{ij}$
St_1	0,00	0,40	0,50	0,45	0,50
St_2	0,20	0,60	0,60	0,55	0,60
St_3	0,40	0,00	0,40	0,40	0,40
St_4	0,50	0,10	0,55	0,55	0,55
St_5	0,60	0,55	0,00	0,00	0,60
St_6	0,70	0,65	0,15	0,30	0,70
St_7	0,75	0,75	0,40	0,45	0,75
St_8	0,75	0,75	0,70	0,25	0,75

Минимальный элемент из максимальных (по строкам таблицы 2) дает нам наилучшую стратегию по критерию Сэвиджа: St_3 – уменьшить незначительно частоту вращения вентилятора. Иерархия выбора стратегий в случае критерия Сэвиджа имеет вид: $St_3, St_1, St_4, St_5, St_2, St_6, St_7, St_8$.

Рассмотрим теперь случай, когда известны априорные вероятности причин, вызвавших отклонение показателей качества работы комбайна, и используем критерий максимального математического ожидания (4). Распределение вероятностей представлено в таблице 3.

Следует отметить, что сумма значений вероятностей p_j не равна 1, так как эти оценки выявлены на основе экспертного анализа. Не следует упускать из виду, что вполне возможно наличие дополнительных факторов, действие которых может вызвать появление рассматриваемого внешнего признака.

Результаты расчетов $M(i)$ по формуле (4) приведены в таблице 4.

Из таблицы 4 видно, что по критерию $M(i)$ оптимальной стратегией является St_3 , то есть необходимо незначительно снизить частоту вращения вентилятора очистки. Иерархия выбора стратегий имеет вид: $St_3, St_1, St_4, St_5, St_2, St_6, St_8, St_7$.

Полученные последовательности значений критериев предназначены для использования в алгоритме корректировки в ИИС при определении последовательности операций для устранения данного нарушения, что по сути представляет собой упорядочение правил в базе знаний в соответствии с их эффективностью. Задача упорядочения правил заключается в выборе стратегии, при которой наиболее вероятно правильное заключение при условии, что в базе имеются правила с эффективностью менее 100 %.

Обсуждение и заключение

Предлагаемый подход к задаче корректировки регулируемых параметров комбайна позволяет использовать кри-

Таблица 3

Table 3

Значения вероятностей причин

The values of reason probabilities

V_j	V_1	V_2	V_3	V_4
p_j	0,3	0,35	0,2	0,12

Таблица 4

Table 4

Значения математического ожидания

The values of mathematical expectation

i	1	2	3	4	5	6	7	8
$M(i)$	0,491	0,329	0,537	0,409	0,3975	0,2815	0,1635	0,1875

теории принятия оптимальных решений в условиях неопределенности, используя эмпирические знания экспертов. В данном случае возникает возможность объединения различных типов информации о семантических пространствах изучаемой системы. Построение систем поддержки принятия решений в области эксплуатации уборочных машин предполагает создание базы экспертных знаний, содержащей в том числе информацию о способах реагирования на нарушения технологического процесса. Применение критериев оптимальности позволяет структурировать базу экспертных знаний в соответствии с эффективностью продукционных правил и определяет последовательность применения стратегий для целенаправленного реше-

ния задачи корректировки. Предлагаемый подход обеспечивает реализацию адекватных процедур принятия решений по корректировке технологических регулировок в полевых условиях. Немаловажным преимуществом является сокращение времени принятия решения благодаря целенаправленному использованию правил базы знаний.

Данный подход целесообразно использовать в различных ИИС с системой обратной связи, в которых возникает необходимость упорядочения базы знаний в соответствии с эффективностью эмпирических правил. Помимо этого, он будет полезен при решении таких проблем, как поиск причин неисправностей в различных технических системах и устройствах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Ерохин, С. Н.** Влияние технологических регулировок на потери зерна за молотилкой комбайна Дон-1500 / С. Н. Ерохин, А. С. Решетов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2003. – № 6. – С. 18–19.
2. **Borisova, L.** Intelligent System for Technological Adjustment of the Harvesting Machines Parameters / L. Borisova, V. Dimitrov, I. Nurutdinova. – DOI 10.1007/978-3-319-68324-9_11 // Proceedings of the 2nd International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI’17). Advances in Intelligent Systems and Computing. – Cham : Springer, 2018. – Vol. 680. – Pp. 96–105. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-68324-9_11 (дата обращения: 12.02.2020).
3. **Dimitrov, V.** Intelligent Support of Grain Harvester Technological Adjustment in the Field / V. Dimitrov, L. Borisova, I. Nurutdinova. – DOI 10.1007/978-3-030-01821-4_25 // Proceedings of the 3rd International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI’18). Advances in Intelligent Systems and Computing. – Cham : Springer, 2019. – Vol. 875. – Pp. 236–245. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-01821-4_25#citeas (дата обращения: 12.02.2020).
4. **Omid, M.** Design of Fuzzy Logic Control System Incorporating Human Expert Knowledge for Combine Harvester / M. Omid, M. Lashgari, H. Mobli [et al.]. – DOI 10.1016/j.eswa.2010.03.010 // Expert Systems with Applications. – 2010. – Vol. 37, issue 10. – Pp. 7080–7085. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417410001910> (дата обращения: 12.02.2020).
5. **Craessaerts, G.** Fuzzy Control of the Cleaning Process on a Combine Harvester / G. Craessaerts, J. De Baerdemaeker, B. Missotten [et al.]. – DOI 10.1016/j.biosystemseng.2009.12.012 // Biosystems Engineering. – 2010. – Vol. 106, issue 2. – Pp. 103–111. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511010000024> (дата обращения: 12.02.2020).
6. **Borisova, L.** Algorithm for Assessing Quality of Fuzzy Expert Information / L. Borisova, V. Dimitrov, I. Nurutdinova // Proceedings of 2017 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). – Novi Sad, 2017. – Pp. 1–4. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8110107/> (дата обращения: 12.02.2020).
7. **Ветров, Е. Ф.** Оптимизация технологического процесса по статистическим данным / Е. Ф. Ветров, М. Д. Генкин, Л. М. Литвин [и др.] // Машиноведение. – 1986. – № 5. – С. 48–55.

8. **Ветров, Е. В.** Оптимальное регулирование зерноуборочного комбайна (Электронный «Советчик комбайнера») / Е. В. Ветров, В. П. Чернявская, Г. Ф. Бобринева [и др.] // Труды. – 1989. – № 4. – С. 80–85.
9. **Литвин, Л. М.** Обобщенная оценка зональных показателей работы зерноуборочных комбайнов / Л. М. Литвин, Э. В. Жалкин, Е. Ф. Ветров // Техника в сельском хозяйстве. – 1989. – № 5. – С. 41–45.
10. **Царев, Ю. А.** Перспективы использования электронной системы управления в комбайнах «Дон» и «Нива» / Ю. А. Царев, А. В. Харьковский // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2005. – № 1. – С. 37–38. URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2005/200501.htm> (дата обращения: 12.02.2020).
11. **Zadeh, L. A.** Fuzzy Sets / L. A. Zadeh. – DOI 10.1016/S0019-9958(65)90241-X // Information and Control. – 1965. – Vol. 8, issue 3. – Pp. 338–353. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001999586590241X> (дата обращения: 12.02.2020).
12. **Zadeh, L. A.** Knowledge Representation in Fuzzy Logic / L. A. Zadeh. – DOI 10.1007/978-1-4615-3640-6_1 // An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems. The Springer International Series in Engineering and Computer Science. – New York : Springer, 1992. – Vol. 165. – Pp. 1–27. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-3640-6_1 (дата обращения: 12.02.2020).
13. **Борисова, Л. В.** Лингвистический подход к решению задачи технологической регулировки комбайнов / Л. В. Борисова, В. П. Димитров. – DOI 10.15507/0236-2910.027.201702.178-189 // Вестник Мордовского университета. – 2017. – Т. 27, № 2. – С. 178–189. URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/ru/articles2/51-17-2/312-10-15507-0236-2910-027-201702-03> (дата обращения: 12.02.2020). – Рез. англ.
14. **Борисова, Л. В.** Подход к решению задачи по выбору значений регулируемых параметров комбайна на основе нечеткого моделирования / Л. В. Борисова, И. Н. Нурутдинова, В. П. Димитров. – DOI 10.12737/11611 // Вестник Донского государственного технического университета. – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 100–107. URL: <https://vestnik.donstu.ru/jour/article/view/21> (дата обращения: 12.02.2020). – Рез. англ.
15. **Димитров, В. П.** Технологическая настройка сельскохозяйственных машин на основе нечеткой логики / В. П. Димитров, Л. В. Борисова, А. К. Тугенгольд [и др.]. – DOI 10.15507/0236-2910.028.201802.239-254 // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 2. – С. 239–254. URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/ru/articles2/59-18-2/406-10-15507-0236-2910-028-201802-8> (дата обращения: 12.02.2020). – Рез. англ.
16. **Лабскер, Л. Г.** О некоторой общей схеме формирования критериев оптимальности в играх с природой / Л. Г. Лабскер // Вестник финансовой академии. – 2000. – № 2. – С. 71–78. URL: <http://www.fa.ru/org/div/edition/vestnik/journals/2000%20%E2%84%962.pdf> (дата обращения: 12.02.2020).
17. **Емец, О. А.** Игры с комбинаторными ограничениями / О. А. Емец, Н. Ю. Устьян // Кибернетика и системный анализ. – 2008. – Т. 44, № 4. – С. 134–141. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/44202/11-Yemets.pdf?sequence=1> (дата обращения: 12.02.2020).
18. **Клименко, И. С.** Сравнительный анализ критериев выбора стратегий в «игре с природой» / И. С. Клименко, М. А. Плуталов, Г. А. Чеботарев // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: Модели, анализ и управление. – 2015. – Т. 9, № 1. – С. 55–59. URL: <https://clck.ru/MCMpV> (дата обращения: 12.02.2020). – Рез. англ.
19. **Клименко, И. С.** К вопросу об оценивании оптимизма критериев выбора стратегий в «Игре с природой» / И. С. Клименко, М. А. Плуталов, Г. А. Чеботарев // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: Модели, анализ и управление. – 2015. – Т. 10, № 2. – С. 19–23. URL: <https://clck.ru/MCMvW> (дата обращения: 12.02.2020). – Рез. англ.
20. **Борисова, Л. В.** О теоретико-игровом подходе к задачам технологической регулировки машин / Л. В. Борисова, В. П. Димитров, И. Н. Нурутдинова // Вестник Донского государственного технического университета. – 2013. – Т. 13, № 5–6. – С. 68–76. URL: <https://vestnik.donstu.ru/jour/article/view/418/418> (дата обращения: 12.02.2020).
21. **Горелик, В. А.** Управление риском в играх с природой на основе свертки критериев Вальда и Сэвиджа / В. А. Горелик, Т. В. Золотова // Моделирование, декомпозиция и оптимизация сложных динамических процессов. – 2008. – Т. 23, № 1. – С. 99–114.

22. Лабскер, Л. Г. Оптимизация издержек в транспортном аспекте логистической системы на основе синтетического критерия Гурвица / Л. Г. Лабскер, С. Х. Айбазова / Управление риском. – 2013. – № 2 (66). – С. 52–72. URL: http://ankil.info/WordPress/wp-content/uploads/2015/04/UP_2013_2-с-обложкой.pdf (дата обращения: 12.02.2020). – Рез. англ.

23. Малышев, В. В. Метод принятия решений в условиях многообразия способов учета неопределенности / В. В. Малышев, Б. С. Пиявский, С. А. Пиявский // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2010. – № 1. – С. 46–61.

24. Orlovsky, S. A. Decision-Making with a Fuzzy Preference Relation / S. A. Orlovsky. – DOI 10.1016/0165-0114(78)90001-5 // Fuzzy Sets and Systems. – 1978. – Vol. 1, issue 3. – Pp. 155–167. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0165011478900015> (дата обращения: 12.02.2020).

25. Sengupta, K. Fuzzy Preference and Orlovsky Choice Procedure / K. Sengupta. – DOI 10.1016/S0165-0114(96)00079-6 // Fuzzy Sets and System. – 1998. – Vol. 93, issue 2. – Pp. 231–234. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165011496000796?via%3Dihub>

Поступила 20.08.2019; принята к публикации 13.11.2019; опубликована онлайн 31.02.2020

Об авторах:

Борисова Людмила Викторовна, заведующий кафедрой менеджмента и бизнес-процессов ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: E-4863-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6611-4594>, borisovalv09@mail.ru

Нурутдинова Инна Николаевна, доцент кафедры прикладной математики ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), кандидат физико-математических наук, Researcher ID: E-3961-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3375-1295>, nurut.inna@yandex.ru

Димитров Валерий Петрович, заведующий кафедрой управления качеством ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: E-4908-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1439-1674>, Scopus ID: 57195505958, kaf-qm@donstu.ru

Тугенгольд Андрей Кириллович, профессор кафедры робототехники ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), доктор технических наук, Researcher ID: E-5707-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0551-1486>, akt@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

Л. В. Борисова – исследование взаимосвязей «регулируемые параметры – показатели качества работы комбайна»; И. Н. Нурутдинова – разработка механизма применения критериев «игр с природой» к задаче корректировки регулируемых параметров, получение результатов иллюстративного примера; В. П. Димитров – анализ предметной области, моделирование нечетких экспертных знаний; А. К. Тугенгольд – разработка базы экспертных знаний.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Yerokhin S.N., Reshetov A.S. Effect of Technological Adjustments on Grain Losses behind the Thresher of Don-1500 Harvester. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva* = Mechanization and Electrification of Agriculture. 2003; (6):18-19. (In Russ.)

2. Borisova L., Dimitrov V., Nurutdinova I. Intelligent System for Technological Adjustment of the Harvesting Machines Parameters. In: Proceedings of the 2nd International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI’17). Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham: Springer; 2018. 680:96-105. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-68324-9_11
3. Dimitrov V., Borisova L., Nurutdinova I. Intelligent Support of Grain Harvester Technological Adjustment in the Field. Proceedings of the 3rd International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI’18). Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham: Springer; 2019. 875:236-245. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-01821-4_25
4. Omid M., Lashgari M., Mobli H., et al. Design of Fuzzy Logic Control System Incorporating Human Expert Knowledge for Combine Harvester. *Expert Systems with Applications*. 2010; 37(10):7080-7085. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.03.010>
5. Craessaerts G., De Baerdemaeker J., Missotten B., et al. Fuzzy Control of the Cleaning Process on a Combine Harvester. *Biosystems Engineering*. 2010; 106(2):103-111. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.12.012>
6. Borisova L., Dimitrov V., Nurutdinova I. Algorithm for Assessing Quality of Fuzzy Expert Information. In: Proceedings of 2017 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). Novi Sad; 2017. Pp. 1-4. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8110107/> (accessed 12.02.2020). (In Eng.)
7. Vetrov Ye.F., Genkin M.D., Litvin L.M., et al. Optimization of Technological Process on Statistical Data. *Mashinovedenie* = Mechanical Science. 1986; (5):48-55. (In Russ.)
8. Vetrov Ye.V., Chernyavskaya V.P., Bobrineva G.F., et al. Optimum Control of the Combine Harvester (Electronic “Combine Adviser”). *Trudy* = Proceedings. 1989; (4):80-85. (In Russ.)
9. Litvin L.M., Zhalkin E.V., Vetrov Ye.F. Generalized Assessment of Zone Performance of Combine Harvesters. *Technika v sel'skom hozyaystve* = Machinery in Agriculture. 1989; (5):41-45. (In Russ.)
10. Tsarev Yu.A., Kharkovskiy A.V. Prospects for Using the Electronic Control System in Don and Niva Harvesters. *Traktory i sel'skohozyaystvennyye mashiny* = Tractors and Agricultural Machines. 2005; (1):37-38. Available at: <http://www.avtomash.ru/gur/2005/200501.htm> (accessed 12.02.2020). (In Russ.)
11. Zadeh L.A. Fuzzy Sets. *Information and Control*. 1965; 8(3):338-353. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
12. 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. New York: Springer; 1992. 165:1-27. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3640-6_1
13. 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; 2(27):178-189. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.027.201702.178-189>
14. Borisova L.V., Nurutdinova I.N., Dimitrov V.P. Approach to the Problem of Choice of the Adjustable Harvester Parameter Values Based on Fuzzy Modeling. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Vestnik of Don State Technical University. 2015; 15(2):100-107. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.12737/11611>
15. Dimitrov V.P., Borisova L.V., Tugengold A.K., et al. Technological Adjustment of Agricultural Machines Based on Fuzzy Logic. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(2):239-254. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.239-254>
16. Labsker L.G. A General Pattern of Forming Optimum Criteria in Games with Nature. *Vestnik finansovoy akademii* = Vestnik of the Finance Academy. 2000; (2):71-78. Available at: <http://www.fa.ru/org/div/editon/vestnik/journals/2000%20%E2%84%962.pdf> (accessed 12.02.2020). (In Russ.)
17. Yemets O.A., Ustyan N.Yu. Games with Combinatorial Restrictions. *Kibernetika i sistemnyy analiz* = Cybernetics and Systems Analysis. 2008; 44(4):134-141. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/44202/11-Yemets.pdf?sequence=1> (accessed 12.02.2020). (In Russ.)
18. Klimenko I.S., Plutalov M.A., Chebotarev G.A. Comparative Analysis of Criteria for Selection Strategies in the “Game with Nature”. *Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: Modeli, analiz i upravlenie* = Vestnik of Russian New University. Series: Complex Systems: Models, Analysis, Management. 2015; 9(1):55-59. Available at: <https://clck.ru/MCMpV> (accessed 12.02.2020). (In Russ.)

19. Klimenko I.S., Plutalov M.A., Chebotarev G.A. To the Evaluation of Optimism Criteria for Selection of Strategies in the “Game with Nature”. 2015; 10(2):19-23. Available at: <https://clck.ru/MCMvw> (accessed 12.02.2020). (In Russ.)
20. Borisova L.V., Nurutdinova I.N., Dimitrov V.P. On Game-Theory Approach to Process Machine Adjustment Problems. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Vestnik of Don State Technical University. 2013; 13(5-6):68-76. Available at: <https://vestnik.donstu.ru/jour/article/view/418/418> (accessed: 12.02.2020). (In Russ.)
21. Gorelik V.A., Zolotova T.V. Risk Management in Games with Nature Based on Wald and Savage Crunch Criteria. *Modelirovanie, dekompozitsiya i optimizatsiya slozhnykh dinamicheskikh protsessov* = Modeling, Decomposition and Optimization of Complex Dynamic Processes. 2008; 23(1):99-114. (In Russ.)
22. Labsker L.G., Aybazonova S.Kh. Optimization of Costs in the Transport Aspect of the Logistics System Based on the Synthetic Hurwitz Criterion. *Upravlenie riskom* = Risk Management. 2013; (2):52-72. Available at: http://ankil.info/WordPress/wp-content/uploads/2015/04/YP_2013_2-c-обложкой.pdf (accessed 12.02.2020). (In Russ.)
23. Malyshev V.V., Piyavskiy B.S., Piyavskiy S.A. The Method of Decision-Making in a Variety of Ways of Taking into Account Uncertainty. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems. 2010; (1):46-61. (In Russ.)
24. Orlovsky S.A. Decision-Making with a Fuzzy Preference Relation. *Fuzzy Sets and Systems*. 1978; 1(3):155-167. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(78\)90001-5](https://doi.org/10.1016/0165-0114(78)90001-5)
25. Sengupta K. Fuzzy Preference and Orlovsky Choice Procedure. *Fuzzy Sets and System*. 1998; 93(2):231-234. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(96\)00079-6](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(96)00079-6)

Received 20.08.2019; revised 13.11.2019; published online 31.03.2020

About the authors:

Lyudmila V. Borisova, Head of the Chair of Management and Business Processes of Faculty of Business and Management, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: E-4863-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6611-4594>, borisovalv09@mail.ru

Inna N. Nurutdinova, Associate Professor of Applied Mathematics Chair, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russia), Ph.D. (Physics and Mathematics), Researcher ID: E-3961-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3375-1295>, nurut.inna@yandex.ru

Valeriy P. Dimitrov, Head of the Chair of Quality Management, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russia) D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: E-4908-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1439-1674>, Scopus ID: 57195505958, kaf-qm@donstu.ru

Andrey K. Tugengold, Professor of Robotics Chair, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russia), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: E-5707-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0551-1486>, akt@yandex.ru

Contribution of the authors:

L. V. Borisova – research of interrelations “adjustable parameters – harvesting quality indices”; I. N. Nurutdinova – development of a mechanism for applying the “games with nature” criteria to the problem of updating adjustable parameters of a grain harvester, obtaining the results of example; V. P. Dimitrov – analysis of subject domain, modeling of fuzzy expert knowledge; A. K. Tugengold – development of the knowledge base.

All authors have read and approved the final manuscript.



Обеспечение безотказной работы деталей машин с использованием новой системы переменных допусков

В. А. Денисов, А. А. Соломашкин*

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

*littor2013@gmail.com

Введение. Статья посвящена описанию алгоритма определения системы допусков, основанного на использовании переменного допуска, обеспечивающего безотказную работу деталей на участке. Приведена блок-схема программы по определению переменного допуска. Установлены блоки исходной информации: ломанные и гладкие кривые контролируемого параметра; гистограмма и график распределения ресурса и определения активного участка контроля; блоки построения графиков «предельных веерных кривых изнашивания» и системы допусков для объектов исследования двух типов, в данном случае для универсального топливного насоса (УТН-5) и четырехсекционного малогабаритного топливного насоса с механическим регулятором. Предложены два способа определения системы допусков. В первом варианте графически – путем построения «предельных веерных кривых изнашивания» и определения допусков по значению ординат в контрольных точках. Во втором варианте – аналитически. Разработана формула, заменяющая графический вариант определения системы допусков.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования были выбраны два типовых насоса высокого давления. Для этих насосов были известны нормативные значения, то есть номинальные и предельные значения параметров, определены графики проведения проверок и уравнения кривых изнашивания. Устанавливались зависимости, описывающие кривые изнашивания плунжерных пар насосов, строились гистограмма и график определения ресурса насосов, определялся активный участок контроля при заданном коэффициенте вероятности безотказной работы, а также вычислялись и объединялись в систему допуска значения, вычисленные для различной наработки насоса.

Результаты исследования. В результате исследования получены системы допусков для топливного насоса высокого давления двух типов, определены показатели надежности для одного из них. Разработан алгоритм определения системы допусков как графически, так и аналитически по специально разработанной формуле.

Обсуждение и заключение. Исследование позволяет утверждать возможность использования переменного допуска, как основы для определения системы допусков и показателей надежности объекта диагностирования.

Ключевые слова: система допусков, постоянный допуск, переменный допуск, показатели надежности, вероятность отказа, средний срок службы

Для цитирования: Денисов, В. А. Обеспечение безотказной работы деталей машин с использованием новой системы переменных допусков / В. А. Денисов, А. А. Соломашкин – DOI 10.15507/2658-4123.030.202001.076-091 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 76–91.

© Денисов В. А., Соломашкин А. А., 2020



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

Ensuring Reliable Operation of Machine Parts with a New System of Variable Tolerances

V. A. Denisov, A. A. Solomashkin*

Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russia)

**littor2013@gmail.com*

Introduction. The article describes an algorithm for determining the system of tolerances for ensuring reliable operation of parts on the section. The block diagram of the program for determining the variable tolerances is demonstrated. There determined blocks of initial information – broken and smooth curves of the controlled parameter, histogram and graph of resource distribution and definition of active area of control, and blocks of building graphs of “marginal fan curves of wear” and systems of admissions for objects of study of two types: for universal fuel pump (UTN-5) and four-section small-sized fuel pump with mechanical regulator. Two ways of determining the system of tolerances are suggested. Variant 1 is a graphical way through constructing “limit fan curves of wear” and determining tolerances by the value of ordinates in the control points. Variant 2 is an analytical way. There is created a formula to replace the graphical method for determining system tolerances.

Materials and Methods. Two models of high-pressure pump were selected as objects of the study. Nominal and limit values of parameters were known for the pumps. Schedules for checking and equation of wear curves are determined. Dependencies describing the pump plunger pair wear curves are determined. A histogram and graph for determining pump life cycles are drawn. The active area of control is determined with a given failure probability coefficient.

Results. As a result of the study the values for the tolerances system of two types of high pressure fuel pumps are obtained. Reliability values for one pump type are determined. Graphic and analytical algorithms for determining the system of tolerances by the formula are developed.

Discussion and Conclusion. The study approves the possibility of using the variable tolerance as a basis for determining the system of tolerances and reliability indicators of the diagnostic object.

Keywords: system of tolerances, constant tolerance, variable tolerance, reliability indicators, probability of failure, average lifetime

For citation: Denisov V.A., Solomashkin A.A. Ensuring Reliable Operation of Machine Parts with a New System of Variable Tolerances. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(1):76-91. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.076-091>

Введение

Допуски (в отличие от допусков и посадок по ГОСТу 25347-82¹) при техническом обслуживании и ремонте (ТОР) являются составной частью диагностической системы, ее конечной

частью, завершающим этапом в определении исправности деталей машин. Основные положения, классификация, номенклатура диагностических параметров, встроенные системы диагностирования и многое другое отражены

¹ ГОСТ 25347-82. Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Поля допусков и рекомендуемые посадки (с Изменением N 1)

в существующих ГОСТах по данной тематике².

Система допусков – это ограничения, накладываемые на параметры технического состояния (ПТС) деталей машин, находящихся в эксплуатации³ [1].

Если в результате диагностирования, значение контролируемого параметра превысило установленное заранее допускаемое значение (допуск), то считается, что такая деталь «вышла за допуск» и она признается неисправной. Если же диагностируемая деталь не превысила эту отметку, то она считается исправной и работоспособной [2–5]. Актуальность работы состоит в том, что правильно подобранный допуск позволяет оценить исправность детали, ее потребность в замене и срок ее службы.

Рассмотрим это на примере диагностирования топливного насоса высокого давления (ТНВД). В качестве диагностического параметра, характеризующего исправность и работоспособность ТНВД, выбрана его цикловая подача q , полученная на его пусковых оборотах, то есть пусковая цикловая подача, измеряемая в мм³/цикл. Для этого параметра известна величина номинального значения $U_{ном}$, величина предельного значения $U_{пр}$ (устанавливается в соответствии с ОСТ⁴ и РТМ⁵), а также периодичность проверки при техническом обслуживании № 3 – через 1000 мото-часов. Вместе с этим

существуют устройства для контроля цикловой подачи насосов, стенды для диагностики и ремонта ТНВД.

Поскольку диагностирование проводится по графику $T_k = \{tk_i\}$, например, периодически через определенную межконтрольную наработку tm , то значение допуска $U_{доп} - D$ устанавливается таким, чтобы деталь после i -й проверки (tk_i) при наработке tk_i могла без отказа доработать до следующей проверки ($i+1$), при наработке tk_{i+1} , то есть через межконтрольную наработку tm (рис. 1).

Обычно такой процесс описывается кривой изнашивания диагностируемой детали. Если значение контролируемого параметра изменяется, например, по степенной зависимости $U(t) = v_i \cdot t^a$, то $U_{пр}(t) = v_i \cdot tk_2^a$ и $U_{доп}(t) = v_i \cdot tk_1^a$. Тогда допуск $D = U_{пр}(tk_2) \cdot (tk_2 / tk_1)^a$ или $D = U_{пр}(tk_2) \cdot ((tk_1 + tm) / tk_1)^a$, где a – показатель степени степенной функции изнашивания; v_i – скорость изнашивания, ед. скорости.

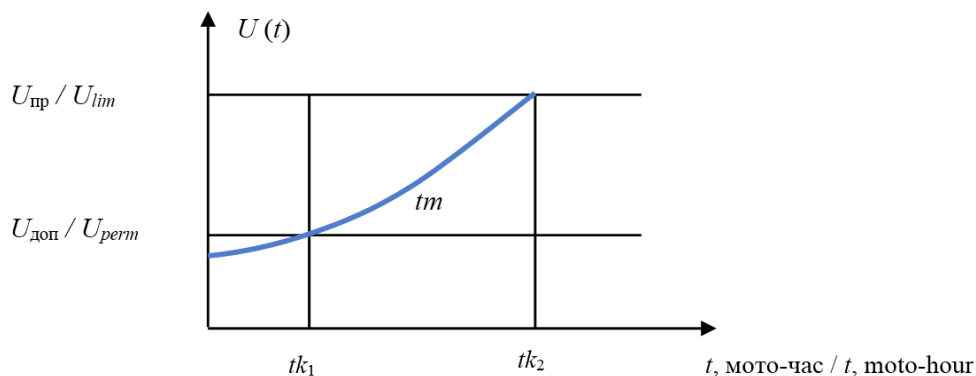
Кроме степенной можно использовать и другие элементарные функции и их комбинации. Пример приведен в работе А. А. Соломашкина [6]. Здесь находим анализ существующих и перспективных функций, которые могут использоваться в качестве кривых изнашивания. Для выбора наиболее информативных использовали два критерия: коэффициент достоверности аппроксимации и среднеквадрати-

² ГОСТ 25044-81. Техническая диагностика. Диагностирование автомобилей, тракторов, сельскохозяйственных, строительных и дорожных машин. Основные положения; ГОСТ 25176-82. Техническая диагностика. Средства диагностирования автомобилей, тракторов, строительных и дорожных машин. Классификация. Общие технические требования; ГОСТ 26048-83. Техническая диагностика. Системы тормозные автомобилей, тракторов и монтируемых на их базе строительных и дорожных машин. Номенклатура диагностических параметров; ГОСТ Р 52122-2003. Техническая диагностика. Локомотивы магистральные. Встроенные системы диагностирования. Общие требования.

³ Михлин В. М. Прогнозирование технического состояния машин. М.: Колос, 1976. 287 с.; Михлин В. М. Техническая диагностика тракторов и зерноуборочных комбайнов. М.: Колос, 1987. 287 с.; Михлин В. М. Теоретические основы прогнозирования технического состояния тракторов и сельскохозяйственных машин: дис. ... док. техн. наук. М., 1974. 378 с.

⁴ ОСТ 23.1.364-81. Насосы топливные высокого давления тракторных и комбайновых дизелей. Метод ускоренных испытаний на надежность.

⁵ РТМ 37.031.004-78. Надежность изделий автомобилестроения. Система сбора и обработки информации. Единый классификатор неисправностей изделий автомобилестроения (классификация и кодирование неисправностей).



Р и с. 1. Изменение контролируемого параметра на участке $tk_1 \dots tk_2$:

$U(t)$ – изменение параметра $U(t)$ за время t , мото-час; $U_{пр}$ и $U_{доп}$ – предельное и допускаемое значение параметра, ед. изм.; t – наработка, мото-час; tm – межконтрольная наработка, мото-час; tk_1 и tk_2 – наработка, мото-час

F i g. 1. Change of a controlled parameter on the section $tk_1 \dots tk_2$:

$U(t)$ – parameter change $U(t)$ in time t , moto-hour; U_{lim} and U_{perm} – limit and permissible value of the parameter, units of measurement; t – operating time, moto-hour; tm – mikontara life, moto-hour; tk_1 и tk_2 – operating time, moto-hour

ческое отклонение. Дополнительным условием была монотонность кривой, то есть отсутствие каких бы то ни было экстремумов, так как это не приемлемо для процесса изнашивания, износ идет только в одну сторону.

В итоге были получены следующие результаты. На первом месте – парабола, на втором – степенная функция и на третьем – экспонента. Исторически сложилось так, что чаще всего используется степенная функция, предложенная В. М. Михлиным⁶.

Обзор литературы

Применение допусков при диагностировании подробно изложено в исследованиях разработчиков по данной теме [1–3].

Основным специалистом по допускам для сельскохозяйственных машин является ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ».

Здесь разрабатываются методы и средства диагностирования машин, а также стратегии технического обслуживания и ремонта машин, используя разработанные допуски.

В 2018 г. были разработаны два основных стандарта организаций (СТО) по системе допусков: СТО ВИМСТАНДАРТ 005-2018⁷ и СТО ВИМСТАНДАРТ 004-2018⁸.

Первый СТО декларирует алгоритм получения допуска и формулу, его заменяющую. Здесь допуск переменный, учитывающий скорость изнашивания каждой конкретной детали в отдельности. Это позволяет выбраковывать те детали, у которых текущее значение контролируемого параметра превышает допускаемое значение (допуск). Такие детали находятся «за допуском». Они неисправны, и их следует заменить. Если же допуск не превышен, то деталь

⁶ Михлин В. М. Теоретические основы прогнозирования технического состояния...

⁷ СТО ВИМСТАНДАРТ 005-2018. Методика определения системы допусков для деталей сельскохозяйственных машин с учетом скорости их изнашивания.

⁸ СТО ВИМСТАНДАРТ 004-2018. Методика определения основных показателей надежности деталей сельскохозяйственных машин с различной скоростью изнашивания.

«в допуске», она исправна, и ее оставляют в эксплуатации. При этом замене подлежат детали с большой скоростью изнашивания. Они первыми достигают предельного значения, отказывают и первыми подлежат выбраковке. Детали с малой скоростью изнашивания, то есть медленно изнашивающиеся, заменяются в последнюю очередь, дорабатывают до предела и имеют самый большой срок службы. Такой селективный отбор позволяет формировать потоки отказов деталей машин с различной скоростью изнашивания. Это позволяет оптимизировать процесс восстановления замененных деталей по степени их износа. Все процедуры селективного отбора объединены в один общий алгоритм выбраковки с переменным допуском, «реагирующий» на скорость изнашивания. Селективный подбор осуществляется по скорости изнашивания.

Здесь используется переменный допуск взамен постоянного, который не различает скорость изнашивания деталей. Постоянный допуск плохо контролирует отказы деталей с большой скоростью изнашивания и незаслуженно выбраковывает детали с малой скоростью изнашивания, лишая их возможности полностью использовать свой ресурс, то есть доработать до отказа.

Алгоритм выбраковки деталей позволяет заменить одной формулой все процедуры выбраковки деталей и получить значение допуска для деталей с различной скоростью изнашивания.

Второй СТО предназначен для получения основных показателей надежности, то есть вычисления вероятности отказа и среднего срока службы, использует допускаемые значения параметра, полученные в первом СТО. Это хорошее приложение к первому СТО. Вместе они составляют единое целое

для решения задачи надежности сельскохозяйственных машин.

Примеры стратегий, существующих и перспективных систем допусков, приведены в некоторых публикациях [7; 8].

Вместе с ФГБНУ «ГОСНИТИ» похожие работы проводят специалисты ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва». В анализе методов оптимизации допускаемых отклонений параметров они ссылаются на методику определения допусков, разработанную В. М. Михлиным, Ю. Н. Артемьевым⁹ [9], В. Н. Дорогим [2; 3], а также работы таких специалистов, как Л. К. Челпан¹⁰, А. А. Соломашкин [10;11] и других.

Материалы и методы

Для вычисления допуска D разработана компьютерная программа, позволяющая по исходным данным определить этот допуск. Блок-схема программы приведена ниже на рисунке 2. Для примера в качестве объекта были выбраны два ТНВД. Один универсальный топливный насос типа УТН-5, а второй – четырехсекционный малогабаритный топливный насос с механическим регулятором (4МТНМ). ТНВД является объектом, неисправность которого приводит к потере мощности дизеля, перерасходу топлива и плохой экологии в том месте, где работает насос.

Блок 1 – блок начальной, исходной информации. В качестве исходной информации была выбрана пусковая цикловая подача насоса.

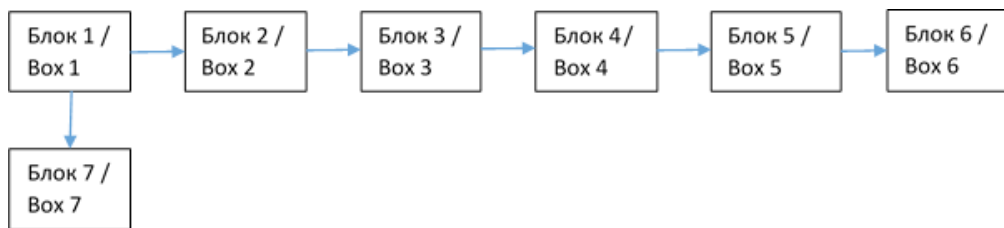
Значение пусковой цикловой подачи плунжерных пар насоса q можно получить, например, путем проведения стендовых, ускоренных износных испытаний на специальных стендах.

Нормативные параметры насоса

Номинальное значение пусковой цикловой подачи насоса $U_{\text{ном}} = 140 \text{ мм}^3/\text{цикл}$. Предельное значение пусковой цикловой подачи насоса

⁹ Артемьев Ю. Н. Качество ремонта и надежность машин в сельском хозяйстве. М.: Колос, 1981. 239 с.

¹⁰ Челпан Л. К. Предельные и допускаемые параметры дизелей, размеры деталей и соединений при ремонте: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1990. 44 с.



Р и с. 2. Блок-схема исследований

F i g. 2. Block diagram of research

$U_{np} = 110 \text{ мм}^3/\text{цикл}$. Время испытаний $t_i = (0, 4, 8, 12, 16, 20, 24)$, стендо-час. Коэффициент ускорения испытаний $Ku = 100$. Результаты таких испытаний для насоса УТН-5 приведены в виде массива q (8×7) на рисунке 3.

В блоке 2 точечные значения контролируемого параметра преобразуются в график на рисунке 4.

Далее в блоке 3 ломаные кривые аппроксимируются гладкой степенной функцией, строится соответствующий график (рис. 5) и определяется среднее значение коэффициента a – показателя степени, степенной функции каждой плунжерной пары насоса. Здесь же устанавливается предельное значение параметра $U_{np} = 110 \text{ мм}^3/\text{цикл}$.

В блоке 4 определяются локальные ресурсы плунжерных пар и строится гистограмма и график закона распределения ресурса насоса.

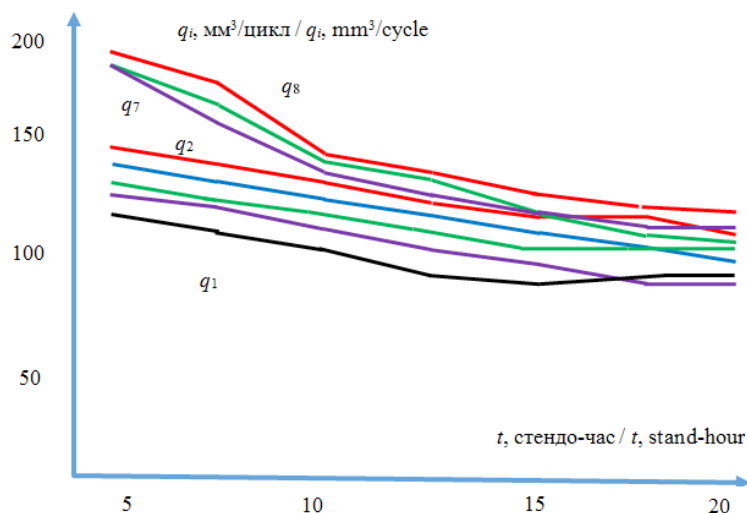
Значения локальных ресурсов каждой плунжерной пары составляют: $Res_i = 1\,943, 2\,983, 2\,440, 2\,441, 1\,138, 1\,631, 2\,127, 3\,877$. Вид графика закона распределения ресурса насоса приведен ниже в (1).

$$Res(t) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma} \cdot \exp \left[\frac{-1}{2 \cdot \sigma^2} \cdot (t - \mu)^2 \right]. \quad (1)$$

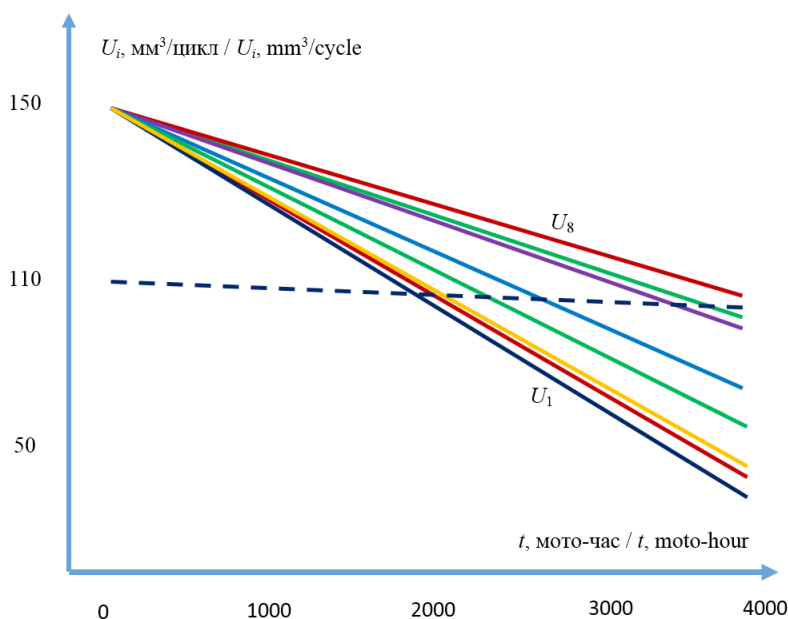
График гистограммы и закона распределения ресурса приведен ниже, на рисунке 6. Здесь $T_{cp} = 2\,322$ мото-часов,

	122,7	115,0	105,5	95,3	89,2	85,1	77,8
	132,3	126,8	122,5	117,1	111,7	105,2	102,0
	127,9	121,8	115,1	108,5	102,0	96,7	90,0
$q =$	125,1	118,4	117,4	106,2	100,1	96,1	86,2
	185,9	175,5	156,6	145,6	135,5	123,0	117,6
	192,3	177,3	173,2	164,2	152,6	144,1	136,7
	173,7	166,9	160,1	155,2	145,2	135,1	130,7
	128,7	120,2	115,4	113,3	108,0	103,6	101,1

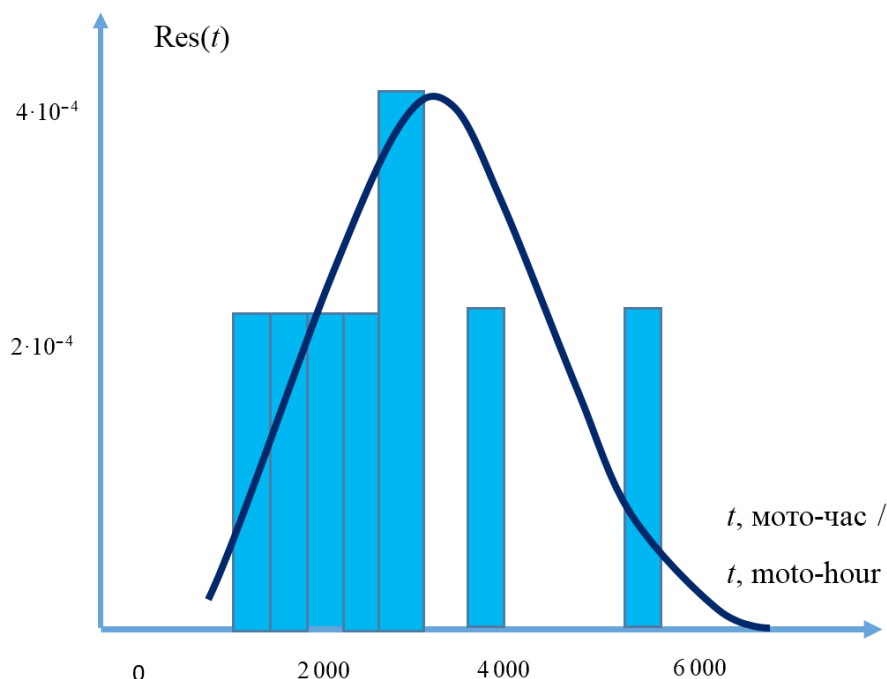
Р и с. 3. Исходные данные насоса УТН-5 – пусковая цикловая подача плунжерных пар: q – пусковая цикловая подача плунжерных пар насоса, $\text{мм}^3/\text{цикл}$ F i g. 3. Input data of UTN-5 pump – starting injection plunger: q – starting injection quantity plunger pump, mm^3/cycle



Р и с. 4. Значения контролируемого параметра пусковой цикловой подачи плунжерных пар насоса. Ломанные кривые: $q_1 \dots q_8$ – пусковая цикловая подача насоса, $\text{мм}^3/\text{цикл}$; t – наработка, стендо-час
 F i g. 4. The values of the controlled parameter starting cycle flow of the pump plunger pairs. Broken curves: $q_1 \dots q_8$ – starting cycle pump flow, mm^3/cycle ; t – time, stand-hour



Р и с. 5. Кривые изнашивания насоса и предельное значение пусковой цикловой подачи плунжерных пар насоса. Гладкие кривые: $U_1 \dots U_8$ – пусковая цикловая подача насоса, $\text{мм}^3/\text{цикл}$; t – наработка, мото-час; 110 – предельное значение подачи, $\text{мм}^3/\text{цикл}$
 F i g. 5. The wear curves of the pump and the limit value of the starting cycle flow of the pump plunger pairs. Smooth curves: $U_1 \dots U_8$ – starting cycle pump flow, mm^3/cycle ; t – operating time, moto-hour; 110 – limit value of flow, mm^3/cycle



Р и с. 6. Гистограмма и закон распределения ресурса насоса: $Res(t)$ – ресурс насоса; t – наработка насоса, мото-час

F i g. 6. Histogram and distribution of the pump resource: $Res(t)$ – pump resource; t – pump operating time, moto-hour

среднее квадратическое отклонение ресурса $\sigma = 840$ мото-часов.

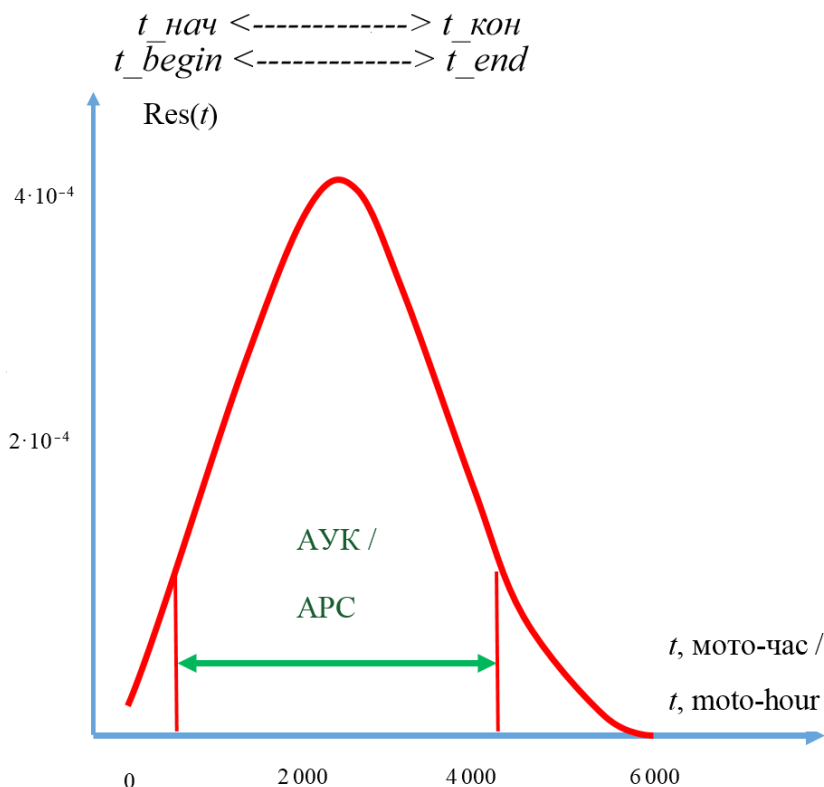
Далее идут блоки определения допусков. В Блоке 5 проводится определение активного участка контроля (АУК) и графика будущих проверок T_k .

АУК устанавливается при условии определения активного участка контроля с известным значением B . Здесь B – это коэффициент доверительной безотказности работы объекта контроля – насоса. Для машиностроения $B = 95\%$, то есть на зону АУК приходится примерно 95 % всех отказов насоса из закона распределения его ресурса.

Так как 95 % составляет ширину наработки в 2σ слева и справа от середины графика ресурса, то левая граница АУК будет $-t_{нач} = T_{cp} - 2 \cdot \sigma$, а правая $-t_{кон} = T_{cp} + 2 \cdot \sigma$. Следовательно, начало участка АУК будет $-t_{нач} = T_{cp} - 2 \cdot \sigma = 2\,333 - 2 \cdot 840 = 642$ мото-часа, а ко-

нец участка АУК – 4 002 мото-часа. Таким образом, весь активный участок контроля АУК, на который приходится 95 % отказов насоса, будет выглядеть так, как на рисунке 7.

Далее, в Блоке 6 задают график проведения проверок насоса T_k и определяют «предельные веерные кривые изнашивания» его плунжерных пар. Сначала определяют коэффициент скорости v_1 , а затем уравнения этих «предельных веерных кривых изнашивания». Зная значения этих кривых, определяют систему допусков (несколько допусков) как значения кривых в соседних точках этих кривых, полученных для значений, соответствующих графику проведения проверок T_k . Для наглядности строят график «веерных кривых» и на этом графике определяют значения допусков (рис. 8). Пример таких вычислений приведен ниже.



Р и с. 7. Активный участок контроля АУК: $Res(t)$ – ресурс насоса;
 $t_{нач}$ и $t_{кон}$ – начало и конец АУК, мото-час; t – наработка, мото-час

Fig. 7. Active phase of control APC: $Res(t)$ – pump resource;
 t_{begin} and t_{end} – start and finish of the APC, moto-hour; t – operating time, moto-hour

Определение «пределных веерных кривых изнашивания» и допусков (2...6). Из графика видно, что:

$$\begin{aligned} veer0(t_0) &= v1_0 \cdot t_0^a + U_{ном} \\ veer0(Tk_1_0) &= 110, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} veer1(t_1) &= v1_1 \cdot t_1^a + U_{ном} \\ veer1(Tk_1_0) &= 124,406, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} veer2(t_2) &= v1_2 \cdot t_2^a + U_{ном} \\ veer2(Tk_1_1) &= 119,541, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} veer3(t_3) &= v1_3 \cdot t_3^a + U_{ном} \\ veer3(Tk_1_3) &= 117,135, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} veer4(t_4) &= v1_4 \cdot t_4^a + U_{ном} \\ veer4(Tk_1_4) &= 115,698. \end{aligned} \quad (6)$$

Результаты исследования

Допуски, полученные графически, приведены на рисунке 8 (7...10).

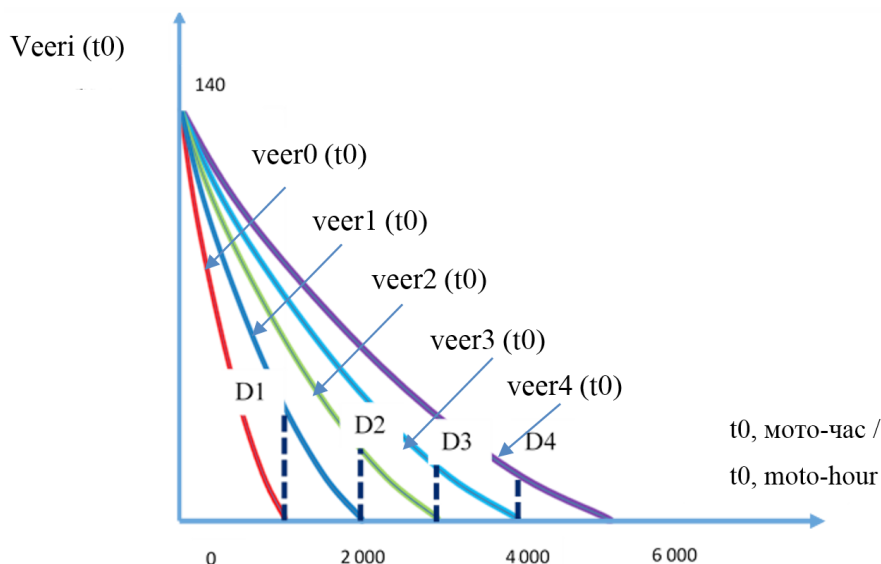
$$D1 = veer1(Tk_1_0) \quad D1 = 124,406, \quad (7)$$

$$D2 = veer2(Tk_1_1) \quad D2 = 119,541, \quad (8)$$

$$D3 = veer3(Tk_1_2) \quad D3 = 117,135, \quad (9)$$

$$D4 = veer4(Tk_1_3) \quad D4 = 115,698. \quad (10)$$

Указанный алгоритм содержит 6 связанных между собой блоков. Это следующие блоки: начальный блок и блок с исходной информацией. Здесь точечную информацию преобразуют в графическую. Далее, по этим данным строятся гистограмма и график закона распределения ресурса диагностируе-



Р и с. 8. График «предельных веерных кривых изнашивания» плунжерных пар насоса и системы допусков, полученные графически D1, D2, D3 и D4: $veer0(t0) \dots veer4(t0)$ – «предельные веерные кривые изнашивания» плунжерных пар насоса, $mm^3/цикл$; система допусков D1...D4, $mm^3/цикл$; $t0$ – наработка, мото-час

F i g. 8. Graph of limit fan wear curves of pump plunger pairs and tolerance systems obtained graphically D1, D2, D3 and D4: $veer0(t0) \dots veer4(t0)$ – limit fan curves of the pump's plunger vapors, $mm^3/cycle$; D1...D4 – tolerance system, $mm^3/cycle$; $t0$ – work, moto-hour

мого объекта. Затем формируется активный участок контроля, на который приходится заданный процент отказов. Далее, на этом участке задается график проведения проверок, строятся нужные (предельные веерные) кривые, и с их помощью графически определяются кривые изнашивания и допуска. В итоге с помощью 6 блоков, содержащих различную информацию, графически определяются допуски.

Блок 7. Для получения этих допусков другим аналитическим способом разработана формула, определяющая эти же допуски аналитически, то есть по формуле, приведенной ниже.

Допуски, полученные по прилагаемой формуле, представляют группу допусков (систему допусков, полученных по формуле 11), заменяя целый алгоритм, состоящий из нескольких (в дан-

ном случае шести), связанных между собой различных блоков¹¹.

$$D(i) = U_{\text{ном}} + (U_{\text{пр}} - U_{\text{ном}}) \cdot \left[\frac{tm0 + (i-1) \cdot tm}{tm0 + i \cdot tm} \right]^{alfa} \cdot (11)$$

Результаты, полученные аналитически (12):

$$D(1) = 127,637 \quad D(2) = 120,852 \\ D(3) = 117,843 \quad D(4) = 116,141. (12)$$

Результаты, полученные графически (13):

$$D(1) = 127,637 \quad D(2) = 119,541 \\ D(3) = 117,135 \quad D(4) = 115,698. (13)$$

¹¹ Формула разработана А. А. Соломашкиным.

Результаты, полученные аналитически, отличаются от результатов, полученных графически, незначительно, на несколько процентов.

Получив систему допусков для этого насоса, можно определить его основные показатели надежности, такие

как вероятность отказа Q и средний срок службы T_{cp} . Результаты расчета приведены в таблице 1.

Локальные и интегральные показатели надежности насоса q , t и Q_1 , T_{cp1} , полученные по методике, изложенной в СТО ВИМСТАНДАРТ 004-2018¹².

Т а б л и ц а 1

Table 1

Расчеты показателей надежности для переменного допуска
Calculations of reliability metrics for variable tolerance

Показатели надежности / Reliability indicators	Формула для вычисления / Formula for calculating	Результат / Result
Вероятность отказа / Probability of failure	$q_{отк1} = \int_0^{tm0} Res(t)dt$	0,020
Вероятность замены / Probability of replacement	$q_{зам1} = \int_0^{Tk_14} Res(t)dt$	0,977
Фактическая вероятность отказа / Actual probability of failure	$Q_{\phi1} = q_{отк1}$	0,020
Общая вероятность отказа / Total probability of failure	$Q_1 = q_{отк1} + q_{зам1}$	0,996
Срок службы отказавших деталей, мото-час / Service life of failed parts, moto-hour	$t_{отк1} = \int_0^{tm0} t Res(t)dt$	8,194
Срок службы предварительно замененных деталей, мото-час / Service life of pre-replaced parts, moto-hour	$t_{зам1} = Tk_10 \cdot \int_{Tk_10}^{Tk_11} Res(t)dt +$ $+ Tk_11 \int_{Tk_11}^{Tk_12} Res(t)dt +$ $+ Tk_12 \int_{Tk_12}^{Tk_13} Res(t)dt +$ $+ Tk_13 \int_{Tk_13}^{Tk_14} Res(t)dt$	1 821
Фактический срок службы, мото-час / Actual service life, moto-hour	$T_{\phi1} = t_{отк1} + t_{зам1}$	1 829
Средний срок службы, мото-час / Average service life, moto-hour	T_{cp}	2 322
Коэффициент вероятности отказа / Failure probability factor	$kQ_1 = \frac{Q_{\phi1}}{Q_1}$	0,020
Коэффициент срока службы / Service life factor	$kT_1 = \frac{T_{\phi1}}{T_{cp}}$	0,788

¹² СТО ВИМСТАНДАРТ 004-2018. Методика определения основных показателей надежности деталей...

Здесь расчеты приведены для переменного допуска.

Расчеты в таблице показывают, что для этого насоса при среднем сроке службы 2 322 мото-часов фактический срок службы равен 1 829 мото-часов, или 78,8 % от среднего, а вероятность отказа составляет 0,02, что является весьма незначительным для данного экземпляра.

Для сравнения результатов расчета дополнительно приведены исследования по определению системы допусков для другого типа ТНВД – 4МТНМ. Результаты приведены ниже.

Исходные данные насоса 4МТНМ:

$$T_{\text{ср}} = 9450 \quad \sigma = 500. \quad (14)$$

$$U_{\text{ном}} = 173 \quad U_{\text{пр}} = 135 \quad tm_0 = 7\,800 \\ tm = 500 \quad a = 1,822. \quad (15)$$

Определение допускаемых значений параметра Di для данного графика проверок (16; 17). Допускаемые значе-

ния параметра Di (18; 19), полученные графически (рис. 9):

$$D1 = 139,043 \quad D2 = 138,819 \\ D3 = 138,618 \quad D4 = 138,438. \quad (16)$$

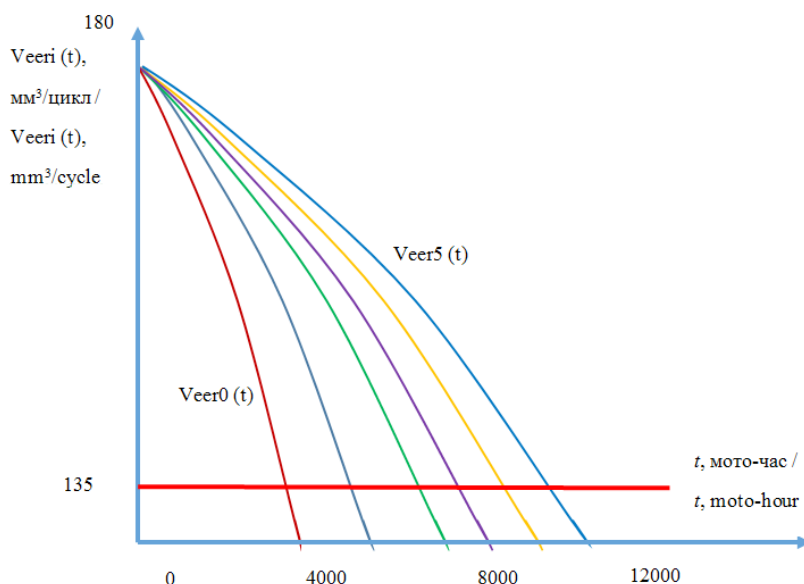
$$D5 = 138,274 \quad D6 = 138,126 \\ D7 = 137,990 \quad D8 = 137,833. \quad (17)$$

Допускаемые значения параметра Di , полученные по приведенной формуле (11), указаны ниже в (18; 19):

$$D(1) = 139,043 \quad D(2) = 138,819 \\ D(3) = 138,618 \quad D(4) = 138,438. \quad (18)$$

$$D(5) = 138,274 \quad D(6) = 138,126 \\ D(7) = 137,990 \quad D(8) = 137,866. \quad (19)$$

На рисунке 9 приведены «предельные веерные кривые изнашивания» плунжерных пар насоса ТНВД – 4МТНМ, мм³/цикл, (типа 2...6), а также



Р и с. 9. «Предельные веерные кривые изнашивания» плунжерных пар насоса ТНВД – 4МТНМ, мм³/цикл; 135 – предельное значение цикловой подачи, мм³/цикл
F i g. 9. “Limiting fan curves of wear” of TNVD pump plunger pairs – 4MTHM, mm³/cycle; 135 – cycle limit, mm³/cycle

предельное значение цикловой подачи – 135 мм³/цикл.

На рисунке 10 показан способ определения допускаемых значений параметра $D1$ (139,0 мм³/цикл) и $D5$ (138,2 мм³/цикл).

Анализируя формулы (16; 17) и (18; 19), можно сделать вывод о том, что чем меньше коэффициент вариации ресурса, чем дальше график закона распределения ресурса находится от начала координат, тем меньше отличия между значениями допусков, полученных графически и аналитически. Дополнительно для указанного случая, когда скорость изнашивания деталей остается примерно постоянной, допуски можно определять, используя постоянную допуска $D = 138$ (для описанного случая).

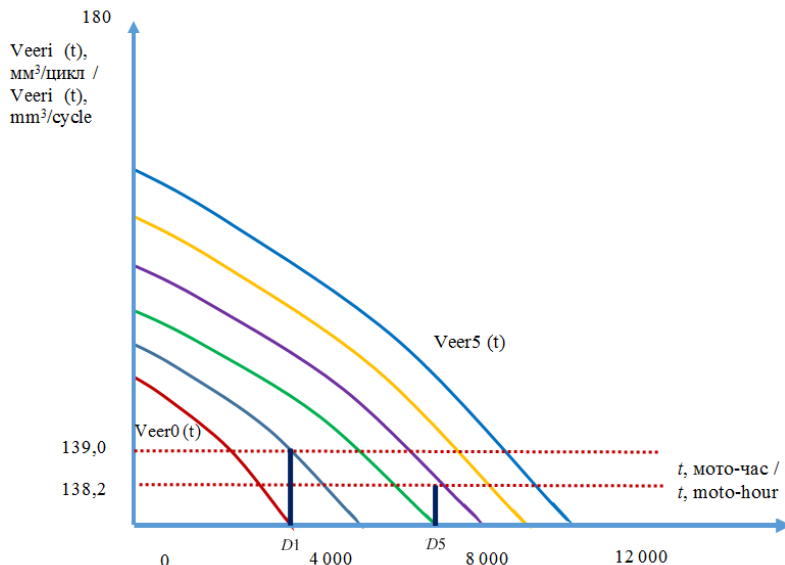
Обсуждение и заключение

Допуски в ТОР являются составной частью диагностической системы, ее заключительной частью, завершающим этапом в определении исправности деталей машин. Это ограничения,

накладываемые на изменения паспорта транспортного средства (ПТС) деталей машин, находящихся в эксплуатации. Если эти ограничения превышают нормативные допуски, то вероятность отказа детали машины очень высокая, то есть за допуском, но меньше предельной, такую деталь следует заменить, так как она не доработает до следующей межконтрольной проверки. Она считается неисправной.

В качестве допуска используются либо значения, полученные в алгоритме определения системы допусков, либо специально разработанная функция, заменяющая его и определяющая значения допуска при заданной наработке детали.

Итак, если в результате диагностирования значение контролируемого параметра превысило установленный заранее допуск, то считается, что такая деталь «вышла за допуск» и является неисправной. И наоборот, если значение контролируемого параметра



Р и с. 10. Система допусков для насоса 4МТНМ: $Veeri(t)$ – «предельные веерные кривые изнашивания» плунжерных пар насоса ТНВД – 4МТНМ, мм³/цикл; $D1, D5$ – допускаемые значения

F i g. 10. The system of tolerances for 4MTHM pump: $Veeri(t)$ – “limit fan curves of wear” of the TNVD pump plungers – 4MTHM, mm³/cycle; $D1; D5$ – value allowed

«в допуске», то есть оно не превысило допуск, то такая деталь считается исправной и работоспособной.

В состав этой системы допусков входят: номинальное $U_{\text{ном}}$, допускаемое $D_{\text{доп}}$ и предельное значение $U_{\text{пр}}$ контролируемого параметра, а также график проведения проверок ПТС – $Tki = \{tki\}$ и уравнение кривой изнашивания, например, $U(t) = \Delta U + v \cdot t^a$, где $U(t)$ – ресурсный параметр (износ); ΔU – показатель приработки; t – наработка; v – скорость изнашивания; a – показатель степени степенной кривой изнашивания.

Такая система наиболее эффективна при ресурсном диагностировании. Она позволяет оценить исправность и срок

службы деталей машины за весь срок ее эксплуатации. Система считается ресурсосберегающей, так как при ее использовании резко сокращается число отказов в эксплуатации. Способ задания и использования такой ресурсосберегающей системы допусков представлен в существующих методиках.

Приведены примеры алгоритма и компьютерных программ применительно к двум ТНВД. Результаты вычисления системы допусков, полученные при помощи алгоритма и разработанной функции, отличаются незначительно, на 2...3 %, что свидетельствует о минимальной погрешности определения системы допусков.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Михлин, В. М.** Метод определения допускаемых износов деталей, обеспечивающий повышение их безотказности / В. М. Михлин, В. Н. Дорогой // Вестник машиностроения. – 2008. – № 7. – С. 11–14. URL: <https://www.mashin.ru/files/ve708.pdf> (дата обращения: 19.02.2020)
2. **Дорогой, В. Н.** Новая методика определения допускаемых износов деталей и соединений машин / В. Н. Дорогой // Машинно-технологическая станция – МТС. – 2008. – № 3. – С. 5–10.
3. **Дорогой, В. Н.** Алгоритм ресурсосберегающей методики определения и оценки допускаемых износов / В. Н. Дорогой, В. М. Михлин // Труды ГОСНИТИ. – 2008. – Т. 102. – С. 191–194.
4. **Зиченков, М. Ч.** Новый подход к созданию легких и надежных силовых композитных авиаконструкций / М. Ч. Зиченков, И. О. Кондаков, А. Н. Шаныгин // Научный вестник МГТУ ГА. – 2016. – Т. 19, № 6. – С. 127–136. URL: <https://avia.mstuca.ru/jour/article/view/994> (дата обращения: 19.02.2020) – Рез. англ.
5. **Мартышкин, А. П.** Анализ обоснования предельных параметров элементов машин и получение практической формулы определения предельных отклонений параметров с заданной безотказностью / А. П. Мартышкин, С. Е. Маскайкина, Н. И. Полуешина [и др.] // Интернет-журнал «Науковедение». – 2015. – Т. 7, № 2. – С. 109. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/33TVN215.pdf> (дата обращения: 19.02.2020) – Рез. англ.
6. **Соломашкин, А. А.** Выбор аппроксимирующей функции для описания кривой изнашивания деталей машин / А. А. Соломашкин // Международный научный журнал. – 2011. – № 4. – С. 104–108. – Рез. англ.
7. **Казакова, В. А.** Стандарты организаций – стимулятор инновационного развития АПК / В. А. Казакова, В. А. Шинкевич // Стандарты и качество. – 2019. – № 6. – С. 52–54.
8. **Кокорева, Е. Б.** Повышение эффективности использования сельскохозяйственной техники / Е. Б. Кокорева // Бюллетень науки и практики. – 2018. – Т. 4, № 2. – С. 320–325. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-ispolzovaniya-selskohozyaystvennoy-tehniki> (дата обращения: 19.02.2020) – Рез. англ.
9. **Артемов, Ю. Н.** Методика расчета допускаемых при ремонте размеров и натягов тракторных двигателей и сопряжений / Ю. Н. Артемов // Труды ГОСНИТИ. – 1994. – Т. 4. – С. 3–20.

10. Соломашкин, А. А. Стратегии технического обслуживания и ремонта машин / А. А. Соломашкин // Труды ГОСНИТИ. – 2017. – Т. 128. – С. 145–151. URL: http://vimtsm.ru/wp-content/uploads/2019/03/128_2017.pdf (дата обращения: 19.02.2020) – Рез. англ.

11. Черноиванов, В. И. Алгоритм сравнения двух систем допусков / В. И. Черноиванов, В. А. Денисов, А. А. Соломашкин // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2019. – № 2. – С. 49–54. URL: <https://panor.ru/articles/algorithm-sravneniya-dvukh-sistem-dopuskov/2956.html> (дата обращения: 19.02.2020) – Рез. англ.

Поступила 10.07.2019; принята к публикации 15.10.2019; опубликована онлайн 31.03.2020

Об авторах:

Денисов Вячеслав Александрович, руководитель научного направления «Обеспечение надежности сельскохозяйственной техники» ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: T-4062-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3245-394X>, va.denisov@mail.ru

Соломашкин Алексей Алексеевич, ведущий специалист ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), Researcher ID: Y-8907-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0781-4715>, littor2013@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

В. А. Денисов – формулирование основной концепции исследования и структуры статьи; А. А. Соломашкин – участие в теоретических и практических исследованиях, обработка экспериментальных данных, литературный и патентный анализ, подготовка текста статьи, формирование выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Mikhlin V.M., Dorogoy V.N. Determination Method of Details Allowable Wear Ensuring the Improvement of Their Unfailing Performance. *Vestnik mashinostroeniya* = Russian Engineering Research. 2008; (7):11-14. Available at: <https://www.mashin.ru/files/ve708.pdf> (accessed 19.02.2020). (In Russ.)
2. Dorogoy V.N. New Method for Determining Permissible Wear on Machine Parts and Connections. *Mashinno-tekhnologicheskaya stantsiya – MTS* = Machine Technological Station – MTS. 2008; (3):5-10. (In Russ.)
3. Dorogoy V.N., Mikhlin V.M. Algorithm of the Resource-Saving Method for Determining and Assessing Permissible Wear and Tear. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2008; 102:191-194. (In Russ.)
4. Zichenkov M.Ch., Kondakov I.O., Shanygin A.N. Novel Approach to Design of Lightweight and Reliable Composite Primary Aircraft Structures. *Nauchnyy vestnik MGTU GA* = Civil Aviation High Technologies. 2016; 19(6):127-136. Available at: <https://avia.mstuca.ru/jour/article/view/994> (accessed 19.02.2020). (In Russ.)
5. Martyshkin A.P., Maskaykina S.E., Polueshina N.I., et al. Analysis of Machines' Elements Limit Value Parameter Justification with Derivation of Practical Formula to Find Limit Declination of the Parameter with Given Reliability. *Internet-zhurnal "Naukovedenie"* = Sociology of Science Internet Journal. 2015; 7(2):109. Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/33TVN215.pdf> (accessed 19.02.2020). (In Russ.)
6. Solomashkin A.A. Choosing Approximating Functions for Describing Machinery Parts Wear Curve. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal* = International Scientific Journal. 2011; (4):104-108. (In Russ.)
7. Kazakova V.A., Shinkevich V.A. Corporate Standards: a Driver for Innovative Agribusiness Development. *Standarty i kachestvo* = Standards and Quality. 2019; (6):52-54. (In Russ.)



8. Kokoreva E.B. The Improved Utilization of Agricultural Machinery. *Byulleten nauki i praktiki* = Bulletin of Science and Practice. 2018; 4(2):320-325. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-ispolzovaniya-selskohozyaystvennoy-tehniki> (accessed 19.02.2020). (In Russ.)
9. Artemev Yu.N. Methodology for Calculating the Permissible Repair Dimensions and Tensions of Tractor Engines and Couplings. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 1994; 4:3-20. (In Russ.)
10. Solomashkin A.A. Strategies for Maintenance and Repair of Machines. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2017; 128:145-151. Available at: http://vintsm.ru/wp-content/uploads/2019/03/128_2017.pdf (accessed 19.02.2020). (In Russ.)
11. Chernovanov V.I., Denisov V.A., Solomashkin A.A. An Algorithm for Comparing the Two Systems of Tolerances. *Selskokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont* = Agricultural Machinery: Maintenance and Repair. 2019; (2):49-54. Available at: <https://panor.ru/articles/algorithm-sravneniya-dvukh-sistem-dopuskov/2956.html> (accessed 19.02.2020). (In Russ.)

Received 10.07.2019; revised 15.10.2019; published online 31.03.2020

About the authors:

Viatcheslav A. Denisov, Head of Scientific Direction “Ensuring the Reliability of Agricultural Machinery”, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: T-4062-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3245-394X>, va.denisov@mail.ru

Aleksey A. Solomashkin, Leading Specialist of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Researcher ID: Y-8907-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0781-4715>, littor2013@gmail.com

Contribution of the authors:

V. A. Denisov – formulation of the basic research concept, article structure development; A. A. Solomashkin – participation in theoretical and practical research, processing of experimental data, literary and patent analysis, article text development, drawing conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.



Энергетическая эффективность предварительной обработки синтетического субстрата метантенка в аппарате вихревого слоя

А. А. Ковалев*, Д. А. Ковалев, В. С. Григорьев
ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»
(г. Москва, Россия)

*kovalev_ana@mail.ru

Введение. Переработка органических отходов для снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду остается актуальной задачей, одним из способов решения которой является использование методов биоконверсии органического вещества органических отходов с получением газообразного энергоносителя и высококачественных органических удобрений. Одной из важнейших стадий анаэробной переработки органических отходов в биореакторах является стадия предварительной подготовки отходов к сбраживанию, которую возможно осуществить рядом методов. Однако в доступной научно-технической литературе сведения о предварительной обработке субстратов в аппарате вихревого слоя представлены в малом количестве. Целью работы является определение энергетической эффективности процесса предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя перед анаэробным сбраживанием.

Материалы и методы. Для исследования процесса предварительной обработки органических отходов создана экспериментальная установка. Субстратом для обработки в аппарате вихревого слоя служила смесь модели органической фракции твердых коммунальных отходов и воды холодного водоснабжения в соотношении 300 г/л.

Результаты исследования. Проведенные расчеты подтвердили, что условие энергетической эффективности процесса предварительной обработки субстрата метантенка соблюдается, несмотря на дополнительные затраты на электрическую энергию в ходе интеграции этой стадии в систему анаэробной переработки.

Обсуждение и заключение. Интеграция процесса предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя перед сбраживанием в анаэробных биореакторах в систему анаэробной обработки органических отходов позволяет повысить как энергетическую эффективность системы, так и степень анаэробного разложения органического вещества органических отходов. Удельное количество энергии биогаза, полученного в процессе сбраживания в анаэробных биореакторах с применением предварительной обработки субстрата в аппарате вихревого слоя, полностью компенсирует затраты энергии на предварительную обработку субстрата в аппарате вихревого слоя. Практическая значимость работы обусловлена повышением удельного выхода товарной энергии на 70 % по сравнению с анаэробной обработкой в традиционных метантенках.

Ключевые слова: анаэробная обработка, аппарат вихревого слоя, энергетическая эффективность, биоконверсия органических отходов, предварительная обработка органических отходов

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке ФГБУ «Российский фонд фундаментальных исследований» в рамках научного проекта № 18-29-25042.

© Ковалев А. А., Ковалев Д. А., Григорьев В. С., 2020



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

Для цитирования: Ковалев, А. А. Энергетическая эффективность предварительной обработки синтетического субстрата метантенка в аппарате вихревого слоя / А. А. Ковалев, Д. А. Ковалев, В. С. Григорьев. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202001.092-110 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 92–110.

Energy Efficiency of Pretreatment of Digester Synthetic Substrate in a Vortex Layer Apparatus

A. A. Kovalev*, D. A. Kovalev, V. S. Grigoriev

Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russia)

*kovalev_ana@mail.ru

Introduction. Processing organic waste to reduce the anthropogenic impact on the environment remains an urgent task, one of the ways to solve which is the use of methods for bioconversion of organic matter of organic waste to produce gaseous energy carrier and high-quality organic fertilizers. One of the most important stages of anaerobic processing of organic waste in bioreactors is the stage of preliminary preparation of waste for fermentation, which can be carried out by a number of methods. However, the technical literature does not pay enough attention to the use of devices with a vortex layer for the preliminary processing of substrates. The aim of the work is to determine the energy efficiency of the organic waste pretreatment process in the vortex layer apparatus before anaerobic digestion.

Materials and Methods. An experimental installation was developed to study the process of organic waste pretreatment. A mixture of organic fraction of municipal solid waste and tap water in the ratio of 300 g/l served as a substrate for treatment in the vortex layer apparatus.

Results. The calculations confirmed that the condition for energy efficiency of processing substrate pretreatment of methane is met, despite the additional cost of electrical energy during the integration of this stage in the system of anaerobic processing.

Discussion and Conclusion. Integration of the process of organic waste pretreatment in the vortex layer apparatus before fermentation in anaerobic bioreactors into the system of anaerobic treatment of organic waste can improve both the energy efficiency of the system and the level of anaerobic decomposition of organic matter of waste. The specific amount of biogas energy produced in the digestion process in an anaerobic bioreactor with pretreatment of the substrate in the apparatus of the vortex layer fully compensates the energy cost of pre-treatment of the substrate in the vortex layer apparatus. The practical significance of the work is confirmed by an increase in the specific yield of commercial energy by 70% compared to anaerobic treatment in traditional methane tanks.

Keywords: anaerobic treatment, vortex layer apparatus, energy efficiency, bioconversion of organic waste, pretreatment of organic waste

Funding: The publication was prepared with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, research project No. 18-29-25042.

For citation: Kovalev A.A., Kovalev D.A., Grigoriev V.S. Energy Efficiency of Pretreatment of Digester Synthetic Substrate in a Vortex Layer Apparatus. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(1):92-110. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.092-110>

Введение

«Возникновение и обострение экологических проблем, связанных с утилизацией навоза на животноводческих фермах, рост цен на отдельные энер-

горесурсы обусловили значительный интерес к использованию технологии анаэробного сбраживания навоза, при которой обеспечивается его обезвреживание, сохранение удобрительных

свойств и получение энергии в виде биогаза. В этой связи весьма перспективно использование методов биологической конверсии органических отходов с получением биогаза и органических удобрений при одновременном решении ряда вопросов охраны окружающей среды от загрязнения»¹.

В работах ряда исследователей показано, что биомасса содержит различные органические компоненты [1–4] и может быть преобразована в энергетические носители различных фазовых состояний: от твердых и жидких [5–8] до биогаза [9; 10].

Одной из лимитирующих стадий в технологии анаэробной переработки органических отходов является предварительная обработка (подготовка) отходов к сбраживанию. Ее основные задачи:

1. Отделение грубых включений (камни, доски, крупный мусор и т.п.) для исключения поломок перемешивающего оборудования, засорения трубопроводов.

2. Гомогенизация смеси и частичный гидролиз, позволяющие обеспечить доступ питательных веществ к микроорганизмам, перевести часть органического вещества, содержащегося в исходных органических отходах, в растворимую форму, из которой и образуется биогаз.

3. Нагрев смеси до температуры процесса для снижения колебания температуры в биореакторе при загрузке субстрата.

Для предварительной обработки используется различное оборудование, которое, как правило, обладает значительной энергоемкостью (сита, центрифуги, измельчители, гомогенизаторы, теплообменники). В связи с этим разработка новых технических способов и решений для предварительной под-

готовки органических отходов к анаэробной биоконверсии органического вещества органических отходов является актуальной научно-технической и инженерной задачей.

«В настоящее время существует множество вариантов предварительной обработки органических отходов перед анаэробным сбраживанием, различающихся по своей эффективности и энергопотреблению» [5].

Использование биологических методов позволяет получить из биомассы продукты жизнедеятельности анаэробных микроорганизмов, включающие в себя сброженный осадок и биогаз (газообразный энергоноситель). Сброженный осадок в некоторых случаях можно использовать для получения дополнительного количества биогаза с помощью микробиологических процессов. Стоки пищевой промышленности богаты биоразлагаемыми органическими веществами, которые являются превосходным субстратом для микроорганизмов [11–13].

В работах С. Д. Варфоломеева и коллег показано, что микробиологическое конвертирование биомассы в анаэробных условиях, в том числе и для получения биогаза, – это биохимический процесс, суть которого заключается в переносе электронов на отличные от кислорода акцепторы с образованием восстановленных веществ: спиртов, кетонов, органических кислот, сероводорода, водорода, метана [14; 15]. Особый интерес представляет получение газообразного топлива – водорода и метана. Расчеты показывают, что эффективность запасаения энергии в водороде при брожении не превышает 20–30 %, тогда как в метан переходит более 80 % энергии, первоначально заключенной в исходных органических веществах.

¹ Биотехнология и микробиология анаэробной переработки органических коммунальных отходов: коллективная монография / под общ. ред. А. Н. Ножевниковой. М.: Университетская книга, 2016. 320 с. URL: http://www.logosbook.ru/books/nojevnikova_-_biotehnologiya.pdf (дата обращения: 20.02.2020).

Практически любое органическое сырье, за исключением необработанных лигнина и восков, может быть подвергнуто метановому брожению² [16; 17].

Известен ряд методов предобработки органических отходов перед анаэробной обработкой в биореакторах, однако в доступной научно-технической литературе сведения о применении аппаратов вихревого слоя для предварительной обработки субстратов представлены недостаточно.

Для изучения влияния предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя на интенсификацию процесса анаэробной биоконверсии органических отходов сельского хозяйства в лаборатории биоэнергетических и сверхкритических технологий ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» был проведен ряд экспериментальных исследований.

Цель настоящей работы – определение энергетической эффективности процесса предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя перед анаэробным сбраживанием.

Обзор литературы

К жидким органическим отходам, наиболее часто используемым в качестве субстрата для анаэробной переработки, относятся сточные воды пищевой промышленности, навозные стоки и жидкий навоз (помет), осадки и избыточные активные илы станций механико-биологической очистки коммунальных сточных вод.

Основной лимитирующей стадией метанового сбраживания органического вещества органических отходов является гидролиз твердых веществ,

содержащихся в органических отходах, и небольшого количества растворенного органического вещества (ОВ). Растворимые органические соединения, которые далее могут быть преобразованы в биогаз, образуются в органических отходах в процессе гидролиза. Поэтому выход биогаза при сбраживании органических отходов находится в прямой зависимости от способности отходов к биологическому разложению и, соответственно, от скорости гидролиза. Одним из способов повышения биодоступности органических отходов является их предварительная обработка перед сбраживанием в метантенках. Предварительная обработка осадка позволяет солубилизовать твердые частицы осадков, а также частично разложить образующиеся органические полимеры до мономеров и димеров³.

Известен ряд методов предобработки органических отходов, среди которых выделяют различные способы гидролиза (кислотный, щелочной, термощелочной и термогидролиз), механическую и ультразвуковую предварительную обработку, а также их комбинации. Методы предварительной обработки органических отходов можно подразделить на:

- термические: исходный субстрат подвергается воздействию высоких температур (100–180 °C);

- химические: исходный субстрат подвергается химическому воздействию кислот или щелочей, а также окислителей;

- термохимические;

- механические: исходный субстрат подвергается механическому воздействию в различных технических средствах (шаровые мельницы, насосы высокого давления, лизирующие цент-

² Модификация лигнина аминированием / С. В. Хитрин [и др.] // Теоретическая и экспериментальная химия глазами молодежи: тезисы докладов всероссийской научной конференции, 23–26 мая 2013 г. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. С. 151–152. URL: http://chem.isu.ru/ru/science/conf/docs/thgm_2013.pdf (дата обращения: 20.02.2020).

³ Биотехнология и микробиология анаэробной переработки органических коммунальных отходов...

рифуги, устройства обработки ультразвуком);

– биологические: исходный субстрат подвергается воздействию препаратов ферментов или микроорганизмов гидролитиков [5; 18–20].

«Наиболее распространенный метод – термогидролиз осадка – обеспечивает разрушение устойчивого органического вещества органических отходов перед их обработкой в метантенках» [21]. Применение этого метода позволяет повысить глубину распада беззольного вещества (БВ) и выход биогаза на 30 % [22]. «Метод термогидролиза представляет собой упрощенную версию устаревшего метода теплового кондиционирования осадка, одним из недостатков которого было образование большого количества бионеразлагаемых окрашенных соединений (refractory compounds) – продуктов взаимодействия белков и углеводов, выделяющихся при термогидролизе» [23].

«Несмотря на высокую степень разрушения клеток активного ила, термохимическая обработка недостаточно распространена в связи с высокими затратами на реагенты. Механическая предобработка направлена на измельчение твердых частиц, однако применение данной технологии влечет за собой значительные энергетические затраты. Мировая практика показывает, что ультразвуковая предобработка осадка сточных вод считается одним из новых перспективных методов повышения биodeградируемости осадков и выхода биогаза в процессе анаэробного сбраживания» [24]. Согласно мнению ряда исследователей, применение ультразвуковой предобработки позволяет повысить глубину распада беззольного вещества на 10–56 % в зависимости от условий обработки [18–20]. Однако ультразвуковая предобработка также является энергоемкой технологией. В АО «Мосводоканал» проведен сравнительный анализ мето-

дов предобработки осадка (активного ила, первичного осадка и их смеси) Курьяновских очистных сооружений. Результаты определения эффективности методов предобработки активного ила представлены в таблице 1. В качестве критерия оценки эффективности выбрано отношение полученной энергии к затраченной при различных методах предобработки. Наиболее эффективными были признаны методы термогидролиза и ультразвуковой обработки [5].

Аэробная предварительная обработка как метод интенсификации стоит несколько отдельно от вышеперечисленных, так как помимо главного положительного эффекта – биологического нагрева органического субстрата до мезофильных или термофильных температур – он обладает следующими дополнительными преимуществами:

– относительно высокой скоростью гидролиза органического вещества (константа гидролиза при аэробной обработке $r_v = 0,12 \text{ сут}^{-1}$; для анаэробных условий данный показатель составляет $0,06 \text{ сут}^{-1}$; для аноксидных – $0,03 \text{ сут}^{-1}$) [25], при этом скорость гидролиза возрастает в соответствии с уравнением Вант-Гоффа по мере роста температуры;

– увеличивает, в среднем на 10–15 %, значение pH субстрата [26; 27];

– изменяет гранулометрический состав субстрата в сторону увеличения доли тонко- и среднедисперсных частиц [26].

В силу указанных причин ведущие специалисты по анаэробной переработке органических отходов выделили сопряжение аэробного и анаэробного процессов как отдельное направление развития [28].

Материалы и методы

Из работы Н. В. Лимаренко видно, что аппарат вихревого слоя (АВС) представляет собой устройство, использующее энергию вращающегося электромагнитного поля высокой удельной

Сравнительная оценка затраченной и полученной энергии от биогаза при различных методах предобработки активного ила**Comparative evaluation of energy consumed and received from biogas in different methods of activated sludge pretreatment**

Метод предобработки / Pretreatment methods	Показатель / Indicator		
	Полученная энергия, ккал/л / Received energy, kcal/l	Затраченная энергия, ккал/л / Expended energy, kcal/l	Отношение полученной энергии к затраченной / Ratio of received energy to spent energy
Без обработки / Without pretreatment	71	53	1,36
Кислотный гидролиз / Acid hydrolysis	71	673	0,11
Щелочной гидролиз / Alkaline hydrolysis	76	1 878	0,04
Термощелочной гидролиз / Thermal alkaline hydrolysis	83	1 880	0,04
Термогидролиз / Thermal hydrolysis	84	54	1,55
Механическое измельчение/ Mechanical grinding	73	120	0,61
Ультразвук, 100 Вт·ч/л / Ultrasound, 100 Wh/l	82	283	0,30
Ультразвук, 30 Вт·ч/л / Ultrasound, 30 Wh/l	79	122	0,65
Ультразвук, 3 Вт·ч/л / Ultrasound, 3 Wh/l	81	59	1,37

концентрации на единицу объема обрабатываемого вещества⁴.

АВС представляет собой полый цилиндр диаметром 50–150 мм, изготовленный из неферромагнитного материала и помещенный в индуктор. В качестве индуктора, как правило, применяется статор асинхронного электродвигателя. В полом цилиндре на исходный субстрат воздействуют электромагнитное поле, создаваемое обмотками индуктора, и интенсивно движущиеся ферромагнитные тела, движение которых хаотично, причем направление движения они меняют с частотой, равной частоте тока, подаваемого на обмотки индуктора.

При этом величину силы тока, подаваемого на обмотки статора, ограничивают в соответствии с характеристиками индуктора. Так что в тех зонах полого цилиндра, где возникают электромагнитные поля, в буквальном смысле создается вихревой слой, из-за чего рассматриваемые аппараты и получили свое название. В этом слое реализуются все возможные виды воздействия на измельчаемый материал: удар, истирание, кавитация, даже происходит электролиз, если в системе есть вода⁵.

В рабочую зону АВС помещаются ферромагнитные рабочие тела, которые под воздействием вращающегося элек-

⁴ Лимаренко Н. В. Обоснование параметров активатора обеззараживания стоков животноводческих предприятий: дис. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2018. 160 с.

⁵ Там же.

ромагнитного поля вращаются вокруг своей наименьшей оси со скоростью, близкой к скорости вращения магнитного поля, одновременно перемещаются по рабочей зоне. Таким образом, каждое ферромагнитное рабочее тело является своеобразной мешалкой, которая приводит к быстрому перемешиванию и диспергированию компонентов.

При такой обработке достигаются следующие положительные эффекты:

1. Тонкодисперсное измельчение, позволяющее улучшить реологические свойства субстрата, а также обеспечить нагрев субстрата при одновременном частичном гидролизе сложных органических соединений, что приводит к улучшенной доступности питательных веществ для микроорганизмов⁶.

2. Внесение в субстрат ферромагнитных частиц истираемых рабочих тел (стальные иглы), что позволяет сократить продолжительность периода запуска биореактора, а также обеспечить более полное разложение субстрата и снижение необходимого объема биореактора, что, в свою очередь, увеличивает скорость образования и конечный выход метана, при одновременном повышении адаптивной способности микробного сообщества к неблагоприятным условиям (снижение pH при избыточном накоплении летучих жирных кислот (ЛЖК) или водорода)⁷.

Для исследования процесса предварительной обработки органических отходов в лаборатории биоэнергетических и сверхкритических технологий ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» создана экспериментальная установка – аппарат вихревого магнитного слоя. Внешний

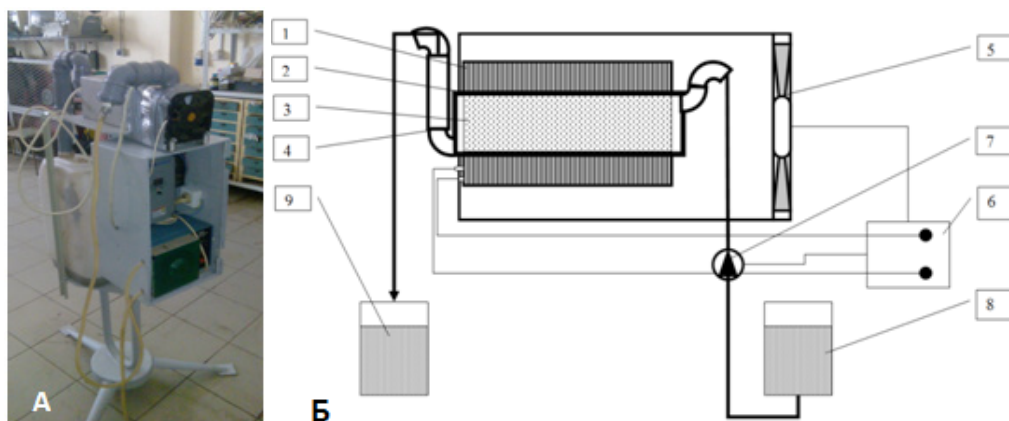
вид и технологическая схема экспериментальной установки представлены на рисунке 1.

Установка работает следующим образом. В емкость исходного продукта загружаются жидкие органические отходы. Насос прокачивает смесь со скоростью 2 л/мин по рабочей камере. В рабочую камеру предварительно внесены истираемые рабочие тела (стальные иглы) 3, которые под воздействием электромагнитного поля, создаваемого индуктором, совершают хаотичные движения. Электромагнитное поле вращается с частотой, отличной от промышленной (свыше 50 Гц, но не более 120 Гц) за счет использования частотного преобразователя, смонтированного в шкафу управления. При этом частотный преобразователь ограничивает силу тока, подаваемого в индуктор. Для охлаждения индуктора применяется вентилятор воздушного охлаждения. Предварительно обработанный субстрат после прохождения по рабочей камере через патрубок выгрузки сливается в емкость. Техническая характеристика экспериментальной установки приведена в таблице 2.

Субстратом для обработки в аппарате вихревого слоя служила смесь модели органической фракции твердых коммунальных отходов (комбикорм К-65) и водопроводной воды в соотношении 300 г/л. Субстрат изготавливался следующим образом: навеску гранулированного комбикорма заливали теплой (45 °С) водопроводной водой и выдерживали для набухания гранул в течение 2 ч при комнатной температуре. Обработку в АВС проводили с различным временем пребывания смеси воды

⁶ Там же; Логвиненко Д. Д., Шеляков О. П. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем. Киев: Техника, 1976. 113 с.

⁷ Лимаренко Н. В. Обоснование параметров активатора обеззараживания стоков животноводческих предприятий; Логвиненко Д. Д., Шеляков О. П. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем; Адошев А. И. Ферровихревой аппарат для обеззараживания жидкого свиного навоза: дис. ... канд. техн. наук. Ставрополь, 2011. 190 с.



Р и с. 1. Общий вид и технологическая схема экспериментальной установки по предобработке органических отходов в аппарате вихревого слоя перед анаэробным сбраживанием:

1 – индуктор; 2 – рабочая камера; 3 – стальные иглы; 4 – патрубок выгрузки;
5 – вентилятор воздушного охлаждения; 6 – шкаф управления с частотным преобразователем;
7 – перистальтический насос; 8 – емкость исходного продукта;
9 – емкость обработанного продукта

F i g. 1. General view and technological scheme of the experimental plant for pretreatment of organic waste in the vortex layer apparatus before anaerobic digestion: 1 – inductor; 2 – working chamber; 3 – steel needles; 4 – discharge pipe; 5 – air cooling fan; 6 – control box with frequency converter; 7 – peristaltic pump; 8 – initial product tank; 9 – processed product tank

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

Техническая характеристика установки
Technical characteristics of the installation

Показатели / Indicator	Значение / Value
Напряжение питания, В / Supply voltage, V	380
Объем камеры, дм ³ / Chamber volume, dm ³	0,5
Материал камеры / Chamber material	полипропилен / polypropylene
Общая масса рабочих тел, г / Total mass of working bodies, g	100
Диаметр рабочего тела, мм / Working body diameter, mm	2
Длина рабочего тела, мм / Working body length, mm	20
Частота вращения поля, Гц / Frequency of the field, Hz	50–120
Производительность, дм ³ /мин / Production capacity, dm ³ /min	2
Гидравлическое время удержания, с / Hydraulic retention time, s	15
Установленная мощность, кВт / Installed power, kW	1,3

и комбикорма К-65 в аппарате, а именно 0,5; 1,0; 2,0 и 4,0 мин. Частота вращения магнитного поля была постоянной и составляла 120 Гц. Обработанный субстрат хранили в холодильнике при температуре 4 °С в течение 7 суток до постановки эксперимента по анаэробному сбраживанию.

Результаты исследования

Для расчета энергетической эффективности процесса предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя перед анаэробным сбраживанием были определены материальный и энергетический балансы процесса.

Общий вид материального баланса процесса предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя выглядит следующим образом⁸:

$$G_{исх} + G_{иро} = G_{инф}, \quad (1)$$

где $G_{исх}$ – удельная суточная подача исходных органических отходов в аппарат предварительной обработки перед анаэробной биоконверсией в реакторах, кг/кг_{овин}, где кг_{овин} – килограмм органического вещества в исходных органических отходах; $G_{иро}$ – удельное суточное количество истираемого рабочего органа, попадающего в субстрат, определяется по формуле (2), кг/кг_{овин}; $G_{инф}$ – удельный выход предварительно обработанных органических отходов, кг/кг_{овин}.

Удельное суточное количество истираемого рабочего органа, попадающего в субстрат, будет равно:

$$G_{иро} = k \cdot m_{иро}, \quad (2)$$

где k – коэффициент истирания рабочего органа, определяется по формуле (3); $m_{иро}$ – масса истираемого рабочего органа в аппарате вихревого слоя, кг/кг_{овин}.

Коэффициент истирания рабочего органа зависит от продолжительности предварительной обработки и частоты магнитного поля:

$$k = f(\tau; \nu), \quad (3)$$

где τ – продолжительность предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя, с/сут; ν – частота магнитного поля аппарата вихревого слоя, Гц.

Общий вид энергетического баланса предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя выглядит следующим образом:

$$(G \cdot c \cdot t)_{исх} + (G \cdot c \cdot t)_{иро} + E_{об} = (G \cdot c \cdot t)_{инф} + Q_{охл}, \quad (4)$$

где $t_{исх}$ – температура исходных органических отходов, подаваемых в аппарат предварительной обработки перед сбраживанием в анаэробных реакторах, °С; c – теплоемкость, кВт·ч/(кг·°С); $E_{об}$ – удельное количество энергии, затраченное на функционирование оборудования, обеспечивающего предварительную обработку органических отходов перед сбраживанием в анаэробных биореакторах, кВт·ч^{эл.эн}/кг_{овин}; $Q_{охл}$ – удельный расход энергии на компенсацию тепловых потерь с охлаждающим агентом, кВт·ч^{т.эн}/кг_{овин}.

Удельное количество энергии, затраченное на функционирование оборудования, обеспечивающего предварительную обработку органических

⁸ Методы оценки энергетического потенциала возобновляемых источников по сельским регионам. Теоретические и конструктивные основы функционирования инновационных преобразователей энергии и возобновляемых источников различного типа с определением их основных параметров в составе автономных (локальных) энергосетей, различных способов биоэнергетической переработки органических отходов / Л. Ю. Юферев [и др.]. Отчет о НИР / НИОКР, рег. № АААА-А17-117091540015-4, 2017. 198 с.

отходов перед сбраживанием в анаэробных биореакторах, будет равно:

$$E_{об} = E_{вент} + E_n + E_{ABC}, \quad (5)$$

где $E_{вент}$ – удельное количество энергии, затраченное на подачу охлаждающего агента к катушке аппарата вихревого слоя, кВт·ч^{эл.эн.}/кг_{овин}; E_n – удельное количество энергии, затраченное на подачу исходных органических отходов в рабочую камеру аппарата вихревого слоя, кВт·ч^{эл.эн.}/кг_{овин}; E_{ABC} – удельное количество энергии, затраченное на создание электромагнитного поля в рабочей камере аппарата вихревого слоя, обеспечивающего воздействие истираемого рабочего органа на обрабатываемые органические отходы, кВт·ч^{эл.эн.}/кг_{овин}.

Удельный расход энергии на компенсацию тепловых потерь с охлаждающим воздухом [кВт·ч^{т.эн.}/кг_{овин}] будет равен:

$$Q_{охл} = G_{охл} \cdot c_{охл} \cdot (t_{охл}^{cp} - t_B) \cdot \tau, \quad (5)$$

где $G_{охл}$ – удельная подача охлаждающего агента к катушке аппарата вихревого слоя, кг/(с·кг_{овин}); $c_{охл}$ – теплоемкость охлаждающего агента, кВт·ч/(кг·°C); $t_{охл}^{cp}$ – средняя температура охлаждающего агента, удаляемого из охлаждающих камер катушки аппарата вихревого слоя, °C; t_B – температура наружного воздуха, °C.

Помимо предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя перед анаэробной биоconversion в биореакторах, для подготовки исходных органических отходов к анаэробному сбраживанию необходимо затратить тепловую энергию на предварительный нагрев исходных органических отходов [кВт·ч^{т.эн.}/кг_{овин}] в удельном количестве, равном:

$$Q_{ABC}^H = \frac{c_{инф} \cdot G_{инф} \cdot (t_{MT} - t_{инф})}{3600}, \quad (7)$$

где $c_{инф}$ – теплоемкость субстрата, получаемого после предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя, кДж/(кг·°C); t_{MT} – конечная температура нагрева субстрата, °C.

Энергетический анализ процесса предварительной обработки органических отходов перед сбраживанием в анаэробных биореакторах

Энергетическая эффективность процесса предварительной обработки органических отходов перед сбраживанием в анаэробных биореакторах, будет обеспечена при соблюдении следующего условия:

$$\left(\frac{(G_{бг}^{ABC} \cdot \lambda_{бг}^{ABC}) \cdot \frac{\eta_i}{100}}{3600} - Q_{ABC}^H \right) - \left(\frac{(G_{бг} \cdot \lambda_{бг}) \cdot \frac{\eta_i}{100}}{3600} - Q_H \right) \geq E_{об}, \quad (8)$$

где $G_{бг}^{ABC}$ – удельный выход биогаза из анаэробного биореактора с предварительной обработкой органических отходов в аппарате вихревого слоя, кг/кг_{овин}; $\lambda_{бг}^{ABC}$ – теплота сгорания биогаза, полученного при сбраживании в анаэробном биореакторе с предварительной обработкой органических отходов в аппарате вихревого слоя, кДж/кг; η_i – КПД преобразования энергии полученного биогаза в i -й вид энергии, %; $G_{бг}$ – удельный выход биогаза из анаэробного биореактора без предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя, кг/кг_{овин}; $\lambda_{бг}$ – теплота сгорания биогаза, полученного при сбраживании в анаэробном биореакторе без предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя, кДж/кг; Q_H – удельный расход тепловой энергии на предварительный нагрев исходных органических отходов при сбраживании в анаэробном

биореакторе без предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя, кВт·ч^{т.эн.}/кг_{овин.}

Преобразуя выражение (8), получаем:

$$\frac{\Delta(G_{\text{ог}} \cdot \lambda_{\text{ог}}) \cdot \frac{\eta_i}{100}}{3600} \geq E_{\text{об}} + \Delta Q_{\text{н}}, \quad (9)$$

где $\Delta(G_{\text{ог}} \cdot \lambda_{\text{ог}})$ – разность удельных количеств энергий биогаза, полученного при сбраживании в анаэробных биореакторах с предварительной обработкой органических отходов в АВС и без нее, кДж/кг_{овин.}; $\Delta Q_{\text{н}}$ – разность удельных затрат тепловой энергии на предварительный нагрев исходных органических отходов перед сбраживанием в анаэробных биореакторах с предварительной обработкой органических отходов в АВС и без нее, кВт·ч^{т.эн.}/кг_{овин.}

$$\Delta Q_{\text{н}} = Q_{\text{н}}^{\text{АВС}} - Q_{\text{н}}. \quad (10)$$

Исходя из полученных результатов анаэробного сбраживания модели органической фракции твердых коммунальных отходов, целесообразно обрабатывать соответствующие органические отходы в АВС в течение не более 0,5 минуты, так как прирост выхода метана при большей длительности обработки не существен [29].

Предобработка в АВС приводила к значительному улучшению характеристик последующего анаэробного сбраживания субстрата. Так, удельный выход биогаза увеличивался на 25 %, а метана на 80 %. Степень анаэробного разложения органического вещества субстрата после обработки в АВС увеличилась в среднем на 16 %. Скорость образования метана при анаэробном сбраживании субстрата после обработки в АВС увеличилась на 50 % [29].

Известно, что КПД преобразования потенциальной энергии газообразных энергоносителей в теплоту составляет 80–95 % при использовании водогрейных котлов и 45–50 % при использовании когенерационных установок, а в электрическую энергию – 10–45 %⁹.

Исходя из производительности установки по предобработке органических отходов в аппарате вихревого слоя, перед анаэробным сбраживанием суточное количество предварительно обработанного в аппарате вихревого слоя субстрата составит 60 м³¹⁰.

Расход электроэнергии, затраченной на функционирование оборудования, обеспечивающего предварительную обработку органических отходов перед сбраживанием в анаэробных биореакторах, составит 30 кВт·ч (6,55 Вт·ч^{эл.эн.}/кг_{овин.}) при ежесуточной загрузке 60 м³ и времени обработки 30 секунд. При этом температура исходных органических отходов увеличится на 4 °С.

Удельный расход теплоты на предварительный нагрев субстрата до температуры брожения $Q_{\text{н}}^{\text{АВС}}$ составит 2 842 кВт·ч (620,31 Вт·ч^{т.эн.}/кг_{овин.}), что меньше, чем удельный расход теплоты на предварительный нагрев органических отходов при анаэробной биоконверсии в биореакторе без предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя $Q_{\text{н}}$, равный 3 112,7 кВт·ч (679,38 Вт·ч^{т.эн.}/кг_{овин.}). Таким образом, разность удельных затрат тепловой энергии на предварительный нагрев исходных органических отходов перед анаэробной биоконверсией в биореакторах с предварительной обработкой органических отходов в АВС и без нее $\Delta Q_{\text{н}}$ равна 270,7 кВт·ч (59,08 Вт·ч^{т.эн.}/кг_{овин.}).

Исходя из вышеизложенного, значения левой части неравенства (9) при использовании всего биогаза в различных

⁹ Ковалев А. А. Повышение энергетической эффективности биогазовых установок: дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 119 с.

¹⁰ Лимаренко Н. В. Обоснование параметров активатора обеззараживания стоков животноводческих предприятий.

технических средств преобразования энергии газообразного энергоносителя будут больше значений правой части неравенства (9), следовательно, условие энергетической эффективности процесса предварительной обработки органических отходов перед сбраживанием в анаэробных биореакторах соблюдается, несмотря на то, что для интеграции процесса предварительной обработки органических отходов перед сбраживанием в анаэробных биореакторах необходимо дополнительно затрачивать электрическую энергию.

Сравнение энергетических показателей процесса анаэробного сбраживания жидких органических отходов в метантенках с предварительной обработкой исходного субстрата в аппарате

вихревого слоя и без нее с применением различных систем энергоснабжения приведено в таблице 3.

Результаты энергетического анализа процесса предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя перед анаэробной биоконверсией в биореакторах с применением различных систем энергоснабжения, включающие в себя значения увеличения удельного количества товарной энергии, приведены в таблице 4.

Полученные значения увеличения выхода товарной энергии биогаза справедливы для анаэробной переработки 60 м³/сут субстрата, предварительно подготовленного в аппарате вихревого слоя при времени удержания в последнем не менее 30 с.

Т а б л и ц а 3

Table 3

Сравнение энергетических показателей применяемых систем
Comparison of energy performance of the systems

Параметры / Parameters	TMT/ TMT*	ABC / AVL**	Отношение ABC к TMT / Ratio of AVL to TMT
Выход биогаза $G_{бр}$ / Biogas yield $G_{бр}$: – м ³ /сут / m ³ /day; – м ³ /кг _{овин} / m ³ /kg _{omin}	875,544 0,191	1 030,860 0,225	1,18 1,18
Теплотворная способность биогаза $\lambda_{бр}$, кДж/ м ³ / Calorific value of biogas $\lambda_{бр}$, kJ/m ³	14,375	20,583	1,43
Энергия полученного биогаза $Q_{бр}$ / Energy of biogas $Q_{бр}$: – кВт·ч/сут / kWh/day; – Вт·ч/кг _{овин} / Wh/kg _{omin}	3 496,096 762,674	5 893,940 1 286,440	1,69 1,69
Затраты тепловой энергии на собственные нужды системы $Q_{сн}$ / Thermal energy costs for system's own needs $Q_{сн}$: – кВт·ч ^{т.эн.} /сут / kWh ^{thermal} /day; – Вт·ч ^{т.эн.} /кг _{овин} / Wh ^{thermal} /kg _{omin}	3 292,000 718,530	3 022,000 659,590	0,92 0,92
Затраты электроэнергии на собственные нужды системы $E_{сн}$ / Electricity costs for system's own needs $E_{сн}$: – кВт·ч ^{эл.эн.} /сут / kWh ^{electrical} /day; – Вт·ч ^{эл.эн.} /кг _{овин} / Wh ^{electrical} /kg _{omin}	101,000 22,040	131,000 28,590	1,30 1,30

Примечание / Note:

* анаэробное сбраживание без предобработки / anaerobic digestion without pretreatment;

** анаэробное сбраживание с предварительной обработкой в аппарате вихревого слоя / anaerobic digestion with pretreatment in the vortex layer apparatus

Т а б л и ц а 4
T a b l e 4

Увеличение выхода товарной энергии различных видов (результаты энергетического анализа)

Increasing the yield of commodity energy of different types (results of the energy analysis)

Виды товарной энергии / Types of commercial energy	Энергоснабжение / Energy supply		
	ЭЭ* и ТЭ** от внешних источников / EE and TE from external sources	ЭЭ от внешних источников, ТЭ от собственной котельной / EE from external sources, TE from own boiler house	собственное, от когенерационной установки / own, from cogeneration plant
Биогаз $T_{\text{бр}}$ / Biogas $T_{\text{бр}}$: – Вт·ч/кг _{ов. ин.} / Wh/kg _{omin} ; – кВт·ч/сут / kWh/day.	523,36 2 397,85	– –	– –
Теплота T_Q / Heat T_Q : – Вт·ч ^{т.эн.} /кг _{ов ин} / Wh ^{thermal} /kg _{omin} ; – кВт·ч ^{т.эн.} /сут / kWh ^{thermal} /day.	59,08 270,70	556,28 2 548,65	320,76 1 469,62
Электричество T_E / Electricity T_E : – Вт·ч ^{эл.эн.} /кг _{ов ин} / Wh ^{electrical} /kg _{omin} ; – кВт·ч ^{эл.эн.} /сут / kWh ^{electrical} /day.	–6,55 –30,00	–6,55 –30,00	150,46 689,35

Примечание / Note:

* электроэнергия / electrical energy;

** тепловая энергия / thermal energy.

Обсуждение и заключение

Интеграция процесса предварительной обработки органических отходов перед анаэробной биоконверсией в биореакторах в систему анаэробной обработки органических отходов позволяет повысить как энергетическую эффективность системы при условии использования технических средств преобразования потенциальной энергии газообразного энергоносителя с КПД не ниже, чем КПД технических средств, применяемых при расчете, так и степень анаэробного разложения органического вещества органических отходов за счет тонкодисперсного измельчения. При этом следует учитывать довольно узкий диапазон нагрузок по органическому веществу анаэробных биореакторов первого поколения, а также количество органического вещества, переведенного в растворенную форму при предварительной обработке в ап-

парате вихревого слоя, что напрямую будет влиять на выход биогаза из анаэробных биореакторов.

По сравнению с анаэробной обработкой в традиционных метантенках применение предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя перед сбраживанием в анаэробных биореакторах позволяет повысить удельный выход биогаза не менее чем в 1,18 раза при одновременном увеличении содержания метана в биогазе и, как следствие, его теплотворной способности, что соответствует увеличению удельного количества энергии полученного биогаза не менее чем в 1,69 раза. При этом удельное потребление электроэнергии увеличивается на 30 % при снижении удельного потребления теплоты на 8 %, а общее энергопотребление составляет не более 60 % от энергии полученного биогаза при условии использования техниче-

ских средств преобразования потенциальной энергии газообразных энергоносителей с КПД не ниже, чем КПД технических средств, применяемых при расчете.

Таким образом, удельное количество энергии биогаза, полученного в процессе сбраживания в анаэробных биореакторах с применением предварительной обработки субстрата в аппарате вихревого слоя, полностью компен-

сирует затраты энергии на предварительную обработку субстрата в аппарате вихревого слоя. При этом удельный выход товарной энергии увеличивается на 70 %, по сравнению с анаэробной обработкой в традиционных метантенках.

Однако следует учитывать, что значения удельных выходов биогаза получены в периодическом режиме при термофильных условиях сбраживания субстрата с высокой степенью разложения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Патент № 2507241 Российская Федерация, МПК C10L 5/00 (2006.01). Брикет на основе спрессованного лигноцеллюлозного тела, пропитанного жидким топливом : № 2012108893/04 : заявл. 07.03.2012 : опубл. 20.02.2014 / Фуасак Г., Плион П., Фише В. [и др.] ; патентообладатель «Электрисите де Франс». – 11 с. : ил. 2012. URL: <http://www.freepatent.ru/images/patents/505/2507241/patent-2507241.pdf> (дата обращения: 20.02.2020).

2. Патент № 2507242 Российская Федерация, МПК C10L 5/14 (2006.01). Способ брикетирования отходов жизнедеятельности животных и птицы и устройство для его осуществления : № 2012146319/04 : заявл. 30.10.2012 : опубл. 20.02.2014 / Старших В. В., Максимов Е. А. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Челябинская государственная агроинженерная академия». – 6 с. : ил. URL: <http://www.freepatent.ru/images/patents/505/2507242/patent-2507242.pdf> (дата обращения: 20.02.2020).

3. Sommer, P. Potential for Using Thermophilic Anaerobic Bacteria for Bioethanol Production from Hemicellulose / P. Sommer, T. Georgieva, B. K. Ahring. – DOI 10.1042/bst0320283 // Biochemical Society Transactions. – 2004. – Vol. 32, issue 2. – Pp. 283–289. URL: <https://portlandpress.com/biochemsotrans/article-abstract/32/2/283/63941/Potential-for-using-thermophilic-anaerobic?redirectedFrom=fulltext> (дата обращения: 20.02.2020).

4. Сенько, О. В. Трансформация биомассы фототрофных микроорганизмов в метан / О. В. Сенько, М. А. Гладченко, И. В. Лягин [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 3 (107). – С. 89–94. URL: <http://naukarus.com/transformatiya-biomassy-fototrofnih-mikroorganizmov-v-metan> (дата обращения: 20.02.2020). – Рез. англ.

5. Кевбрина, М. В. Сравнение разных методов предобработки осадков сточных вод для интенсификации процесса метанового сбраживания / М. В. Кевбрина, Н. Г. Газизова, В. Г. Коробцова // Водоочистка. – 2013. – № 1. – С. 22–28.

6. Патент № 2518068 Российская Федерация, МПК C10L5/44. Способ получения гранул или брикетов : № 2011129312/04 : заявл. 05.10.2009 : опубл. 20.01.2013 / Гренн А. Й. ; патентообладатель : «Зилха байомасс фьюэлз ай ЭлЭлСи». – 18 с. : ил. URL: http://www.freepatent.ru/images/img_patents/2/2518/2518068/patent-2518068.pdf (дата обращения: 20.02.2020).

7. Кузнецов, Б. Н. Актуальные направления химической переработки возобновляемой растительной биомассы / Б. Н. Кузнецов // Химия в интересах устойчивого развития. – 2011. – Т. 19, № 1. – С. 77–85. URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/20e/20e075ccdd1508ec3ef2795a6adb74ae.pdf> (дата обращения: 20.02.2020).

8. Сергеева, Я. Э. Липиды мицелиальных грибов как основа для получения биодизельного топлива / Я. Э. Сергеева, Л. А. Галанина, Д. А. Андрианова [и др.] // Прикладная биохимия и микробиология. – 2008. – Т. 44, № 5. – С. 576–581. URL: <http://naukarus.com/lipidy-mitselialnyh-gribov-kak-osnova-dlya-polucheniya-biodizelnogo-topliva> (дата обращения: 20.02.2020).

9. **Систер, В. Г.** Технологии получения биодизельного топлива / В. Г. Систер, Е. М. Иванникова, А. И. Ямчук // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2013. – Т. 2, № 3. – С. 109–112. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/tehnologii-polucheniya-biodizelnogo-topliva> (дата обращения: 20.02.2020).
10. **Гумеров, Ф. М.** Перспективы использования суб- и сверхкритических флюидных сред при получении биодизельного топлива / Ф. М. Гумеров, Ф. Р. Габитов, Р. А. Газизов [и др.] // Сверхкритические флюиды: Теория и практика. – 2006. – Т. 1, № 1. – С. 66–76. URL: https://www.researchgate.net/publication/274391968_Future_Trends_of_Sub-_and_Supercritical_Fluids_Application_in_Biodiesel_Fuel_Production (дата обращения: 20.02.2020). – Рез. англ.
11. **Kalyuzhnyi, S. V.** The UASB Treatment of Winery Wastewater under Submesophilic and Psychrophilic Conditions / S. V. Kalyuzhnyi, M. A. Gladchenko, V. I. Sklyar [et al.] // Environmental Technology. – 2000. – Vol. 21. – Pp. 919–925. URL: http://www.enzyme.chem.msu.ru/ekbio/article/ET_2000_21.pdf (дата обращения: 20.02.2020).
12. **Sklyar, V. I.** Combined Biologic (Anaerobic-Aerobic) and Chemical Treatment of Starch Industry Wastewater / V. I. Sklyar, A. N. Eпов, M. A. Gladchenko [et al.] // Applied Biochemistry and Biotechnology. – 2003. – Vol. 109, issue 1–3. – Pp. 253–262. URL: <https://istina.cemi-ras.ru/publications/article/1671198/> (дата обращения: 20.02.2020).
13. **Калюжный, С. В.** Комбинированная биолого-химическая очистка сточных вод производства хлебопекарных дрожжей / С. В. Калюжный, М. А. Гладченко, Е. А. Старостина [и др.] // Производство спирта и ликероводочных изделий. – 2004. – № 3. – С. 10–14. URL: <http://www.enzyme.chem.msu.ru/ekbio/article/Vodka.pdf> (дата обращения: 20.02.2020).
14. **Варфоломеев, С. Д.** Химические основы биотехнологии получения топлив / С. Д. Варфоломеев, С. В. Калюжный, Д. Я. Медман. – DOI 10.1070/RC1988v057n07ABEH003383 // Успехи химии. – 1988. – Т. 57, № 7. – С. 1201–1231. URL: <http://mr.crossref.org/iPage?doi=10.1070%2FRC1988v057n07ABEH003383> (дата обращения: 20.02.2020). – Рез. англ.
15. **Варфоломеев, С. Д.** Биотоплива / С. Д. Варфоломеев, Е. Н. Ефременко, Л. П. Крылова. – DOI 10.1070/RC2010v079n06ABEH004138 // Успехи химии. – 2010. – Т. 79, № 6. – С. 491–509. URL: <http://mi.mathnet.ru/rcr119> (дата обращения: 20.02.2020). – Рез. англ.
16. **Хамидов, М. Г.** Отходы на службе энергетики города / М. Г. Хамидов, С. А. Стрельцов, Д. А. Данилович // Коммунальный комплекс России. – 2009. – № 2 (56). – С. 56–58. URL: <http://gkhprofi.ru/othody-na-sluzhbe-energetiki-goroda/> (дата обращения: 20.02.2020).
17. **Цавкелова, Е. А.** Получение биогаза из целлюлозосодержащих субстратов (обзор) / Е. А. Цавкелова, А. И. Нетрусов. – DOI 10.1134/S0003683812050134 // Прикладная биохимия и микробиология. – 2012. – Т. 48, № 5. – С. 1–15. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS0003683812050134> (дата обращения: 20.02.2020). – Рез. англ.
18. **Appels, L.** Principles and Potential of the Anaerobic Digestion of Waste-Activated Sludge / L. Appels, J. Baeyens, J. Degrevé [et al.]. – DOI 10.1016/j.pecs.2008.06.002 // Progress in Energy and Combustion Science. – Vol. 34, issue 6. – Pp. 755–781. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128508000312?via%3Dihub> (дата обращения: 20.02.2020).
19. **Lu, J.** Optimization of Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Using Thermophilic Anaerobic Pre-Treatment / J. Lu. – Lyngby : Technical University of Denmark, 2006. – 60 p. URL: <https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/4692519/Thesis.pdf> (дата обращения: 20.02.2020).
20. **Zhang, D. Q.** Municipal Solid Waste Management in China: Status, Problems and Challenges / D. Q. Zhang, S. K. Tan, R. M. Gersberg. – DOI 10.1016/j.jenvman.2010.03.012 // Journal of Environmental Management. – 2010. – Vol. 91, issue 8. – Pp. 1623–1633. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479710000848> (дата обращения: 20.02.2020).
21. **Walley, P.** Optimizing Thermal Hydrolysis for Reliable High Digester Solids: Loading and Performance / P. Walley // Proceedings of the 12th European Biosolids and Organic Resources Conference. – Manchester : Aqua Enviro, 2007. URL: <https://www.environmental-expert.com/articles/optimising-thermal-hydrolysis-for-reliable-high-digester-solids-loading-and-performance-26250> (дата обращения: 20.02.2020).

22. Храменков, С. В. Повышение эффективности обработки осадка сточных вод с помощью высокотемпературного гидролиза перед сбраживанием / С. В. Храменков, А. Н. Пахомов, С. А. Стрельцов [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2012. – № 10. – С. 55–60. URL: <http://docplayer.ru/69901569-Povyshenie-effektivnosti-obrabotki-osadka-stochnyh-vod-s-pomoshchyu-vysokotemperaturnogo-gidroliza-pered-sbrazhivaniem.html> (дата обращения: 20.02.2020). – Рез. англ.
23. Haug, R. T. Effect of Thermal Pretreatment on Digestibility and Dewaterability of Organic Sludges / R. T. Haug, D. C. Stuckey, J. M. Gossett [et al.] // Journal of the Water Pollution Control Federation. – 1978. – Vol. 50, issue 1. – Pp. 73–85. URL: https://www.jstor.org/stable/25039508?seq=1#page_scan_tab_contents (дата обращения: 20.02.2020).
24. Tiehm, A. Ultrasonic Waste Activated Sludge Disintegration for Improving Anaerobic Stabilization / A. Tiehm, K. Nickel, M. Zellhorn [et al.]. – DOI 10.1016/S0043-1354(00)00468-1 // Water Research. – 2001. – Vol. 35, issue 8. – Pp. 2003–2009. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135400004681?via%3Dihub> (дата обращения: 20.02.2020).
25. Henze, M. Hydrolysis of Particulate Substrate by Activated Sludge under Aerobic, Anoxic and Anaerobic Conditions / M. Henze, C. Mladenovski. – DOI 10.1016/0043-1354(91)90099-C // Water Research. – 1991. – Vol. 25, issue 1. – Pp. 61–64. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/004313549190099C?via%3Dihub> (дата обращения: 20.02.2020).
26. Messenger, J. R. Oxygen Utilization Rate as a Control Parameter for the Aerobic Stage in Dual Digestion / J. R. Messenger, H. A. Villiers, G. A. Ekama – DOI 10.2166/wst.1990.0116 // Water Science and Technology. – 1990. – Vol. 22, issue 12. – Pp. 217–227. URL: <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/22/12/217/23761/Oxygen-Utilization-Rate-as-a-Control-Parameter-for?redirectedFrom=fulltext> (дата обращения: 20.02.2020).
27. McIntosh, K. B. Volatile Fatty Acid Production in Aerobic Thermophilic Pre-Treatment of Primary Sludge / K. B. McIntosh, J. A. Oleszkiewicz. – DOI 10.1016/S0273-1223(97)00682-3 // Water Science and Technology. – 1997. – Vol. 36, issue 11. – Pp. 189–196. URL: <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/36/11/189/7025/Volatile-fatty-acid-production-in-aerobic> (дата обращения: 20.02.2020).
28. Гюнтер, Л. И. Тенденции в развитии метанового брожения органических отходов / Л. И. Гюнтер, З. М. Кольцова // Водоснабжение и санитарная техника. – 1993. – № 9. – С. 13–15.
29. Litti, Yu. Increasing the Efficiency of Organic Waste Conversion into Biogas by Mechanical Pretreatment in an Electromagnetic Mill / Yu. Litti, D. Kovalev, A. Kovalev [et al.]. – DOI 10.1088/1742-6596/1111/1/0120132018 // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1111, issue 1. – Pp. 1–8. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1111/1/012013> (дата обращения: 20.02.2020).

Поступила 02.09.2019; принята к публикации 16.10.2019; опубликована онлайн 31.03.2020

Об авторах:

Ковалев Андрей Александрович, старший научный сотрудник лаборатории 14.4 биоэнергетических и сверхкритических технологий ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат технических наук, Researcher ID: F-7045-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1983-3454>, Scopus ID: 57205285134, kovalev_ana@mail.ru

Ковалев Дмитрий Александрович, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией 14.4 биоэнергетических и сверхкритических технологий ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат технических наук, Researcher ID: K-4810-2015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3603-3686>, kovalev_da80@mail.ru

Григорьев Виктор Степанович, главный научный сотрудник лаборатории 14.4. биоэнергетических и сверхкритических технологий ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), доктор технических наук, Researcher ID: B-4331-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6555-1864>, 7458358@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. А. Ковалев – анализ литературных источников, разработка экспериментальной установки, проведение расчета энергетической эффективности, написание текста статьи; Д. А. Ковалев – научное руководство, постановка задач исследования, поиск и анализ литературных источников, разработка экспериментальной установки, написание текста статьи; В. С. Григорьев – поиск и анализ литературных источников, редактирование и доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Briquette Based on Pressed Lignocellulose Body Saturated with Liquid Fuel: Patent 2507241 Russian Federation. No. 2012108893/04; appl. 07.03.2012; publ. 20.02.2014. Bulletin No. 5. 11 p. Available at: <http://www.freepatent.ru/images/patents/505/2507241/patent-2507241.pdf> (accessed 20.02.2020). (In Russ.)
2. Method of Briquetting Animal and Poultry Waste and Device for Its Implementation: Patent 2507242 Russian Federation. No. 2012146319/04; appl. 30.10.2012; publ. 20.02.2014. Bulletin No. 5. 6 p. Available at: <http://www.freepatent.ru/images/patents/505/2507242/patent-2507242.pdf> (accessed 20.02.2020). (In Russ.)
3. Sommer P., Georgieva T., Ahring B.K. Potential for Using Thermophilic Anaerobic Bacteria for Bioethanol Production from Hemicellulose. *Biochemical Society Transactions*. 2004; 32(2):283-289. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1042/bst0320283>
4. Senko O.V., Gladchenko M.A., Lyagin I.V., et al. Biomass Transformation of Phototrophic Microorganisms to Methane. *Alternativnaya energetika i ekologiya* = International Journal of Alternative Energy and Ecology. 2012; (3):89-94. Available at: <https://portlandpress.com/biochemsoctrans/article-abstract/32/2/283/63941/Potential-for-using-thermophilic-anaerobic?redirectedFrom=fulltext> (accessed 20.02.2020). (In Russ.)
5. Kevbrina M.V., Gazizova N.G., Korobtsova V.G. Comparison of Different Methods of Sewage Sludge Pretreatment for Methane Digestion Intensification. *Vodoochistka* = Water Purification. 2013; (1):22-28. (In Russ.)
6. Production of Pellets or Briquettes: Patent 2518068 Russian Federation. No. 2011129312/04; appl. 05.10.2009; publ. 20.01.2013. Bulletin No. 16. 18 p. Available at: http://www.freepatent.ru/images/img_patents/2/2518/2518068/patent-2518068.pdf (accessed 20.02.2020). (In Russ.)
7. Kuznetsov B.N. Urgent Directions of Chemical Processing of Renewable Plant Biomass. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya* = Chemistry for Sustainable Development. 2011; 19(1):77-85. Available at: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/20e/20e075ccdd1508ec3ef2795a6adb74ae.pdf> (accessed 20.02.2020). (In Russ.)
8. Sergeeva Ya.E., Galanina L.A., Andrianova D.A., et al. Lipids of Filamentous Fungi as a Material for Producing Biodiesel Fuel. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya* = Applied Biochemistry and Microbiology. 2008; 44(5):576-581. Available at: <http://naukarus.com/lipidy-mitselialnyh-gribov-kak-osnova-dlya-polucheniya-biodizelnogo-topliva> (accessed 20.02.2020). (In Russ.)
9. Sister V.G., Ivannikova E.M., Yamchuk A.I. Technology for Biodiesel Production. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI* = MGTU MAMI Bulletin. 2013; 2(3):109-112. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/tehnologii-polucheniya-biodizelnogo-topliva> (accessed 20.02.2020). (In Russ.)
10. Gumerov F.M., Gabitov F.R., Gazizov R.A., et al. Future Trends of Sub- and Supercritical Fluids Application in Biodiesel Fuel Production. *Sverkhkriticheskie flyuidy: Teoriya i praktika* = Supercritical Fluids: Theory and Practice. 2006; 1(1):66-76. Available at: https://www.researchgate.net/publication/274391968_Future_Trends_of_Sub_and_Supercritical_Fluids_Application_in_Biodiesel_Fuel_Production (accessed 20.02.2020). (In Russ.)

11. Kalyuzhnyi S.V., Gladchenko M.A., Sklyar V.I., et al. The UASB Treatment of Winery Wastewater under Submesophilic and Psychrophilic Conditions. *Environmental Technology*. 2000; 21:919-925. Available at: http://www.enzyme.chem.msu.ru/ekbio/article/ET_2000_21.pdf (accessed 20.02.2020). (In Russ.)
12. Sklyar V.I., Epov A.N., Gladchenko M.A., et al. Combined Biologic (Anaerobic-Aerobic) and Chemical Treatment of Starch Industry Wastewater. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2003; 109(1-3):253-262. Available at: <https://istina.cemi-ras.ru/publications/article/1671198/> (accessed 20.02.2020). (In Eng.)
13. Kalyuzhnyy S.V., Gladchenko M.A., Starostina Ye.A., et al. Combined Biological and Chemical Wastewater Treatment of Bakery Yeast Production. *Proizvodstvo spirta i likerovodochnykh izdeliy* = Manufacture of Alcohol and Liquor Products. 2004; (3):10-14. Available at: <http://www.enzyme.chem.msu.ru/ekbio/article/Vodka.pdf> (accessed 20.02.2020). (In Russ.)
14. Varfolomeev S.D., Kalyuzhnyy S.V., Medman D.Ya. Chemical Principles of the Biotechnology of the Preparation of Fuel. *Uspekhi khimii* = Russian Chemical Reviews. 1988; 57(7):1201-1231. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1070/RC1988v057n07ABEH003383>
15. Varfolomeev S.D., Efremenko E.N., Krylova L.P. Biofuels. *Uspekhi khimii* = Russian Chemical Reviews. 2010; 79(6):491-509. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1070/RC2010v079n06ABEH004138>
16. Khamidov M.G., Streltsov S.A., Danilovich D.A. Waste at the Service of the City Energy. *Kommunalnyy kompleks Rossii* = Communal Complex of Russia. 2009; (2):56-58. Available at: <http://gkh-profi.ru/othody-na-sluzhbe-energetiki-goroda/> (accessed 20.02.2020). (In Russ.)
17. Tsavkelova E.A., Netrusov A.I. Biogas Production from Cellulose-Containing Substrates: A Review. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya* = Applied Biochemistry and Microbiology. 2012; 48(5):1-15. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S0003683812050134>
18. Appels L., Baeyens J., Degreè J., et al. Principles and Potential of the Anaerobic Digestion of Waste-Activated Sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*. 34(6):755-781. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>
19. Lu J. Optimization of Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Using Thermophilic Anaerobic Pre-Treatment. Lyngby: Technical University of Denmark; 2006. 60 p. Available at: <https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/4692519/Thesis.pdf> (accessed 20.02.2020). (In Eng.)
20. Zhang D.Q., Tan S.K., Gersberg R.M. Municipal Solid Waste Management in China: Status, Problems and Challenges. *Journal of Environmental Management*. 2010; 91(8):1623-1633. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.03.012>
21. Walley P. Optimizing Thermal Hydrolysis for Reliable High Digester Solids: Loading and Performance. In: Proceedings of the 12th European Biosolids and Organic Resources Conference. Manchester: Aqua Enviro; 2007. Available at: <https://www.environmental-expert.com/articles/optimising-thermal-hydrolysis-for-reliable-high-digester-solids-loading-and-performance-26250> (accessed 20.02.2020). (In Eng.)
22. Khramenkov S.V., Pakhomov A.N., Streltsov S.A., et al. Improving the Efficiency of Wastewater Sludge Pretreatment by High Temperature Hydrolysis before Digestion. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* = Water Supply and Sanitary Technique. 2012; (10):55-60. Available at: <http://docplayer.ru/69901569-Povyshenie-effektivnosti-obrabotki-osadka-stochnykh-vod-s-pomoshchyu-vysokotemperaturnogo-gidroliza-pered-sbrazhivaniem.html> (accessed 20.02.2020). (In Russ.)
23. Haug R.T., Stuckey D.C., Gossett J.M., et al. Effect of Thermal Pretreatment on Digestibility and Dewaterability of Organic Sludges. *Journal of the Water Pollution Control Federation*. 1978; 50(1):73-85. Available at: https://www.jstor.org/stable/25039508?seq=1#page_scan_tab_contents (accessed 20.02.2020). (In Eng.)
24. Tiehm A., Nickel K., Zellhorn M., et al. Ultrasonic Waste Activated Sludge Disintegration for Improving Anaerobic Stabilization. *Water Research*. 2001; 35(8):2003-2009. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00468-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00468-1)
25. Henze M., Miadenovski C. Hydrolysis of Particulate Substrate by Activated Sludge under Aerobic, Anoxic and Anaerobic Conditions. *Water Research*. 1991; 25(1):61-64. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(91\)90099-C](https://doi.org/10.1016/0043-1354(91)90099-C)

26. Messenger J.R., Villiers H.A., Ekama G.A. Oxygen Utilization Rate as a Control Parameter for the Aerobic Stage in Dual Digestion Water Science and Technology. 1990; 22(12):217-227. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.1990.0116>
27. McIntosh K.B., Oleszkiewicz J.A. Volatile Fatty Acid Production in Aerobic Thermophilic Pre-Treatment of Primary Sludge. *Water Science and Technology*. 1997; 36(11):189-196. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00682-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00682-3)
28. Gyunter L.I., Koltsova Z.M. Trends in Methane Disposal of Organic Waste. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* = Water Supply and Sanitary Technique. 1993; (9):13-15. (In Russ.)
29. Litt Yu., Kovalev D., Kovalev A., et al. Increasing the Efficiency of Organic Waste Conversion into Biogas by Mechanical Pretreatment in an Electromagnetic Mill. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018; 1111(1):1-8. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1111/1/012013>

Received 02.09.2019; revised 16.10.2019; published online 31.03.2020

About the authors:

Andrey A. Kovalev, Senior Researcher of Laboratory of Bioenergy and Supercritical Technologies, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: F-7045-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1983-3454>, Scopus ID: 57205285134, kovalev_ana@mail.ru

Dmitriy A. Kovalev, Senior Researcher of Laboratory Director of Bioenergy and Supercritical Technologies, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: K-4810-2015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3603-3686>, kovalev_da80@mail.ru

Victor S. Grigoriev, Chief Researcher of Laboratory Director of Bioenergy and Supercritical Technologies, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: B-4331-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6555-1864>, 7458358@mail.ru

Contribution of the authors:

A. A. Kovalev – analysis of literary sources, development of the experimental unit, calculation of energy efficiency, writing the draft; D. A. Kovalev – scientific guidance, problem statement, search and analysis of literary sources, development of the experimental unit, writing the draft; V. S. Grigoriev – search and analysis of literary sources, editing and revision of the text.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

УДК 631.354.2

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202001.111-132



Результаты экспериментальных исследований обмолота колосьев в пневматическом молотильном устройстве

**В. И. Пахомов, С. В. Брагинец, О. Н. Бахчевников*,
Е. В. Бенова, А. И. Рухляда**
*ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»
(г. Зерноград, Россия)*
**oleg-b@list.ru*

Введение. В настоящее время актуальной проблемой является высокий уровень травмирования зерна в процессе обмолота. Поэтому необходимо разработать щадящие способы выделения зерна из колоса, исключая непосредственное ударное воздействие рабочих органов молотильных устройств на зерновки. Цель исследования – изучить процесс обмолота колоса пшеницы в пневматическом молотильном устройстве и оценить влияние режимных характеристик устройства на выделение и травмирование зерна.

Материалы и методы. Экспериментальная установка представляет собой пневматическое молотильное устройство, в котором обмолот производится при взаимодействии колоса и деки, осуществляемом под чередующимся действием высокого и низкого давления воздуха, создаваемого лопастями ротора, а сепарация – посредством отвода легкой незерновой фракции в камеру пониженного давления.

Результаты исследования. Установлено, что травмирование зерна уменьшается при снижении скорости движения лопастей ротора и соответственно скорости движения колоса в молотильной камере. При минимальной скорости движения лопасти 13,5 м/с уровень травмирования зародыша и дробления зерна снижается практически до нуля. Диапазон скорости лопасти 13,5...20 м/с является наиболее благоприятным для пневматического обмолота зерна по показателю травмирования его зародыша. В результате пневматического обмолота на экспериментальной установке происходит эффективное разделение зерновой и легкой незерновой частей колосьев.

Обсуждение и заключение. Процесс пневматического обмолота колосьев пшеницы дает удовлетворительные результаты, обеспечивая снижение травмирования эндосперма зерна на 10...12 %. Травмирование зародыша зерна снижается на 5 %, практически исключая его. Дробление зерна при минимальной скорости лопастей ротора составило не более 0,5 %. Сопоставление доли травмированного и дробленного зерна при пневматическом обмолоте с долей поврежденного зерна при традиционном комбайновом обмолоте показало, что предлагаемый способ обеспечивает снижение травмирования.

© Пахомов В. И., Брагинец С. В., Бахчевников О. Н., Бенова Е. В., Рухляда А. И., 2020



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

Ключевые слова: зерно, колос, обмолот, травмирование зерна, выделение зерна из колоса, молотильное устройство

Для цитирования: Пахомов, В. И. Результаты экспериментальных исследований обмолота колосьев в пневматическом молотильном устройстве / В. И. Пахомов, С. В. Брагинетц, О. Н. Бахчевников [и др.]. – DOI: 10.15507/2658-4123.030.202001.111-132 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 111–132.

Experimental Data of the Ear Threshing Process in a Pneumatic Device

**V. I. Pakhomov, S. V. Braginets, O. N. Bakhchevnikov*,
E. V. Benova, A. I. Rukhlyada**
Agricultural Research Center “Donskoy” (Zernograd, Russia)
**oleg-b@list.ru*

Introduction. The current problem is the high level of grain injuries during the threshing process. Therefore it is necessary to develop the gentle methods for separating grains from ears. These methods shall exclude direct shock influence of operative parts of the threshing devices on cereal grains. The objective of research is to study the process of the wheatear threshing in the pneumatic device and to estimate the influence of device settings on cereal grain separation and damage.

Materials and Methods. The experimental apparatus is a pneumatic threshing device. The threshing is carried out in case of the interaction of an ear and concave under the influence of the alternating high and low pressure of the airflow generating by the rotor’s blades. Separation is carried out by means of deriving light-load tailings into the reduced pressure chamber.

Results. The grain damage decreases in reducing the speed of rotor blades motion and consequently the speed of ears motion in the threshing unit. Germ damage and grain breakage decrease almost to zero at a minimum blade motion speed of 13.5 mps. The range of blade speed between 13.5 and 20 mps is the most favorable for the pneumatic grain threshing in terms of the germ damage. The pneumatic threshing on the experimental device results in effective assorting of grains and light-load tailings of ears.

Discussion and Conclusion. Process of the wheat ears pneumatic threshing has satisfactory results. The pneumatic threshing reduces grain endosperm damage by 10...12%. Grain germ damage decreases by 5%, practically to zero. Crushing of grain at rotor blades minimum speed is no more than 0.5%. Comparison of shares of the damaged and crushed grains when using the pneumatic threshing with shares of the damaged grains when using the traditional combine threshing has showed that the offered method of the threshing provides a reduction in grain damage.

Keywords: grain, ear, threshing, grain damage, ear separation, threshing device

For citation: Pakhomov V.I., Braginets S.V., Bakhchevnikov O.N., et al. Experimental Data of the Ear Threshing Process in a Pneumatic Device. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(1):111-132. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.111-132>

Введение

В настоящее время насущной проблемой является высокий уровень травмирования семян зерновых культур, в том числе озимой пшеницы, в процессе обмолота [1], что в дальнейшем отрицательно влияет на качество по-

лучаемого семенного материала [2; 3]. Значительные механические повреждения зерна получают при взаимодействии с рабочими органами молотильных устройств ударного действия [4; 5]. Это имеет особенно большое значение в ходе селекционных работ по созда-

нию новых сортов зерновых культур, так как при небольшом количестве зерен в каждом исследуемом образце их травмирование отрицательно влияет на результаты и продолжительность таких работ [6].

Результаты исследований [3; 4; 7] доказывают, что совершенствование рабочих органов молотильных устройств, осуществляющих непосредственное ударное воздействие на колос и содержащиеся в нем зерна, не позволяет добиться значительного снижения травмирования зерна и полностью исключить его [8; 9]. Поэтому появилась необходимость разработать новые щадящие способы выделения зерна из колоса, сводящие к минимуму или исключают непосредственное ударное воздействие подвижных рабочих органов молотильных устройств на зерновки [9–11].

В настоящее время широкое распространение получают зерноуборочные комбайны с аксиально-роторными молотильно-сепарирующими устройствами, в которых зерна практически не подвергаются непосредственному ударному воздействию рабочих органов, а выделяются в результате вытирания колосьев при их перемещении между рабочими поверхностями, образующими молотильный зазор [9; 12; 13]. При этом вследствие интенсивного контакта с рабочими поверхностями зерна подвергаются травмированию, хотя и в меньшей степени, чем в традиционном молотильном аппарате [4; 9].

В последнее время широкое распространение получила комбайновая уборка зерновых методом очеса, при котором в молотильное устройство комбайна поступают лишь колосья без стеблей [4; 9; 14]. В результате молотильный аппарат комбайна оказывается недостаточно загружен, что приводит к повышению травмирования зерна [4; 15]. Это также требует разработки нового способа малотравматичного обмолота колосьев зерновых культур.

Предпосылкой для разработки нового способа обмолота является свойство колосьев растений зерновых культур, заключающееся в том, что чешуи, охватывающие каждое зерно, препятствуют эффективному ударному воздействию на него в процессе обмолота [16; 17]. Поэтому следует разработать способ обмолота, заключающийся в разрушении чешуй колоса или ослаблении их связи с зерновкой. Чтобы при этом снизить травмирование зерна, в ходе его реализации рационально применять не ударное, а контактное воздействие, заключающееся в перекалывании колоса по поверхности деки молотильного устройства, приводящего к частичному истиранию колоса, в результате чего и происходит выделение зерен. Для того чтобы обеспечить движение колоса в нужном направлении и контактное воздействие на него деки, авторами предложено использовать поток воздуха, создаваемый лопастями ротора в молотильной камере. При этом контактное воздействие ротора на колосья заменяется малотравматичным действием воздушной струи.

В данном исследовании эффективность способов обмолота и молотильных устройств оценивалась с точки зрения снижения травмирования зерна, вопросы производительности не рассматривались. Цель исследования – изучить процесс обмолота колоса пшеницы в пневматическом молотильном устройстве и оценить влияние режимных характеристик устройства на выделение и травмирование зерна.

Обзор литературы

Опыт эксплуатации зерноуборочных комбайнов с традиционным молотильным аппаратом барабанного типа с ударным действием показал, что обмолот зерна в них сопровождается значительным его травмированием [4; 8]. В рамках этого традиционного способа обмолота предлагались различные технические решения для снижения травмирования зерна [9; 11], которые

дали лишь небольшой положительный эффект [4; 7; 8]. В результате изучения процесса ударного обмолота исследователи, в частности Ф. Шахбази [7; 18; 19] и М. Лашгари [20], пришли к выводу, что этот метод обмолота исчерпал возможности к совершенствованию, так как при его применении невозможно избежать травмирующего ударного воздействия на зерно [1; 3; 7; 21]. Поэтому стала очевидной необходимость разработки нового малотравматичного способа обмолота колосьев зерновых культур [9; 10; 22].

Такой способ обмолота осуществляют посредством роторных молотильно-сепарирующих устройств с аксиальным и тангенциальным расположением ротора, которые находят все более широкое применение в конструкции зерноуборочных комбайнов [9; 23–26]. В основу этого способа обмолота положено использование эффекта истирания колосьев при перемещении между образующими молотильный зазор рабочими поверхностями и ударами выступающих элементов ротора по колосьям [4; 9; 13; 27]. Теоретические и экспериментальные исследования обмолота зерна в роторных молотильно-сепарирующих устройствах проводили П. И. Миу [27], К. О. Осуэке [28], Л. Сюй и И. Ли, [29; 30], С. Хуань-Удом. В частности, П. И. Миу была разработана математическая модель движения зерна в аксиальном роторном молотильном устройстве [28]. К. О. Осуэке приведена модель воздействия трения и ударов на зерно в роторном молотильном устройстве [27]. С. Хуань-Удом исследовал влияние параметров аксиального роторного молотильного устройства на дробление зерна [31]. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований было установлено, что роторные молотильные устройства обеспечивают снижение травмирования зерна [4; 8; 9; 31]. Однако такое снижение является недостаточным, в част-

ности, оно не обеспечивает получение качественного семенного материала при создании новых сортов зерновых культур [32; 33]. Многочисленные технические решения по усовершенствованию роторных молотильных устройств не привели к значительному уменьшению травмирования зерна [13; 34–36].

Таким образом, анализ литературных источников подтвердил необходимость разработки нового малотравматичного способа выделения зерна из колоса и устройства для его осуществления.

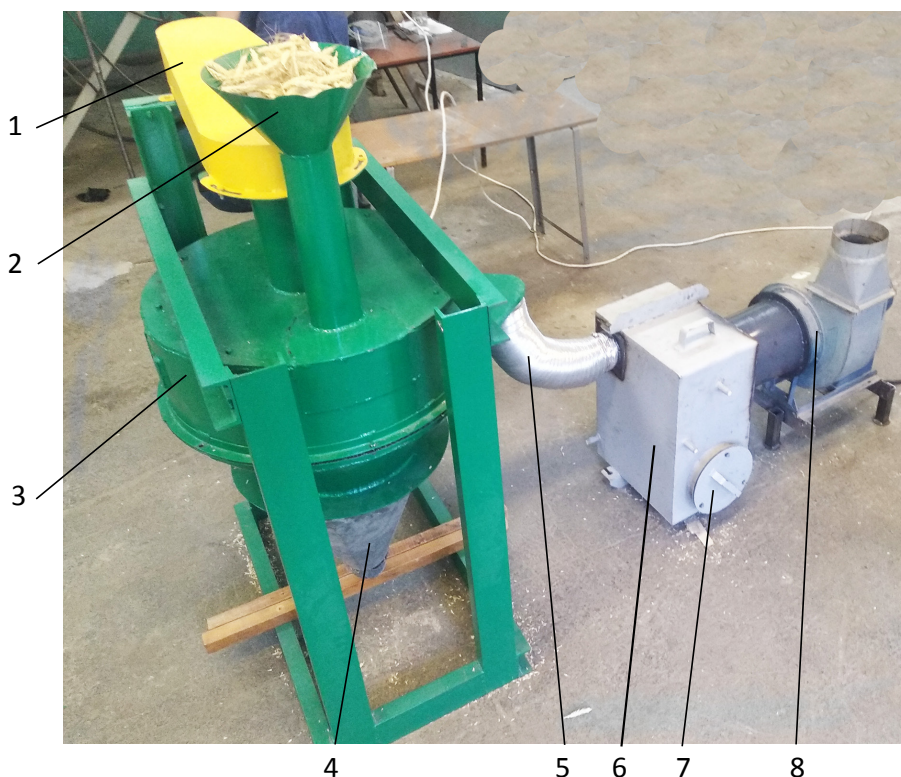
Материалы и методы

Оригинальная экспериментальная установка (рис. 1) представляет собой пневматическое молотильное устройство [37].

Молотильное устройство включает цилиндрический корпус, содержащий молотильную камеру и ротор с четырьмя лопастями. В верхней части корпуса размещен загрузочный бункер. В нижней части цилиндрического корпуса под молотильной камерой и ротором установлено решето, под которым находится разгрузочная камера, соединенная с емкостью для сбора обмолоченного зерна. Зазор между краем деки и решетом составляет 25 мм.

Ротор состоит из вертикального вала, на котором перпендикулярно его оси неподвижно закреплены верхний и нижний диски (рис. 2). Диски соединены стойками, к которым прикреплены держатели, на концах которых на равном расстоянии друг от друга установлены четыре лопасти. Лопасти установлены таким образом, что они не закрыты дисками ротора. Лопасти представляют собой изогнутые в направлении вращения ротора гладкие пластины с покрытием из полимерного материала.

Внутри цилиндрического корпуса молотильного устройства размещена дека, профиль поверхности которой представляет собой периодиче-



Р и с. 1. Экспериментальное пневматическое молотильное устройство (общий вид):
 1 – привод ротора; 2 – загрузочный бункер; 3 – цилиндрический корпус;
 4 – емкость для сбора зерна; 5 – отвод камеры пониженного давления; 6 – осадительная камера;
 7 – емкость для сбора легкой фракции; 8 – центробежный вентилятор

Fig. 1. Experimental pneumatic threshing device (general view): 1 – rotor drive; 2 – load bunker;
 3 – cylindrical case; 4 – capacity for grain collection; 5 – branch of the reduced pressure chamber;
 6 – settling chamber; 7 – capacity for light-load fraction collection; 8 – centrifugal fan

ское чередование выступов и впадин (рис. 2; 3). Дека выполнена из полимерного материала. Зазор между декой и внутренней поверхностью корпуса составляет 45 мм. Между внутренней поверхностью корпуса и декой размещена камера пониженного давления (вакуумная рубашка).

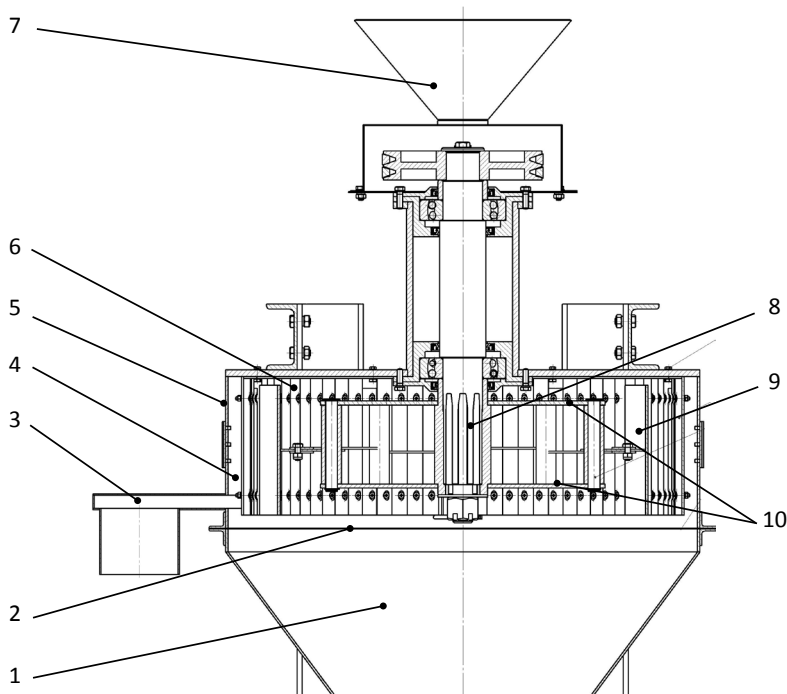
В ходе экспериментов зазор между краем лопасти и выступами деки составлял 16 мм.

Камера пониженного давления (вакуумная рубашка) соединена отводом с осадительной камерой, которая в свою очередь соединена с центробеж-

ным вентилятором. В осадительной камере размещена емкость для сбора легкой незерновой фракции. Пониженное давление воздуха в вакуумной рубашке и отводе создается центробежным вентилятором.

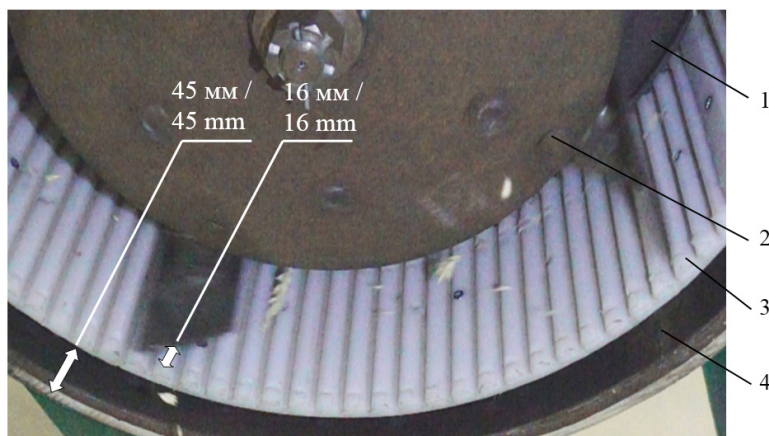
В ходе экспериментальных исследований срезанные вручную колосья безостой озимой пшеницы сорта «Лучезар» помещали в загрузочный бункер молотильного устройства. Суммарная масса колосьев в каждом опыте составляла 1000 г [38; 39].

Регулировка частоты вращения ротора молотильного устройства осу-



Р и с. 2. Продольный разрез экспериментального пневматического молотильного устройства:
1 – камера для сбора зерна; 2 – решето; 3 – отвод камеры пониженного давления;
4 – камера пониженного давления (вакуумная рубашка); 5 – цилиндрический корпус; 6 – дека;
7 – загрузочный бункер; 8 – ротор; 9 – лопасть; 10 – диск ротора

F i g. 2. Longitudinal section of experimental pneumatic threshing device: 1 – chamber for grain collection;
2 – sieve; 3 – branch of the reduced pressure chamber; 4 – reduced pressure chamber (vacuum jacket);
5 – cylindrical case; 6 – concave; 7 – load bunker; 8 – rotor; 9 – blade; 10 – rotor's disc



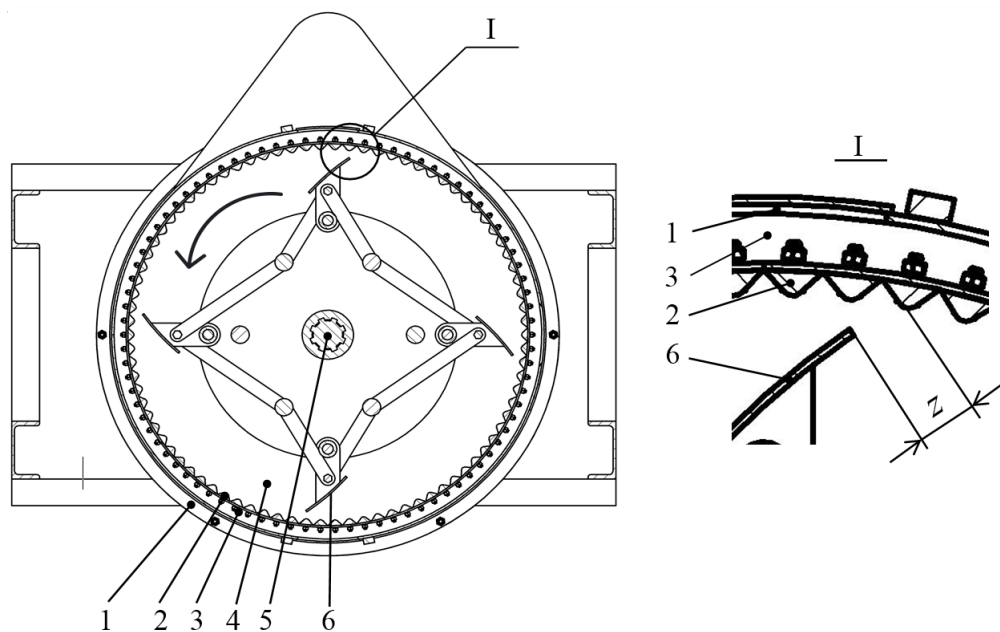
Р и с. 3. Экспериментальное пневматическое молотильное устройство (вид изнутри):
1 – лопасть; 2 – ротор; 3 – дека из пластика; 4 – камера пониженного давления (вакуумная рубашка)
F i g. 3. Experimental pneumatic threshing device (inside view): 1 – blade; 2 – rotor; 3 – plastic concave;
4 – reduced pressure chamber (vacuum jacket)

щественная частотным преобразователем.

В процессе работы экспериментального молотильного устройства колосья из загрузочного бункера по патрубку поступают в молотильную камеру. Выходное отверстие патрубка размещено таким образом, что зерна поступают в зону между декой и поверхностью верхнего диска ротора. В молотильной камере колосья увлекаются вихревым потоком воздуха, создаваемым лопастями ротора, во вращательное движение вдоль поверхности деки (рис. 4).

Обмолот колосьев в молотильном устройстве производится при взаимодействии колоса и деки, осуществляемом под чередующимся действием высокого и низкого давления воздуха, создаваемого лопастями. При враще-

нии ротора перед лопастями создается повышенное давление воздуха, под действием которого колосья прижимаются к деке, одновременно передвигаясь вдоль нее. При этом происходит взаимодействие колоса с ее выступами и впадинами, заключающееся в его истирании, в результате которого происходит разрушение связей зерен с колосом и выделение их из него. При прохождении лопасти мимо прижатого к деке колоса он находится в зоне между ними и не подвергается ударному воздействию. Позади лопастей создается пониженное давление воздуха, под действием которого колосья отдалаются от деки. Чередование действия повышенного и пониженного давления воздуха на колосья происходит непрерывно вплоть до разрушения колоса



Р и с. 4. Схема молотильной камеры экспериментальной установки: 1 – корпус; 2 – дека; 3 – камера пониженного давления (вакуумная рубашка); 4 – молотильная камера; 5 – ротор; 6 – лопасть; z – зазор между лопастью и декой

F i g. 4. Scheme of the threshing camera of the experimental device: 1 – case; 2 – concave; 3 – reduced pressure chamber (vacuum jacket); 4 – threshing chamber; 5 – rotor; 6 – blade; z – clearance between the blade and a concave

и выделения из него всех зерен. Таким образом, непосредственно в процессе обмолота зерна почти не подвергаются прямому ударному воздействию подвижного рабочего органа (лопасти).

Выделенное из колосьев зерно под действием силы тяжести через решето поступает в разгрузочную камеру и далее в емкость для сбора зерна. Частицы легкой незерновой части колосьев под действием создаваемого центробежным вентилятором пониженного давления воздуха перемещаются в вакуумную рубашку, откуда всасываются в отвод и поступают по нему в осадительную камеру, где осаждаются в емкости для сбора легкой фракции. Интенсивность воздушного потока, создаваемого центробежным вентилятором, значительно превышает интенсивность воздушного потока, создаваемого лопастями ротора, благодаря чему обеспечивается устойчивое перемещение легкой незерновой части колосьев в вакуумную рубашку и далее в отвод и осадительную камеру.

Величина зазора $z = 16$ мм между краем лопасти и вершиной выступа деки в данном исследовании обоснована тем, что она больше, чем толщина колосьев безостой озимой пшеницы (не более 15 мм), благодаря чему колосья не защемляются в зазоре и практически не подвергаются ударам лопастей в процессе обмолота, что снижает травмирование зерна. Для остистой озимой пшеницы и других зерновых культур может быть установлена иная величина зазора.

Следует отметить, что на начальном этапе обмолота при попадании в молотильную камеру до начала установившегося движения вдоль деки под действием воздушного потока колосья могут подвергаться единичным ударам лопастей ротора. Также нельзя полностью исключить возможность случайных единичных ударных воздействий лопасти на колос в процессе обмолота. Имеющимися в распоряжении авторов техническими средствами невозможно

было точно оценить вклад в травмирование зерна именно ударных воздействий лопастей. Поэтому оценивалось травмирование зерен в целом в результате применения пневматического метода обмолота. Для уменьшения травмирования зерна при возможных ударах лопастей последние имели покрытие из полимерного материала.

Процесс разрушения колосьев в молотильной камере при пневматическом обмолоте фиксировали для последующего изучения с помощью скоростной видеосъемки. Видеосъемку производили высокоскоростной камерой Evercam 1000-4-C с цветным сенсором. Режим видеосъемки: разрешение 1280×800 пикселей, частота кадров 1000 к/с. Видеокамеру и источник света для нее (светодиодная лампа в ударопрочной колбе) размещали в наклонной камере для сбора зерна (рис. 2) таким образом, чтобы видеокамера снизу фиксировала процессы, происходящие в молотильной камере. При этом для удобства видеосъемки временно удаляли решето. Данные с видеокамеры по кабелю передавали на компьютер и записывали на его жесткий диск.

Целью проведения высокоскоростной видеосъемки было последующее визуальное изучение сохраненных видеозаписей фактического процесса пневматического обмолота колосьев и сравнение его с теоретически предсказанным без численного определения параметров. При проведении же опытов по установлению точных значений травмирования зерна при пневматическом обмолоте видеосъемка не производилась.

Было проведено 5 серий опытов, в каждом из которых при помощи частотного преобразователя устанавливали определенное значение частоты вращения ротора и, соответственно, линейной скорости движения лопастей. Частоту вращения ротора варьировали в диапазоне 402...732 об/мин (6,7...12,2 Гц), линейную скорость

движения его лопасти соответственно изменяли в диапазоне 13,5...24,6 м/с. Каждый опыт осуществлялся в трех повторностях.

После завершения каждого опыта выделенные зерна подвергали визуальному осмотру при помощи стереомикроскопа Soptop SZX12 для определения наличия травмирования [40], то есть дробления зерна, повреждения его зародыша, а также повреждения эндосперма [41; 42]. Показатели травмирования и дробления зерна определялись по общепринятой в семеноводстве методике В. В. Гриценко и З. М. Калошиной¹.

Основной целью экспериментальных исследований было определение показателей травмирования и дробления зерна при применении разработанного способа пневматического обмолота и молотильного устройства для его осуществления в сравнении с традиционными способами обмолота. Поэтому изучалось лишь выделенное в процессе обмолота и собранное в емкости для его сбора зерно на наличие травмирования и дробления, а также на наличие примеси легкой незерновой части колосьев в выделенном зерне. Определялся сам факт наличия эффективного разделения зерновой и легкой незерновой частей колосьев в экспериментальном молотильном устройстве без численной оценки потерь зерна, выводимого в циклон вместе с легкими частицами.

Результаты исследования

В результате выполненных экспериментальных исследований установлено, что процесс пневматического обмолота колосьев озимой пшеницы протекает успешно и дает удовлетворительные результаты.

Визуальное изучение видеозаписей скоростной видеосъемки процесса работы экспериментального пневматического молотильного устройства (рис. 5) показало, что происходящий в моло-

тильной камере фактический процесс обмолота колоса пшеницы совпадает с теоретически предсказанным и протекает в соответствии с положениями, принятыми при конструировании данного молотильного устройства.

На рисунке 5а показано действие на колос пшеницы области высокого давления воздуха перед движущейся лопастью ротора, заключающееся в том, что колос под его действием перемещается к деке и прижимается к ней.

На рисунке 5б показано разрушение колоса, наступающее при его перемещении вдоль деки под действием высокого давления и взаимодействия с ее выступами и впадинами, в результате которого происходит выделение из него зерен и разделение его на части.

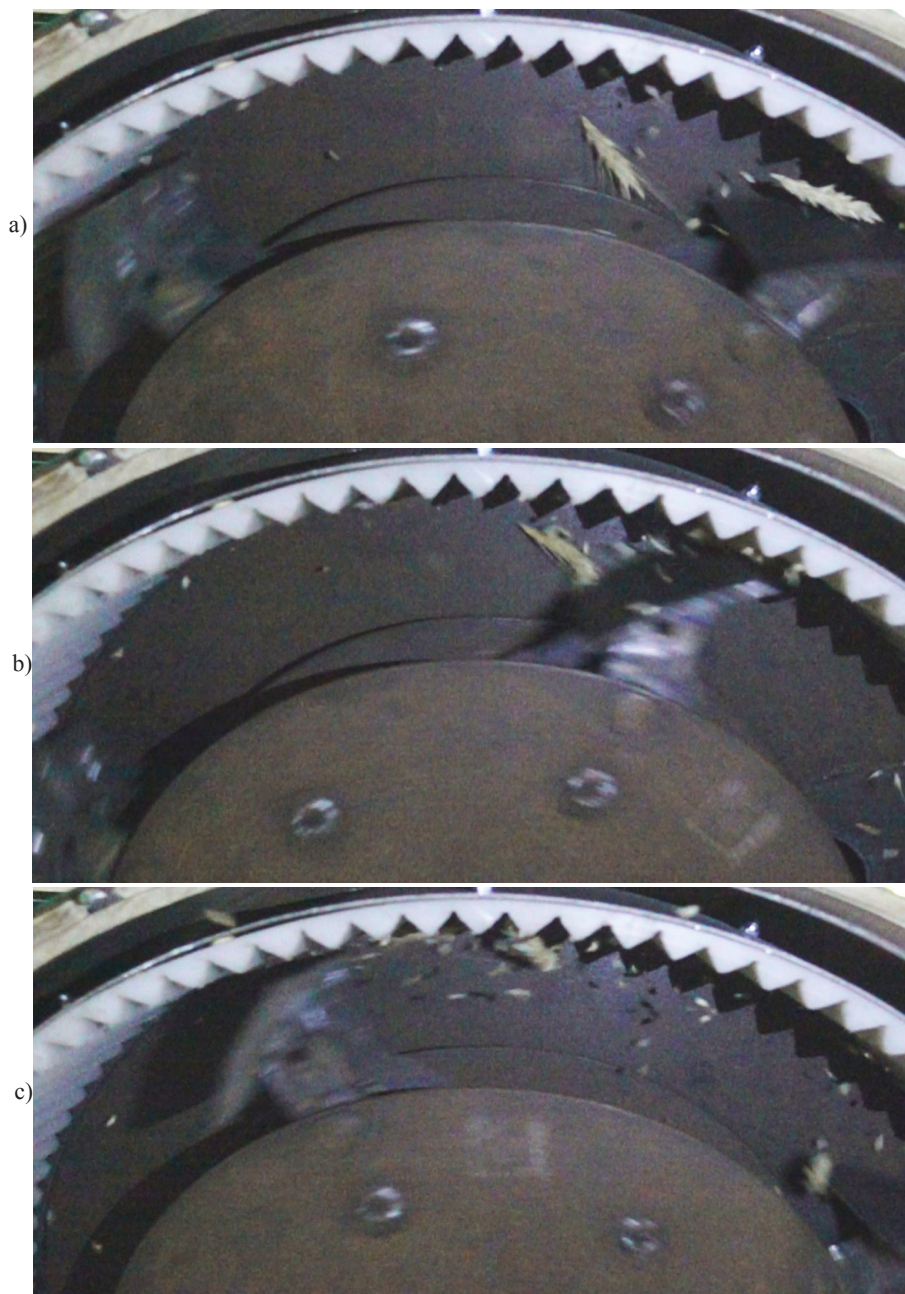
На рисунке 5с показано действие на колос области низкого давления воздуха позади движущейся лопасти, заключающееся в том, что части колоса отдаляются от деки.

Затем цикл воздействия на колос, показанный на рисунке 5, повторяется и продолжается до полного его разрушения и выведения выделенных зерен и незерновой части колосьев из молотильной камеры в соответствующую емкость молотильного устройства.

При изучении видеозаписей установлено, что зерна в процессе пневматического обмолота практически не подвергаются непосредственному ударному воздействию со стороны лопастей ротора. Единичные ударные воздействия лопастей на колос и содержащиеся в нем зерна происходят в основном на начальном этапе обмолота в момент поступления колосьев в молотильную камеру.

Изучение видеозаписей также показало, что в процессе обмолота не исключена возможность ударного воздействия лопастей на колосья, причем ее вероятность повышается при увеличении скорости движения лопастей.

¹ Гриценко В. В., Калошина З. М. Семеноведение полевых культур. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1984. 272 с.



Р и с. 5. Процесс обмолота колоса пшеницы в пневматическом молотильном устройстве:

а) действие на колос области высокого давления воздуха; б) разрушение колоса при взаимодействии с декой; в) действие на колос области низкого давления воздуха

F i g. 5. Threshing process of wheat ears in the pneumatic threshing device: a) action on an ear of area the air high pressure; b) ear destruction in case of interaction with a concave; c) action on an ear of area the air low pressure

Установлено, что выделение зерен из колоса в процессе пневматического обмолота в основном происходит при контактном взаимодействии колосьев с негладкой поверхностью деки, а не в результате ударов по ним лопастей.

Результаты экспериментальных исследований процесса пневматического обмолота колосьев озимой пшеницы представлены в таблице 1.

Анализ результатов экспериментов показывает, что травмирование и разрушение зерна максимальны при наибольшей скорости движения лопастей ротора и, соответственно, скорости движения колосьев в молотильной камере и снижаются при ее уменьшении. Особенно значительно доля травмированного зерна и доля дробленого зерна снижаются при линейной скорости лопасти менее 20 м/с.

На рисунке 6 представлен график зависимости доли зерна с повреждением зародыша и доли дробленого зерна от линейной скорости лопасти при пнев-

матическом обмолоте колосьев озимой пшеницы. Данный график показывает, что максимальные значения показателей повреждения зерна наблюдаются при максимальной линейной скорости движения лопастей ротора 24,6 м/с. При снижении скорости движения лопастей снижается и травмирование зерна. При минимальной скорости движения лопасти 13,5 м/с доля зерна с повреждением зародыша и доля дробленого зерна снижаются практически до нуля.

Анализируя представленные на графике (рис. 6) результаты экспериментов, можно сделать вывод, что диапазон линейной скорости движения лопасти 13,5...20 м/с является наиболее благоприятным для пневматического обмолота зерна с точки зрения снижения травмирания его зародыша и уменьшения дробления зерна. Меньшие значения скорости движения лопасти принимать нерационально, так как в таком случае не обеспечивается эффективное взаимодействие колоса и деки вследст-

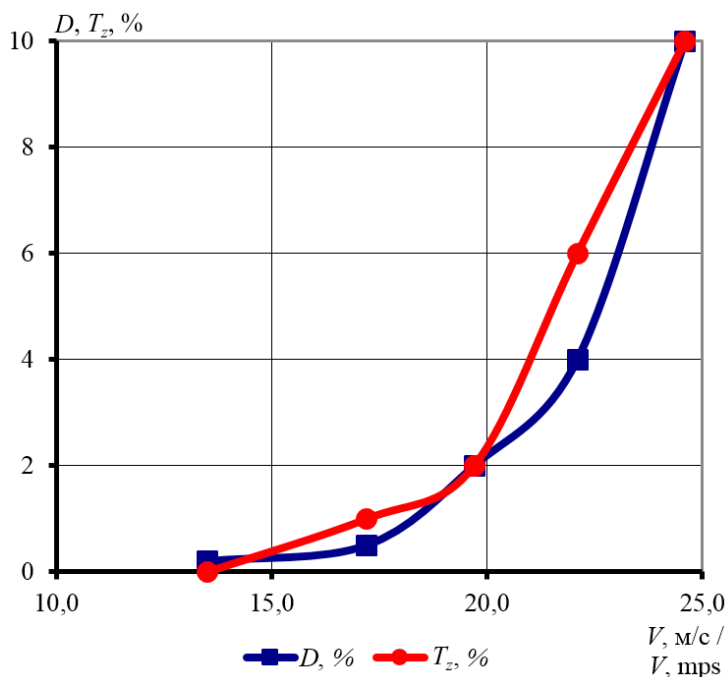
Таблица 1

Table 1

Результаты экспериментальных исследований процесса пневматического обмолота колосьев озимой пшеницы

Experimental data of the pneumatic threshing process of winter wheat ears

Частота электрической сети, Гц / Electrical network frequency, Hz	Частота вращения ротора, об/мин / Rotor speed, rpm	Линейная скорость лопасти ротора, м/с / Linear rotor blade speed, mps	Доля дробленого зерна, % (по массе) / Fraction of breakage grain, % (on weight)	Доля травмированного зерна, % (количество зерен) / Fraction of damaged grain, % (grains quantity)	
				Поврежден зародыш / Germ damage	Поврежден эндосперм / Endosperm damage
40	732	24,6	10	10	63
36	660	22,1	4	6	59
32	588	19,7	2	2	44
28	510	17,2	0,5	1	37
22	402	13,5	0,2	0	23



Р и с. 6. Зависимость доли зерна с повреждением зародыша и доли дробленого зерна от линейной скорости лопасти при пневматическом обмолоте колосьев озимой пшеницы:

V – линейная скорость лопасти ротора; D – доля дробленого зерна;

T_z – доля зерна с повреждением зародыша

Fig. 6. Relationship of fraction of grain with germ damage and fraction of breakage grain in case of the pneumatic threshing of winter wheat ears: V – linear rotor blade speed;

D – fraction of breakage grain; T_z – fraction of grain with germ damage

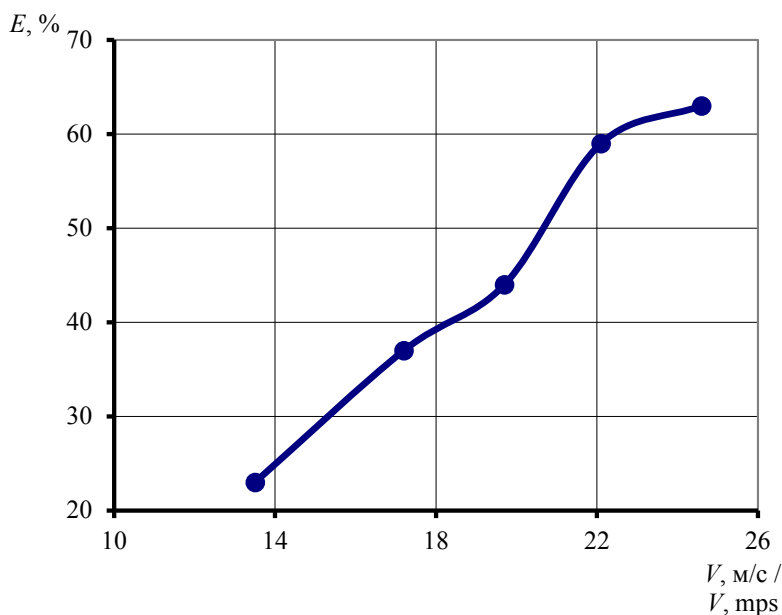
вие недостаточной величины повышенного давления воздуха, создаваемого лопастями ротора.

При пневматическом обмолоте колосьев пшеницы доля зерна с повреждением эндосперма также снижалась при уменьшении линейной скорости лопасти (рис. 7).

Минимальное значение доли зерна с повреждением эндосперма при минимальной скорости лопасти 13,5 м/с составило 23 %. В диапазоне скоростей движения лопасти 13,5...20 м/с значения доли зерна с повреждением эндосперма составили 23...45 %. Значения доли зерен с повреждением эндосперма более 30 % являются достаточно высо-

кими, поэтому рациональный диапазон линейной скорости движения лопасти следует сузить до 13,5...15 м/с.

Сравнение доли травмированного и дробленного зерна при пневматическом обмолоте с долей такого зерна при традиционном комбайновом обмолоте показало, что исследуемый способ обмолота обеспечивает снижение травмирования зерна. В частности, доля зерна с повреждением эндосперма при исследуемом способе обмолота в среднем на 10...12 % меньше, чем при обмолоте современным зерноуборочным комбайном. Доля дробленого зерна при пневматическом обмолоте соответствует его доле после обмолота



Р и с. 7. Зависимость доли зерна с повреждением эндосперма от линейной скорости лопасти при пневматическом обмолоте колосьев озимой пшеницы: E – доля зерна с повреждением эндосперма; V – линейная скорость лопасти ротора

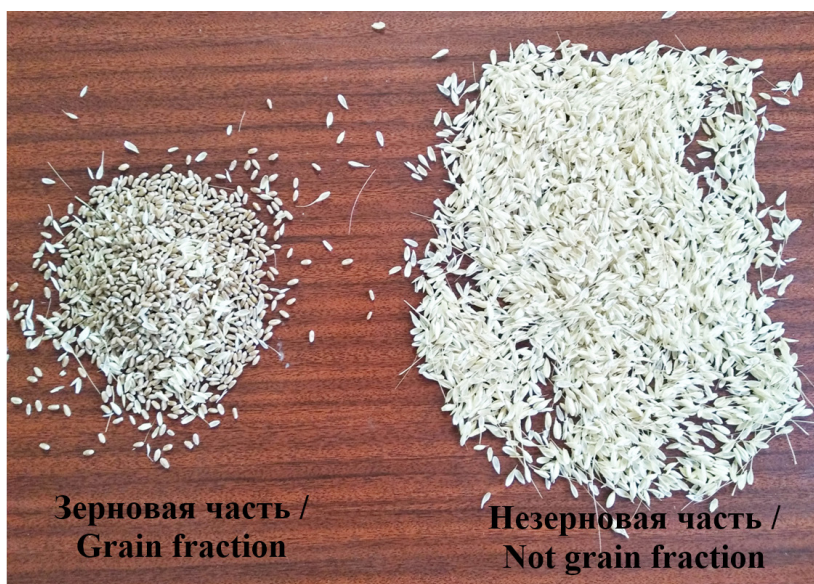
F i g. 7. Relationship of a fraction of grain with endosperm damage from the line speed of the blade in case of the pneumatic threshing of winter wheat ears: E – fraction of grain with endosperm damage; V – linear rotor blade speed

современными комбайнами. Доля зерна с повреждением зародыша в среднем на 5 % меньше, чем при обмолоте существующими молотильными устройствами комбайнов. Особенно важно то, что при минимальной скорости движения лопастей 13,5 м/с травмирования зародыша и дробления зерна практически не наблюдается. Это позволяет значительно повысить эффективность селекционного процесса за счет увеличения сохранности и всхожести ценного семенного материала.

Также установлено, что в результате пневматического обмолота на экспериментальной установке происходит эффективное разделение зерновой и легкой незерновой частей колосьев, которые накапливаются в соответствующих емкостях экспериментальной молотильной установки (рис. 8).

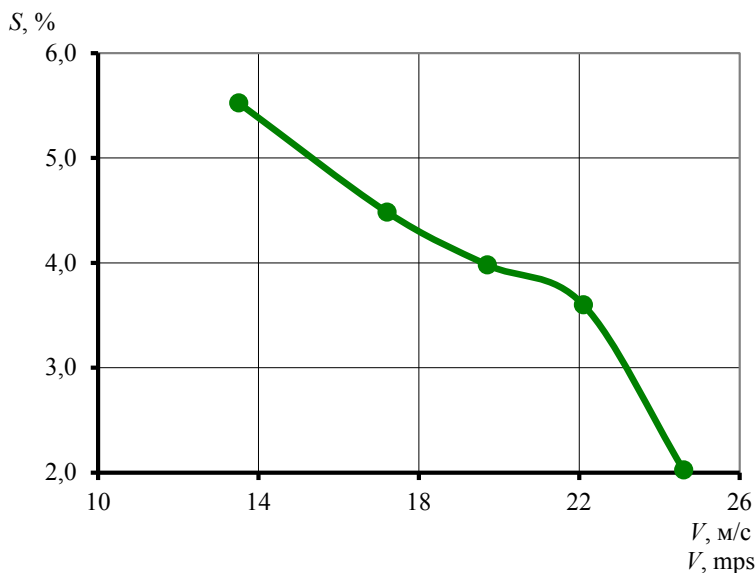
Исследование зерна, выделенного из колосьев и собранного в соответствующую емкость экспериментальной молотильной установки, показало, что способ пневматического обмолота обеспечивает эффективное отделение легкой незерновой фракции от зерен (рис. 9).

Установлено, что при уменьшении линейной скорости лопасти ротора доля неотделенных легких незерновых частиц в общей массе выделенного зерна увеличивается, достигая максимума при минимальном значении скорости 13,5 м/с. Однако достигнутые значения этого показателя в пределах 2...5,5 % являются приемлемыми для селекционных работ. Увеличение этого показателя до 5,5 % при снижении скорости лопастей компенсируется происходящим при этом значительным снижением травмирования и дробления зерна.



Р и с. 8. Разделение зерновой и незерновой частей колосьев в результате пневматического обмолота

F i g. 8. Partition of a grain and not grain fraction of ears as a result of the pneumatic threshing



Р и с. 9. Зависимость доли легкой незерновой фракции в общей массе выделенного зерна от линейной скорости лопасти при пневматическом обмолоте колосьев озимой пшеницы: S – доля легкой незерновой фракции в общей массе выделенного зерна; V – линейная скорость лопасти ротора

F i g. 9. Relationship of a light-load not grain fraction in lump of the selected grain on the line speed of the blade in case of the pneumatic threshing of winter wheat ears: S – light-load not grain fraction in lump of the selected grain; V – linear rotor blade speed

Обсуждение и заключение

В результате экспериментальных исследований установлено, что процесс пневматического обмолота колосьев пшеницы протекает успешно и дает удовлетворительные результаты, обеспечивая снижение травмирования эндосперма зерна на 10...12 %. Травмирование же зародыша зерна снижается на 5 %, практически исключая его. Дробление зерна при минимальной скорости лопастей ротора составило не более 0,5 %.

Сопоставление доли травмированного и дробленного зерна в общем его количестве при пневматическом обмолоте с долей поврежденного зерна при традиционном комбайновом обмолоте показало, что предлагаемый способ обмолота обеспечивает снижение травмирования.

Минимальное травмирование и дробление зерна при пневматическом обмолоте наблюдалось при минимальной линейной скорости движения лопастей ротора 13,5 м/с. Рациональный диапазон линейной скорости движения лопастей ротора составляет 13,5...20 м/с. Меньшие значения скорости движения лопасти принимать нерационально, так как при этом не обеспечивается эффективное взаимодействие колоса и деки по причине недостаточной величины повышенного давления воздуха, создаваемого лопастями ротора.

Снижение травмирования достигается тем, что зерна в процессе обмолота практически не подвергаются непосредственному ударному воздействию со стороны рабочих органов молотильного устройства, в данном случае – лопастей ротора. Единичные ударные воздействия лопастей на колос и содержащиеся в нем зерна происходят в основном при поступлении колосьев в молотильную камеру до начала их установившегося движения в процессе обмолота.

Установлено, что выделение зерен из колоса в основном происходит при

контактном взаимодействии колосьев с поверхностью деки, а не в результате ударов лопастей.

Выделение зерен из колоса происходит при контактном взаимодействии колосьев с негладкой поверхностью деки под действием потока воздуха, при этом зерна подвергаются меньшему механическому воздействию, чем в традиционных молотильных устройствах с ударными рабочими органами.

Уменьшение травмирования зерна достигается также тем, что поверхности лопастей и деки изготовлены из полимерного материала, что обеспечивает снижение контактных воздействий на зерно по сравнению со стальными рабочими органами.

Однако доля зерна с повреждением эндосперма, выделенного в результате пневматического обмолота, хотя и ниже, чем при традиционном обмолоте, но все еще достаточно высока – 23 % при минимальной скорости лопасти 13,5 м/с, что требует дальнейшего совершенствования молотильного устройства для осуществления предлагаемого способа обмолота.

Установлено, что в результате пневматического обмолота на экспериментальном молотильном устройстве происходит эффективное разделение зерновой и легкой незерновой частей колосьев. Но при этом уменьшение линейной скорости лопасти, эффективное с точки зрения снижения травмирования зерна, приводит к небольшому увеличению содержания легкой незерновой фракции в общей массе выделенного зерна. В ходе дальнейшего исследования доля легкой незерновой фракции в выделенном зерне может быть минимизирована включением в состав пневматического молотильного устройства узла для дополнительного провеивания выделенного в молотильной камере зерна.

Применение разработанного способа пневматического обмолота и соответствующего молотильного устройства позволит снизить травмирование

зерна колосовых культур при обмолоте, что особенно важно при селекционных работах, так как позволит увеличить выход ценного селекционного материала. Принцип пневматического об-

молота может быть положен в основу разработки нового малотравматичного молотильного аппарата для комбайнов, убирающих зерновые только методом очеса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Shahbazi, F.** Mechanical Damage to Wheat and Triticale Seeds Related to Moisture Content and Impact Energy / F. Shahbazi, S. Valizadeh, A. Dolwlatshah // *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. – 2012. – Vol. 14, issue 4. – Pp. 150–155. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/0087/755cec528440e60c45e7d4bb2d19b771fbcd.pdf> (дата обращения: 14.02.2020).
2. **Пехальский, И. А.** Травмирование внутренних структур зерновок как фактор снижения продуктивности семян зерновых культур / И. А. Пехальский, В. М. Кряжков, А. А. Артюшин [и др.] // *Научный журнал КубГАУ*. – 2016. – Т. 117, № 3. – С. 783–792. URL: <http://www.ej.kubagro.ru/2016/03/pdf/51.pdf> (дата обращения: 14.02.2020). – Рез. англ.
3. **Shahbazi, F.** Mechanical Damage to Corn Seeds / F. Shahbazi, R. Shahbazi. – DOI 10.2478/cerce-2018-0021 // *Cercetari Agronomice in Moldova*. – 2018. – Vol. 51, issue 3. – Pp. 1–12. URL: [https://content.sciendo.com/configurable/contentpage/journals\\$002fcerce\\$002f51\\$002f3\\$002farticle-p1.xml](https://content.sciendo.com/configurable/contentpage/journals$002fcerce$002f51$002f3$002farticle-p1.xml) (дата обращения: 14.02.2020).
4. **Benaseer, S.** Impact of Harvesting and Threshing Methods on Seed Quality – a Review // S. Benaseer, P. Masilamani, A. Albert [et al.] // *Agricultural Reviews*. – 2018. – Vol. 39, issue 3. – Pp. 183–192. URL: https://www.researchgate.net/publication/334050911_Impact_of_harvesting_and_threshing_methods_on_seed_quality-A_review (дата обращения: 14.02.2020).
5. **Orobinsky, V. I.** Improving the Mechanization of High-Quality Seed Production / V. I. Orobinsky, A. P. Tarasenko, A. M. Gievsky [et al.]. – DOI 10.2991/agrosmart-18.2018.159 // *International Scientific and Practical Conference “AgroSMART – Smart Solutions for Agriculture” (AgroSMART 2018)*. Advances in Engineering Research. – 2018. – Vol. 151. – Pp. 849–852. URL: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/agrosmart-18/55908804> (дата обращения: 14.02.2020).
6. **Погосян, В. М.** Обмолот початков кукурузы трехвалковой молотилкой на этапе селекции / В. М. Погосян, В. С. Курасов // *World Science : материалы научно-практической конференции*. – 2016. – № 1 (5). – С. 11–13. URL: <http://archive.ws-conference.com/wp-content/uploads/1321.pdf> (дата обращения: 14.02.2020).
7. **Shahbazi, F.** A Study on the Seed Susceptibility of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars to Impact Damage // *Journal of Agricultural Science and Technology*. – 2012. – Vol. 14. – Pp. 505–512. URL: <http://jfst.modares.ac.ir/article-23-749-en.pdf> (дата обращения: 14.02.2020).
8. **Govindaraj, M.** Effect of Different Harvesting and Threshing Methods on Seed Quality of Rice Varieties / M. Govindaraj, P. Masilamani, D. Asokan [et al.]. – DOI 10.20546/ijcmas.2017.608.281 // *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. – 2017. – Vol. 6, issue 8. – Pp. 2375–2383. URL: <https://www.ijcmas.com/abstractview.php?ID=3832&vol=6-8-2017&SNo=281> (дата обращения: 14.02.2020).
9. **Fu, J.** Review of Grain Threshing Theory and Technology / J. Fu, Z. Chen, L. Han [et al.]. – DOI 10.25165/ij.jabe.20181103.3432 // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. – 2018. – Vol. 11, issue 3. – Pp. 12–20. URL: <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/3432> (дата обращения: 14.02.2020).
10. **Ожерельев, В. Н.** Инновации процесса выделения зерна из колоса / В. Н. Ожерельев, В. Б. Попов // *Вестник ГГТУ имени П. О. Сухого*. – 2017. – № 4. – С. 26–35. URL: <https://elib.gstu.by/handle/220612/18219> (дата обращения: 14.02.2020).
11. **Бахтерев, А. А.** Совершенствование процесса обмолота зерновых культур / А. А. Бахтерев, Г. А. Иовлев, А. Г. Несговорцов // *Теория и практика мировой науки*. – 2017. – № 10. – С. 51–60.
12. **Sotnar, M.** Influence of the Combine Harvester Parameter Settings on Harvest Losses / M. Sotnar, J. Pospisil, J. Marecek [et al.]. – DOI 10.2478/ata-2018-0019 // *Acta Technologica Agriculturae*. – 2018. – Vol. 21, issue 3. – Pp. 105–108. URL: <https://content.sciendo.com/view/journals/ata/21/3/article-p105.xml> (дата обращения: 14.02.2020).

13. Семёнов, В. А. Способ обмолота колосьев и сепарации зерна в молотильно-сепарирующем устройстве / В. А. Семёнов, Е. И. Семёнова // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. – 2013. – № 14. – С. 123–129. URL: http://www.rgazu.ru/upload/iblock/b65/vestnik_14.pdf (дата обращения: 14.02.2020). – Рез. англ.
14. Бурьянов, М. А. Разработка и совершенствование методов обоснования технологии комбайновой уборки зерновых колосовых культур очесом / М. А. Бурьянов, А. И. Бурьянов, И. В. Червяков [и др.] // Вестник аграрной науки Дона. – 2017. – Т. 2, № 38. – С. 59–72. URL: http://achga.ru/files/vestnik/VD2_2017.pdf (дата обращения: 14.02.2020). – Рез. англ.
15. Бурьянов, А. И. Комбайновая технология уборки зерновых культур: достоинства и недостатки / А. И. Бурьянов, М. А. Бурьянов // Актуальные агросистемы. – 2017. – № 5. – С. 22–25.
16. Ожерельев, В. Н. Перспективные направления снижения энергоёмкости процесса выделения зерна из колоса / В. Н. Ожерельев, В. В. Никитин // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – № 8. – С. 30–31. URL: http://www.cnsb.ru/jour/j_as.asp?id=113070 (дата обращения: 14.02.2020).
17. Бурьянов, А. И. Методы и результаты определения естественной силы связи зерна с колосом в период созревания и полной спелости / А. И. Бурьянов, И. В. Червяков, А. А. Коляничко [и др.]. – DOI 10.31367/2079-8725-2018-60-6-21-25 // Зерновое хозяйство России. – 2018. – № 6. – С. 21–25. URL: <https://www.zhros.ru/jour/article/view/551> (дата обращения: 14.02.2020). – Рез. англ.
18. Shahbazi, F. Simulation and Modeling the Mechanical Damage to Cowpea Seeds under Impact / F. Shahbazi, A. Dolatshah, S. Valizadeh // Post Harvest, Food and Process Engineering. International Conference of Agricultural Engineering-CIGR-AgEng 2012: Agriculture and Engineering for a Healthier Life. – Valencia : CIGR-EurAgEng, 2012. URL: https://www.researchgate.net/publication/266167974_Simulation_and_Modeling_the_Mechanical_Damage_to_Cowpea_Seeds_Under_Impact (дата обращения: 14.02.2020).
19. Khazaei, J. Evaluation and Modeling of Physical and Physiological Damage to Wheat Seeds under Successive Impact Loadings: Mathematical and Neural Networks Modeling / J. Khazaei, F. Shahbazi, J. Massah [et al.]. – DOI 10.2135/cropsci2007.04.0187 // Crop Science. – 2008. – Vol. 48, issue 4. – Pp. 1532–1544. URL: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2135/cropsci2007.04.0187> (дата обращения: 14.02.2020).
20. Lashgari, M. Qualitative Analysis of Wheat Grain Damage during Harvesting with John Deere Combine Harvester / M. Lashgari, M. Hossein, M. Omid [et al.] // International Journal of Agriculture and Biology. – 2008. – Vol. 10, issue 2. – Pp. 201–204. URL: https://www.researchgate.net/publication/236484261_Qualitative_Analysis_of_Wheat_Grain_Damage_during_Harvesting_with_John_Deere_Combine_Harvester (дата обращения: 14.02.2020).
21. Shahbazi, F. Breakage Susceptibility of Wheat and Triticale Seeds Related to Moisture Content and Impact Energy / F. Shahbazi, A. Dowlathshah, S. Valizadeh. – DOI 10.2478/v10298-012-0051-4 // Cercetari Agronomice in Moldova. – 2012. – Vol. 45, issue 3. – Pp. 5–13. URL: <https://content.sciendo.com/view/journals/cerce/45/3/article-p5.xml> (дата обращения: 14.02.2020).
22. Yu, Y. DEM-Based Simulation of the Corn Threshing Process / Y. Yu, H. Fu, J. Yu. – DOI 10.1016/j.apr.2015.07.015 // Advanced Powder Technology. – 2015. – Vol. 26, issue 5. – Pp. 1400–1409. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921883115001582?via%3Dihub> (дата обращения: 14.02.2020).
23. Maertens, K. Flow Rate Based Prediction of Threshing Process in Combine Harvesters / K. Maertens, J. De Baerdemaeker // Applied Engineering in Agriculture. – 2003. – Vol. 19, issue 4. – Pp. 383–388. URL: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=14915> (дата обращения: 14.02.2020).
24. Ma, J. An Innovative Vertical Axial-Flow Threshing Machine Developed in China / J. Ma // Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. – 2007. – Vol. 38, № 2. – Pp. 18–22.
25. Radwan, G. G. Development and Test Attachments to the Tangential Flow Thresher to Suit Caraway Crop Threshing / G. G. Radwan, R. G. Salim, A. S. Al-Ashry // Misr Journal of Agricultural Engineering. – 2009. – Vol. 26, issue 3. – Pp. 1068–1080. URL: <http://www.mjae.eg.net/pdf/2009/july/2.pdf> (дата обращения: 14.02.2020).
26. Semenova, E. I. Technical Modernization of Harvesting Machinery / E. I. Semenova, A. V. Bogoviz, V. A. Semenov. – DOI 10.1007/978-3-319-90835-9_22 // Perspectives on the Use of New Information and Communication Technology (ICT) in the Modern Economy. Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2017. – Vol. 726. – Pp. 189–196. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-90835-9_22 (дата обращения: 14.02.2020).

27. **Osueke, C. O.** Frictional Impact Modeling of a Cereal Thresher / C. O. Osueke // American Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2011. – Vol. 4, issue 3. – Pp. 405–412. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/15dc/d92eb32a41f4a16715630e212b1e6410973f.pdf> (дата обращения: 14.02.2020).
28. **Miu, P. I.** Mathematical Model of Material Kinematics in an Axial Threshing Unit / P. I. Miu, H.-D. Kutzbach. – DOI 10.1016/j.compag.2007.04.002 // Computers and Electronics in Agriculture. – 2007. – Vol. 58, issue 2. – Pp. 93–99. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169907001056> (дата обращения: 14.02.2020).
29. **Lizhang, X.** Modeling and Experiment to Threshing Unit of Stripper Combine / X. Lizhang, L. Yaoming // African Journal of Biotechnology. – 2011. – Vol. 10, issue 20. – Pp. 4106–4113. URL: <https://academicjournals.org/journal/AJB/article-abstract/6163E2B29675>
30. **Tang, Z.** Modeling and Design of a Combined Transverse and Axial Flow Threshing Unit for Rice Harvesters / Z. Tang, Y. Li, L. Xu [et al.]. – DOI 10.5424/sjar/2014124-6077 // Spanish Journal of Agricultural Research. – 2014. – Vol. 12, issue 4. – Pp. 973–983. URL: <http://revistas.inia.es/index.php/sjar/article/view/6077> (дата обращения: 14.02.2020).
31. **Chuan-Udom, S.** Effects of Operating Factors of an Axial Flow Rice Combine Harvester on Grain Breakage / S. Chuan-Udom, W. Chinsuwan // Songklanakarin Journal of Science and Technology. – 2011. – Vol. 33, issue 2. – Pp. 221–225. URL: <http://rdo.psu.ac.th/sjstweb/journal/33-2/0125-3395-33-2-221-225.pdf> (дата обращения: 14.02.2020).
32. **Дорохов, А. С.** Теоретическое обоснование процесса получения семенного материала при его репродуктировании в хозяйствах / А. С. Дорохов, М. Н. Московский, В. Г. Хамуев // Вестник ВИАЭСХ. – 2018. – № 3. – С. 127–132. URL: http://vestnik.viesh.ru/wp-content/uploads/2018/11/ВИАЭСХ_3_2018_БЛОК_1-156.pdf (дата обращения: 14.02.2020). – Рез. англ.
33. **Kumar, A.** Performance Evaluation of Harvesting and Threshing Methods for Wheat Crop / A. Kumar, A. Kumar, K. Khan [et al.]. – DOI 10.18782/2320-7051.2497 // International Journal of Pure & Applied Bioscience. – 2017. – Vol. 5, issue 2. – Pp. 604–611. URL: <http://www.ijpab.com/vol5-iss2a77.php> (дата обращения: 14.02.2020).
34. **Dhananchezhian, P.** Development and Comparative Study of Cast Iron Rasp Bar and Nylon Rasp Bar Threshing Cylinders for Paddy Threshing / P. Dhananchezhian, S. Parveen, N. K. S. Pandian [et al.] // Agricultural Engineering. – 2013. – № 4. – Pp. 45–54. URL: http://jageng.agrif.bg.ac.rs/files/casopis/PT_04-2013.pdf (дата обращения: 14.02.2020).
35. **Puzauskas, E.** Substantiation of Concave Crossbar Shape for Corn Ear Threshing / E. Puzauskas, D. Steponavicius, E. Jotautiene [et al.]. – DOI 10.5755/j01.mech.22.6.16370 // Mechanics. – 2016. – Vol. 22, issue 6. – Pp. 553–561. URL: <http://mechanika.ktu.lt/index.php/Mech/article/view/16370> (дата обращения: 14.02.2020).
36. **Zhao, Z.** Grain Separation Loss Monitoring System in Combine Harvester / Z. Zhao, Y. Li, J. Chen [et al.]. – DOI 10.1016/j.compag.2011.01.016 // Computers and Electronics in Agriculture. – 2011. – Vol. 76, issue 2. – Pp. 183–188. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169911000354?via%3Dihub#!> (дата обращения: 14.02.2020).
37. **Патент № 195355 Российская Федерация, МПК A01F 7/00(2006.01).** Молотильное устройство для селекционных работ : № 2019125549 : заявл. 12.08.2019 : опубл. 23.01.2020 / Лачуга Ю. Ф., Алабушев А. В., Пахомов В. И. [и др.] ; заявитель ФГБНУ «АНЦ «Донской». – 9 с. : ил. . URL: https://patents.s3.yandex.net/RU195355U1_20200123.pdf (дата обращения: 14.02.2020).
38. **Патент на селекционное достижение № 9602 Российская Федерация.** Пшеница мягкая озимая Лучезар : № 66568 : заявл. 24.12.2014 ; опубл. 08.07.2018 / Скрипка О. В., Гричаникова Т. А., Самофалова Н. Е. [и др.] ; заявитель ФГБНУ «АНЦ «Донской».
39. **Ионова, Е. В.** Технологическая оценка зерна сортов и линий озимой мягкой пшеницы селекции ФГБНУ «АНЦ «Донской» / Е. В. Ионова, Н. С. Кравченко, Н. Г. Игнатьева [и др.] // Зерновое хозяйство России. – 2017. – № 6. – С. 16–21. URL: <https://www.zhros.ru/jour/article/view/111> (дата обращения: 14.02.2020). – Рез. англ.
40. **Пехальский, И. А.** Методика определения комплексного травмирования зерна и семян машинами / И. А. Пехальский, А. А. Артюшин, В. П. Елизаров [и др.] // Научный журнал КубГАУ. – 2016. – № 120. – С. 399–411. URL: <http://www.ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/26.pdf> (дата обращения: 14.02.2020). – Рез. англ.

41. **Пехальский, И. А.** Универсальная классификация травматических повреждений внутренних структур семян сельскохозяйственных культур / И. А. Пехальский // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2015. – № 6. – С. 9–13. URL: <https://www.vimsmit.com/jour/article/download/102/58> (дата обращения: 14.02.2020). – Рез. англ.

42. **Пехальский, И. А.** О количественной и качественной оценке травмирования семян машинами / И. А. Пехальский, В. М. Кряжков, А. А. Артюшин [и др.] // Научный журнал КубГАУ. – 2016. – № 119. – С. 503–512. URL: <http://ej.kubagro.ru/2016/05/pdf/36.pdf> (дата обращения: 14.02.2020). – Рез. англ.

Поступила 06.09.2019; принята к публикации 11.11.2019; опубликована онлайн 31.03.2020

Об авторах:

Пахомов Виктор Иванович, заместитель директора по науке по механизации и электрификации ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» (347740, Россия, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), доктор технических наук, Researcher ID: Y-7085-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>, vnptim@gmail.com

Брагинцев Сергей Валерьевич, ведущий научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» (347740, Россия, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), кандидат технических наук, Researcher ID: Y-6307-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>, sbraginets@mail.ru

Бахчевников Олег Николаевич, научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» (347740, Россия, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), кандидат технических наук, Researcher ID: S-3312-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>, Scopus ID: 57202648620, oleg-b@list.ru

Бенова Елена Викторовна, старший научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» (347740, Россия, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), кандидат технических наук, Researcher ID: Y-6314-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7456-3514>, benova@km.ru

Рухляда Артем Игоревич, младший научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» (347740, Россия, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), Researcher ID: Y-6315-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2597-0818>, ruhlada1990@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. И. Пахомов – научное руководство, формулирование основной концепции исследования; С. В. Брагинцев – общее руководство экспериментальными исследованиями, проведение критического анализа результатов и формулирование выводов; О. Н. Бахчевников – анализ литературных данных, подготовка первоначального варианта текста и доработка текста; Е. В. Бенова – написание введения, проведение экспериментов и обработка их результатов; А. И. Рухляда – проведение экспериментов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Shahbazi F., Valizadeh S., Dolwlatshah A. Mechanical Damage to Wheat and Triticale Seeds Related to Moisture Content and Impact Energy. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2012; 14(4):150-155. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/0087/755ccc528440e60c45e7d4bb2d19b771fbcd.pdf> (accessed 14.02.2020). (In Eng.)
2. Pekhalskiy I.A., Kryazhkov V.M., Artushin A.A., et al. Traumatizing of Inside Structures of Weevils as a Factor of Reduction in Seeds' Productivity of Cereal Crops. *Nauchnyy zhurnal KubGAU = Scientific Journal of KubSAU*. 2016; 117(3):783-792. Available at: <http://www.ej.kubagro.ru/2016/03/pdf/51.pdf> (accessed 14.02.2020). (In Russ.)

3. Shahbazi F., Shahbazi R. Mechanical Damage to Corn Seeds. *Cercetari Agronomice in Moldova*. 2018; 51(3):1-12. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2478/cerce-2018-0021>
4. Benaseer S., Masilamani P., Albert A., et al. Impact of Harvesting and Threshing Methods on Seed Quality – a Review. *Agricultural Reviews*. 2018; 39(3):183-192. Available at: https://www.researchgate.net/publication/334050911_Impact_of_harvesting_and_threshing_methods_on_seed_quality-A_review (accessed 14.02.2020). (In Eng.)
5. Orobinsky V.I., Tarasenko A.P., Gievsky A. M., et al. Improving the Mechanization of High-Quality Seed Production. In: International Scientific and Practical Conference “AgroSMART – Smart Solutions for Agriculture” (AgroSMART 2018). *Advances in Engineering Research*. 2018; 151:849-852. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2991/agrosmart-18.2018.159>
6. Pogosyan V.M., Kurasov V.S. Corn Cobs Threshing With a Triple Roller Thresher at the Selection Stage. In: International Scientific and Practical Conference “World Science”. 2016; (1):11-13. Available at: <http://archive.ws-conference.com/wp-content/uploads/1321.pdf> (accessed 14.02.2020). (In Russ.)
7. Shahbazi F. A Study on the Seed Susceptibility of Wheat (*Triticum Aestivum* L.) Cultivars to Impact Damage. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2012; 14:505-512. Available at: <http://jfst.modares.ac.ir/article-23-749-en.pdf> (accessed 14.02.2020). (In Eng.)
8. Govindaraj M., Masilamani P., Asokan D., et al. Effect of Different Harvesting and Threshing Methods on Seed Quality of Rice Varieties. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2017; 6(8):2375-2383. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.608.281>
9. Fu J., Chen Z., Han L., et al. Review of Grain Threshing Theory and Technology. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018; 11(3):12-20. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181103.3432>
10. Ozherelev V.N., Popov V.B. Innovations in the Process of Grain Separation from the Spike. *Vestnik GGTU imeni P.O. Sukhogo* = Sukhoi Gomel State Technical University Bulletin. 2017; (4):26-35. Available at: <https://elib.gstu.by/handle/220612/18219> (accessed 14.02.2020). (In Russ.)
11. Bakhterev A.A., Iovlev G.A., Nesgovorov A.G. Improvement of Grain Crop Threshing Process. *Teoriya i praktika mirovoy nauki* = World Science Theory and Practice. 2017; (10):51-60. (In Russ.)
12. Sotnar M., Pospisil J., Marecek J., et al. Influence of the Combine Harvester Parameter Settings on Harvest Losses. *Acta Technologica Agriculturae*. 2018; 21(3):105-108. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2478/ata-2018-0019>
13. Semenov V.A., Semenova E.I. The Method of Thrashing of Ears and Grain Separation in a Threshing and Separating Drum. *Vestnik Rossiyskogo gosudarstvennogo agrarnogo zaochnogo universiteta* = Russian State Agrarian Correspondence University Bulletin. 2013; (14):123-129. Available at: http://www.rgazu.ru/upload/iblock/b65/vestnik_14.pdf (accessed 14.02.2020). (In Russ.)
14. Burianov M.A., Buryanov A.I., Chervyakov I.V., et al. Design and Improvement of Methods for Substantiating the Technology of Combine Harvesting of Grain Crops by Tow. *Vestnik agrarnoy nauki Dona* = Don Agrarian Science Bulletin. 2017; 2(38):59-72. Available at: http://a4raa.pf/files/vestnik/VD2_2017.pdf (accessed 14.02.2020). (In Russ.)
15. Buryanov A.I., Buryanov M.A. Cereal Harvesting Technology: Advantages and Disadvantages. *Aktualnye agrosistemy* = Actual Agricultural Systems. 2017; (5):22-25. (In Russ.)
16. Ozherelev V.N., Nikitin V.V. Prospective Directions for Reducing the Energy Intensity of Grain Separation From the Ears. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2012; (8):30-31. Available at: http://www.cnsb.ru/jour/j_as.asp?id=113070 (accessed 14.02.2020). (In Russ.)
17. Buriyanov A.I., Chervyakov I.V., Kolinko A.A., et al. Methods and Results of Identification of Natural Interconnection of Grain and an Ear during Ripening and Complete Ripeness. *Zernovoe khozyaystvo Rossii* = Grain Economy of Russia. 2018; (6):21-25. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2018-60-6-21-25>
18. Shahbazi F., Dolatshah A., Valizadeh S. Simulation and Modeling the Mechanical Damage to Cowpea Seeds under Impact. In: Post Harvest, Food and Process Engineering. International Conference of Agricultural Engineering-CIGR-AgEng 2012: Agriculture and Engineering for a Healthier Life. Valencia: CIGR-EurAgEng; 2012. Available at: https://www.researchgate.net/publication/266167974_Simulation_and_Modeling_the_Mechanical_Damage_to_Cowpea_Seeds_Under_Impact (accessed 14.02.2020). (In Eng.)

19. Khazaei J., Shahbazi F., Massah J., et al. Evaluation and Modeling of Physical and Physiological Damage to Wheat Seeds under Successive Impact Loadings: Mathematical and Neural Networks Modeling. *Crop Science*. 2008; 48(4):1532-1544. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.04.0187>
20. Lashgari M., Hossein M., Omid M., et al. Qualitative Analysis of Wheat Grain Damage during Harvesting with John Deere Combine Harvester. *International Journal of Agriculture and Biology*. 2008; 10(2):201-204. Available at: https://www.researchgate.net/publication/236484261_Qualitative_Analysis_of_Wheat_Grain_Damage_during_Harvesting_with_John_Deere_Combine_Harvester (accessed 14.02.2020). (In Eng.)
21. Shahbazi F., Dowlatshah A., Valizadeh S. Breakage Susceptibility of Wheat and Triticale Seeds Related to Moisture Content and Impact Energy. *Cercetari Agronomice in Moldova*. 2012; 45(3):5-13. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2478/v10298-012-0051-4>
22. Yu Y., Fu H., Yu J. DEM-Based Simulation of the Corn Threshing Process. *Advanced Powder Technology*. 2015; 26(5):1400-1409. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2015.07.015>
23. Maertens K., De Baerdemaeker J. Flow Rate Based Prediction of Threshing Process in Combine Harvesters. *Applied Engineering in Agriculture*. 2003; 19(4):383-388. Available at: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=14915> (accessed 14.02.2020). (In Eng.)
24. Ma J. An Innovative Vertical Axial-Flow Threshing Machine Developed in China. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2007; 38(2):18-22. (In Eng.)
25. Radwan G.G., Salim R.G., Al-Ashry A.S. Development and Test Attachments to the Tangential Flow Thresher to Suit Caraway Crop Threshing. *Misr Journal of Agricultural Engineering*. 2009; 26(3):1068-1080. Available at: <http://www.mjae.eg.net/pdf/2009/july/2.pdf> (accessed 14.02.2020). (In Eng.)
26. Semenova E.I., Bogoviz A.V., Semenov V.A. Technical Modernization of Harvesting Machinery. In: Perspectives on the Use of New Information and Communication Technology (ICT) in the Modern Economy. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017; 726:189-196. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-90835-9_22
27. Osueke C.O. Frictional Impact Modeling of a Cereal Thresher. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2011; 4(3):405-412. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/15dc/d92e-b32a41f4a16715630e212b1e6410973f.pdf> (accessed 14.02.2020). (In Eng.)
28. Miu P.I., Kutzbach H.-D. Mathematical Model of Material Kinematics in an Axial Threshing Unit. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2007; 58(2):93-99. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.04.002>
29. Lizhang X., Yaoming L. Modeling and Experiment to Threshing Unit of Stripper Combine. *African Journal of Biotechnology*. 2011; 10(20):4106-4113. Available at: <https://academicjournals.org/journal/AJB/article-abstract/6163E2B29675> (accessed 14.02.2020). (In Eng.)
30. Tang Z., Li Y., Xu L., et al. Modeling and Design of a Combined Transverse and Axial Flow Threshing Unit for Rice Harvesters. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 2014; 12(4):973-983. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5424/sjar/2014124-6077>
31. Chuan-Udom S., Chinsuwan W. Effects of Operating Factors of an Axial Flow Rice Combine Harvester on Grain Breakage. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 2011; 33(2):221-225. Available at: <http://rdo.psu.ac.th/sjstweb/journal/33-2/0125-3395-33-2-221-225.pdf> (accessed 14.02.2020). (In Eng.)
32. Dorokhov A.S., Moskovskiy M.N., Khamuyev V.G. Theoretical Justification of the Process of Producing Seed Material at Its Reproduction in Farms. *Vestnik VIESKh* = Bulletin of VIESKh; 2018; (3):127-132. Available at: http://vestnik.viesh.ru/wp-content/uploads/2018/11/ВНЭСХ_3_2018_БЛОК_1-156.pdf (accessed 14.02.2020). (In Russ.)
33. Kumar A., Kumar A., Khan K., et al. Performance Evaluation of Harvesting and Threshing Methods for Wheat Crop. *International Journal of Pure & Applied Bioscience*. 2017; 5(2):604-611. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.18782/2320-7051.2497>
34. Dhananchezhian P., Parveen S., Pandian N.K.S., et al. Development and Comparative Study of Cast Iron Rasp Bar and Nylon Rasp Bar Threshing Cylinders for Paddy Threshing. *Agricultural Engineering*. 2013; (4):45-54. Available at: http://jageng.agrif.bg.ac.rs/files/casopis/PT_04-2013.pdf (accessed 14.02.2020). (In Eng.)
35. Puzauskas E., Steponavicius D., Jotautiene E., et al. Substantiation of Concave Crossbar Shape for Corn Ear Threshing. *Mechanics*. 2016; 22(6):553-561. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5755/jol.mech.22.6.16370>

36. Zhao Z., Li Y., Chen J., et al. Grain Separation Loss Monitoring System in Combine Harvester. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2011; 76(2):183-188. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.016>
37. Threshing Device for Breeding Work: Patent 195355 Russian Federation. No. 2019125549; appl.12.08.2019; publ. 23.01.2020. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU195355U1_20200123.pdf (accessed 14.02.2020). (In Russ.)
38. Soft Winter Wheat Luchesar: Patent 9602 Russian Federation. No. 66568; appl. 24.12.2014; publ. 08.07.2018. (In Russ.)
39. Ionova E.V., Kravchenko N.S., Ignatieva N.G., et al. Technological Assessment of Varieties and Lines of Winter Soft Wheat Developed by the FSBSI ARC "Donskoy". *Zernovoe khozyaystvo Rossii* = Grain Farming of Russia. 2017; (6):16-21. Available at: <https://www.zhros.ru/jour/article/view/111> (accessed 14.02.2020). (In Russ.)
40. Pekhalskiy I.A., Artushin A.A., Elizarov V.P., et al. Methods of Definition of Complex Machine Grains' and Seeds' Traumatizing. *Nauchnyy zhurnal KubGAU* = Scientific Journal of KubSAU. 2016; 120:399-411. Available at: <http://www.ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/26.pdf> (accessed 14.02.2020). (In Russ.)
41. Pekhalskiy I.A. Universal Classification of Traumatic Damages of Internal Structures of Crops Seeds. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tehnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2015; (6):9-13. Available at: <https://www.vimsmit.com/jour/article/download/102/58> (accessed 14.02.2020). (In Russ.)
42. Pekhalskiy I.A., Kryazhkov V.M., Artushin A.A., et al. Quantitative and Qualitive Assessment of Seeds Traumatizing While Using Machines. *Nauchnyy zhurnal KubGAU* = Scientific Journal of KubSAU. 2016; 119:503-512. Available at: <http://ej.kubagro.ru/2016/05/pdf/36.pdf> (accessed 14.02.2020). (In Russ.)

Received 06.09.2019; revised 11.11.2019; published online 31.03.2020

About the authors:

Viktor I. Pakhomov, Vice Director for Science for Mechanization and Electrification, Agricultural Research Center "Donskoy" (3 Nauchnyy Gorodok St., Zernograd 347740, Russia), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: Y-7085-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>, vnptim@gmail.com

Sergey V. Braginets, Leading Researcher of Plant Production Processing Department, Agricultural Research Center "Donskoy" (3 Nauchnyy Gorodok St., Zernograd 347740, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: Y-6307-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>, sbraginets@mail.ru

Oleg N. Bakhchevnikov, Researcher of Plant Production Processing Department, Agricultural Research Center "Donskoy" (3 Nauchnyy Gorodok St., Zernograd 347740, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: S-3312-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>, Scopus ID: 57202648620, oleg-b@list.ru

Elena V. Benova, Senior Researcher of Plant Production Processing Department, Agricultural Research Center "Donskoy" (3 Nauchnyy Gorodok St., Zernograd 347740, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: Y-6314-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7456-3514>, benova@km.ru

Artem I. Rukhlyada, Junior Researcher of Plant Production Processing Department, Agricultural Research Center "Donskoy" (3 Nauchnyy Gorodok St., Zernograd 347740, Russia), Researcher ID: Y-6315-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2597-0818>, ruhlada1990@yandex.ru

Contribution of the authors:

V. I. Pakhomov – scientific leadership, formulation of the study basic concept; S. V. Braginets – general management of the experimental studies, critical analysis of results and formulation of conclusions; O. N. Bakhchevnikov – analysis of literary data, writing the draft and finishing the article; E. V. Benova – writing introduction, experimental research and processing their results; A. I. Rukhlyada – experimental research.

All authors have read and approved the final manuscript.



Результаты полевых исследований машины для уборки лука-севка, оснащенной прутковым элеватором с асимметричным расположением встряхивателей

А. С. Дорохов, А. В. Сибирёв*, А. Г. Аксенов

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

*sibirev2011@yandex.ru

Введение. Существующие машины для уборки корнеплодов и лука не обеспечивают качественных показателей сепарации вороха корнеплодов, что и приводит к нарушению агротехнических требований при их уборке. Необходим поиск новых решений по увеличению качественных показателей сепарации корнеплодов, повышению полноты сепарации и снижению повреждений.

Материалы и методы. В статье представлена конструкция машины для уборки лука-севка, оснащенная прутковым элеватором с асимметричным расположением встряхивателей. Описана методика проведения и результаты полевых исследований по определению качественных показателей сепарации вороха лука-севка на экспериментальном прутковом элеваторе.

Результаты исследования. Результаты производственных исследований машины для уборки лука-севка, оснащенной прутковым элеватором с асимметрично установленными эллиптическим встряхивателем и поддерживающим роликом, показали качественное выполнение технологического процесса сепарации вороха лука-севка при оптимальных значениях параметров: межсоевое расстояние между эллиптическим встряхивателем и поддерживающим роликом 0,36–0,4 м при полноте сепарации 97,0–97,2 % и повреждениями луковиц лука-севка 1,65–1,68 %; поступательная скорость $v_{эл}$ движения пруткового элеватора с асимметричным расположением эллиптического встряхивателя и поддерживающего ролика 1,6 м/с при полноте сепарации 98,5 % и повреждениях продукции 1,3 %.

Обсуждение и заключение. Применение пруткового элеватора с асимметричным расположением эллиптического встряхивателя и поддерживающего ролика позволяет, в сравнении с симметричным расположением встряхивателей, повысить полноту сепарации луковиц лука-севка на 2,0 %, а повреждения луковиц снизить на 1,1 %.

Ключевые слова: прутковый элеватор, встряхиватели, поступательная скорость движения, качество сепарации, полнота сепарации, повреждения луковиц, лук-севок

Для цитирования: Дорохов, А. С. Результаты полевых исследований машины для уборки лука-севка, оснащенной прутковым элеватором с асимметричным расположением встряхивателей / А. С. Дорохов, А. В. Сибирёв, А. Г. Аксенов. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202001.133-148 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 133–148.



The Results of Field Tests of an Onion Set Harvesting Machine Equipped with a Shaker Arrangement Asymmetrical Bar Elevator

A. S. Dorokhov, A. V. Sibirev*, A. G. Aksenov

Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russia)

*sibirev2011@yandex.ru

Introduction. Machines for harvesting roots and onions do not provide qualitative indices of root heap separation that leads to violation of technical requirements during harvesting. New solutions are needed to increase the quality of root separation, increase the quality of separation and reduce damage.

Materials and Methods. The article presents the design of the onion set harvesting machine. The machine is equipped with a bar elevator with asymmetrical arrangement of shakers. The technique and results of field research to determine the quality of set onion separation at the experimental rod elevator are described.

Results. The results of production research of the onion set harvesting machine showed qualitative performance of the technological process of separating onion heap at optimal values of parameters: center distance between elliptical shaker and supporting roller 0.36-0.4 m at full separation of 97.0-97.2% and onion damage 1.65-1.68%; forward speed of rod elevator with asymmetrical arrangement of elliptical shaker and supporting roller 1.6 m/s at full separation of 98.5% and bulb damage 1.3%.

Discussion and Conclusion. The use of a bar elevator with an asymmetrical arrangement of the elliptical shaker and support roller allows, in comparison with the symmetrical arrangement of shakers, an increase in bulb separation by 2.0% and a decrease in onion damage by 1.1%.

Keywords: bar elevator, shakers, progressive speed, separation quality, full separation, bulb damage, set onion

For citation: Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Aksenov A.G. The Results of Field Tests of an Onion Set Harvesting Machine Equipped with a Shaker Arrangement Asymmetrical Bar Elevator. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(1):133-148. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.133-148>

Введение

В машинной технологии возделывания и уборки корнеплодов и лука одним из важнейших показателей качества, определяющих длительность хранения корнеплодов, является наличие в закладываемом на хранение ворохе почвенных и растительных примесей [1; 2].

Достижение заданных агротехнических требований обеспечивается при предельно допустимых жестких режимах работы комкоразрушающих и просеивающих сепарирующих устройств машин для уборки корнеплодов и лука с целью разрушения непроходowych почвенных комков и приводит к повышенным повреждениям и потерям сепарируемой продукции.

Невозможность отделения почвенных комков из вороха корнеплодов и лука обусловлена тем, что на большинстве уборочных машин применяют щелевые сепарирующие рабочие органы, при этом межпрутковое расстояние сепарирующего транспортера с целью исключения потерь корнеплодов выполнено меньше минимального размера сепарируемого корнеплода, что приводит к невозможности их очистки на сепарирующих рабочих органах уборочных машин, а следовательно, к травмированию значительной части товарной продукции и потерям при хранении значительной части выращенного урожая.

Отсутствие и недостаточная эффективность способов решения проблемы

отделения почвенных комков от товарной продукции корнеплодов и лука на сепарирующих рабочих органах уборочных машин как в первой, так и во второй фазе уборки приводит к широкому применению ручного труда на операции послеуборочной доработки, что увеличивает себестоимость производства продукции.

В результате проведенного анализа технологий и технических средств машинной уборки корнеплодов и лука выявлены основные способы и средства, способствующие снижению количества почвенных комков в товарной продукции корнеплодов и лука при их машинной уборке и имеющие свои положительные стороны и недостатки.

Качественные показатели уборки определяются тем, насколько качественно выполнены предыдущие технологические операции.

При уборке лука очень важно поддерживать почву во взрыхленном состоянии в связи с тем, что применяемые на сепарации щелевые рабочие органы не способны отделить почвенные примеси от лукович, так как он имеет небольшие размеры, что затрудняет сепарацию почвенных примесей [3–5].

Выявленные недостатки известных способов и технических средств снижения содержания почвенных примесей в товарной продукции корнеплодов и лука не дают оснований исключать их из практики исследовательской работы и считать пройденным этапом.

Однако следует сделать вывод о том, что современные технологии и технические средства уборки корнеплодов и лука не способны обеспечить получение качественной товарной продукции при минимальных трудозатратах, что обусловлено отставанием или отсутствием в разработке технологических основ, технологий и рабочих органов уборки корнеплодов и лука, а также метода контроля режимно-технологических показателей работы как в целом уборочной машины, так и ее

рабочих органов, оказывающих определяющее влияние на качественные свойства корнеплодов и лука.

Следовательно, разработка и исследование технологий и технических средств уборки корнеплодов и лука, обеспечивающих получение качественной товарной продукции при минимальных трудозатратах (отделение корнеплодов от соизмеримых почвенных комков), представляет научную проблему, решение которой будет способствовать инновационному развитию внутреннего рынка сельскохозяйственной продукции, устойчивому положению России на внешнем рынке и обеспечит переход к высокопродуктивному производству сельскохозяйственной продукции в результате:

- повышения производительности труда;
- повышения качества продукции;
- снижения себестоимости производства и обеспечения населения России ценной продовольственной продукцией.

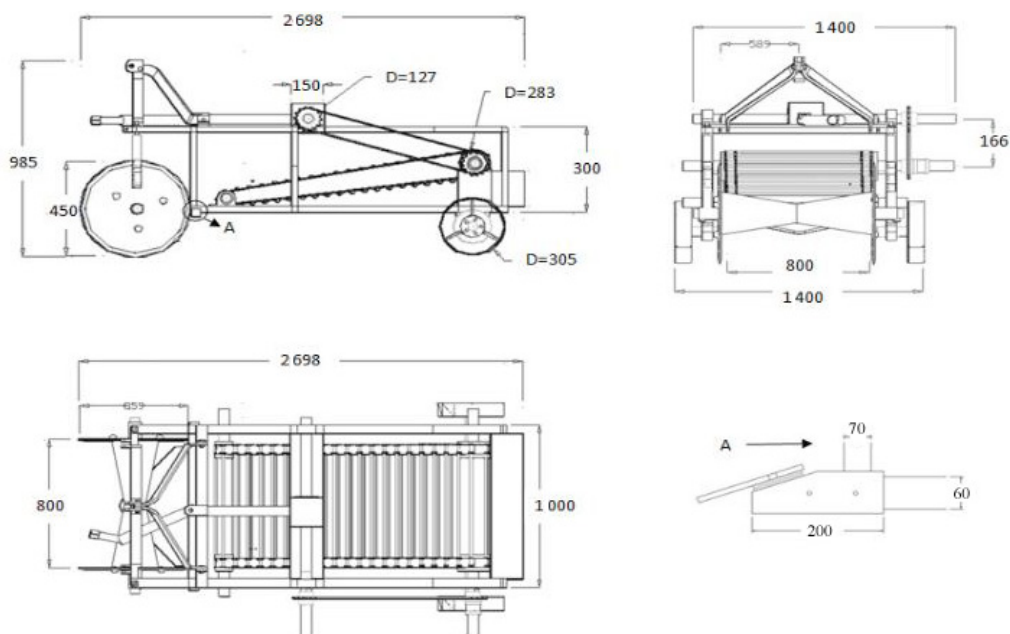
Обзор литературы

Известна машина для уборки корнеплодов с устройством сепарации от почвенно-растительных примесей, выполненным в виде пруткового элеватора (рис. 1), который установлен под углом 10 градусов к горизонту для достижения вертикального подъема сепарируемой продукции на высоту 0,26 м для улучшения очистки [6].

Рабочая скорость полотна пруткового элеватора составляет 2,5 м/с, что приводит при взаимодействии с различными видами встряхивателей к силовому воздействию на обрабатываемый ворох корнеплодов и, следовательно, к повреждению продукции.

Известна конструкция роторного сепарирующего устройства отделения корнеплодов, клубней и лукович от почвенных примесей [7].

Рабочая поверхность данного сепарирующего устройства выполнена по спирали, образованной стальными



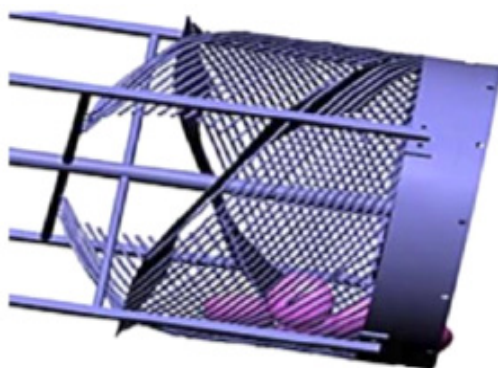
Р и с. 1. Общий вид машины для уборки корнеплодов
F i g. 1. General view of a machine for harvesting root crops

ми прутками диаметром 9 мм с целью исключения потерь через щелевые отверстия между смежными прутками с расстоянием меньше минимального размера убираемого корнеплода (рис. 2).

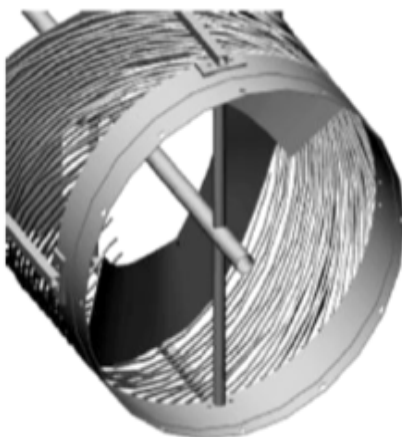
Крепление прутков на сепарируемом роторе осуществляется установкой

последних на обечайке ротора, общий вид которой представлен на рисунке 3.

Результаты исследований разработанного сепарирующего устройства при значении установленных технологических параметров свидетельствуют о том, что процент механических по-



Р и с. 2. Общий вид роторного сепарирующего устройства
F i g. 2. General view of the rotary separating device



Р и с. 3. Общий вид обечайки роторного сепарирующего устройства

F i g. 3. General view of the shell rotor separating device

вреждений клубней картофеля составляет около 4 %, что не соответствует современным требованиям качественных показателей уборки по повреждениям (не более 2 %).

Наличие данных повреждений обусловлено воздействием на клубни картофеля вертикальной составляющей силы тяжести и силы трения клубней о поверхность стальных прутков [8].

Известна комбинированная система очистки корнеплодов от механических примесей уборочной машины (рис. 4), состоящая из сочетания подающего конвейера 1, фрикционной горки 2, эллиптической щелевой поверхности, образуемой батареей эллиптических роликов 3 с нанесенным резиновым покрытием 4, закрепленных на приводном валу 5 и расположенных по образующим 6 и 7 винтовой поверхности [9; 10].

Для интенсификации очистки корнеплодов на эллиптической щелевой поверхности в конструкции сепарирующей системы на приводном валу 8 размещен барабан 9 с упругими элементами 10.

Материалы и методы

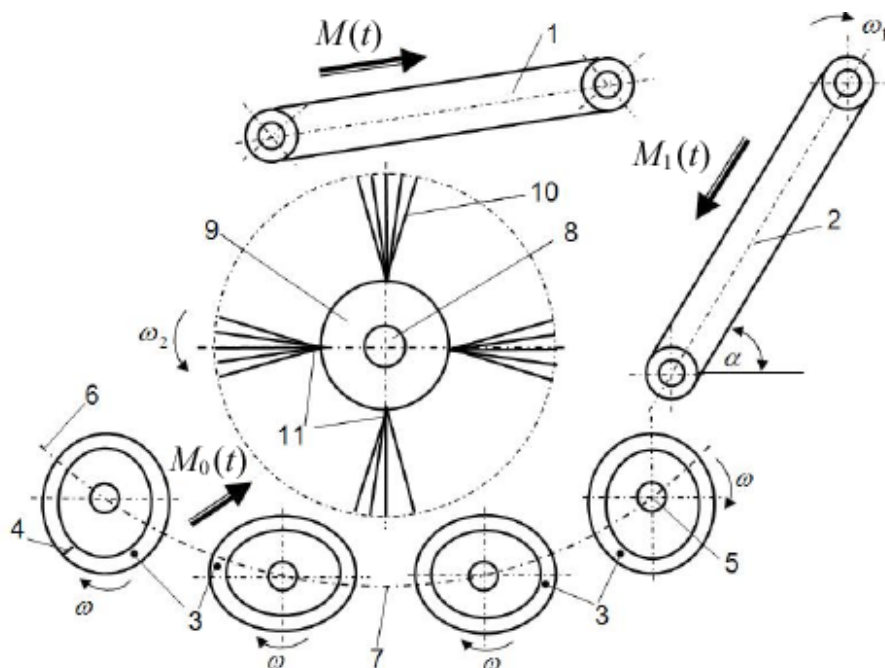
Результаты исследований в области механизации технологических процессов уборки различных видов

корнеклубнеплодов и лука позволили разработать сепарирующий прутковый элеватор с асимметричным расположением встряхивателей, изображенный на рисунке 5 [11].

Результаты проведенных исследований пруткового элеватора с асимметричным расположением встряхивателей в лабораторных условиях позволили определить факторы и интервалы их варьирования, оказывающие определяющее влияние на качественные показатели работы исследуемого устройства для очистки корнеклубнеплодов и луковиц от почвенно-растительных примесей.

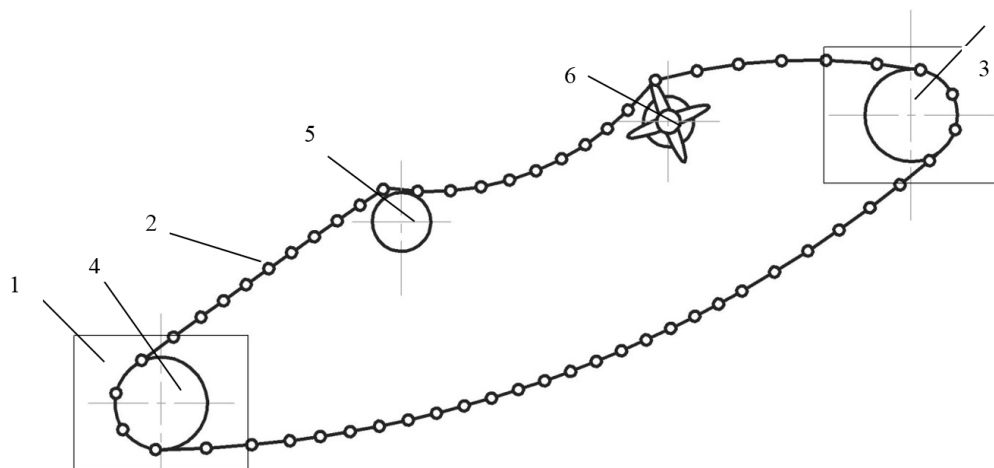
Согласно лабораторным исследованиям известно, что максимальная полнота сепарации вороха лука-севка составляет 98 % при поступательной скорости движения полотна пруткового элеватора $v_{эл} = 1,55 \dots 1,68$ м/с, подаче вороха лука-севка $Q_{вп} = 19,7 \dots 27,1$ кг/с и межосевого расстояния между пассивным эллиптическим встряхивателем и поддерживающим роликом находится в пределах $S = 0,29 \dots 0,42$ м [12].

С целью подтверждения влияния исследуемых факторов и определенных уровней их варьирования на качественные показатели уборки лука-севка в полевых условиях были проведены



Р и с. 4. Схема комбинированной системы очистки корнеплодов: 1 – конвейер подающий; 2 – горка фрикционная; 3 – батарея эллиптических роликов; 4 – покрытие роликов; 5, 8 – валы приводные; 6, 7 – образующая винтовой поверхности; 9 – барабан; 10 – упругие элементы

F i g. 4. Scheme of the combined root cleaning system: 1 – feeding conveyor; 2 – friction slide; 3 – battery of elliptical rollers; 4 – roller cover; 5, 8 – drive shafts; 6, 7 – screw surface; 9 – drum; 10 – elastic elements



Р и с. 5. Схема сепарирующего пруткового элеватора с асимметричным расположением встряхивателей: 1 – рама; 2 – прутковый элеватор; 3 – ведущий ролик; 4 – ведомый ролик; 5 – поддерживающий ролик; 6 – встряхиватель

F i g. 5. Scheme of separating rod elevator with asymmetrical arrangement of shakers: 1 – frame; 2 – bar elevator; 3 – driving roller; 4 – driven roller; 5 – support roller; 6 – shaker

исследования машины для его уборки, оснащенной прутковым элеватором с асимметричным расположением встряхивателей. Исследования проводились в соответствии с методикой СТО АИСТ 8.7-2013¹.

При определении качественных показателей сепарации определялись следующие показатели:

- повреждения луковиц лука-севка (1);
- полнота сепарации вороха лука-севка (2).

Повреждения луковиц определяли по формуле:

$$П = \frac{G_{пов}}{G_{ст} - G_{пов}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $G_{пов}$ – масса поврежденных стандартных луковиц в ворохе, кг; $G_{ст}$ – масса сепарируемых луковиц в ворохе, кг.

Полноту сепарации вороха лука-севка определяли по формуле:

$$v = \frac{v_{п}^И - v_{п}^К}{v_{п}^И} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $v_{п}^И$ – масса почвенных примесей в исходном ворохе, кг; $v_{п}^К$ – масса почвенных примесей в контейнере (невыделенные примеси), кг.

Для оценки качества выполнения технологического процесса уборки лука были проведены исследования качественных показателей работы машины для уборки лука-севка на полях ЗАО «Озёры» (Московская обл.).

Из проведенного анализа и оценки качества работы машин для уборки луковиц следует, что обеспечить требуемую чистоту сходового вороха для закладки на хранение при возделывании лука-севка в условиях по прямоточной технологии невозможно.

Процент поврежденных луковиц, потерь и наличия почвенных примесей, даже при установке рекомендуемых режимов, значительно превышает агротехнические требования, что подтверждает общий вид вороха лука-севка, поступающий на послеуборочную обработку.

Определение фракционного состава вороха лука-севка, поступающего на послеуборочную обработку, позволило выявить повышенное содержание почвенных примесей в ворохе до 75 %, что



Р и с. 6. Общий вид вороха лука-севка, поступающего на послеуборочную обработку

F i g. 6. General view of a heap of onion sets delivered to post-harvest processing

¹ СТО АИСТ 8.7-2013. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины для уборки овощных и бахчевых культур. Методы оценки функциональных показателей. URL: <http://docs.cntd.ru/document/555625983> (дата обращения: 27.02.2020).

затрудняет функционирование сепарирующих органов при последующих операциях послеуборочной обработки и при взаимодействии луковиц с твердыми почвенными комками приводит к увеличению повреждений луковиц и к значительным потерям товарной продукции при хранении.

Результаты определения фракционного состава комков почвы в ворохе лука-севка обрабатывались на электронно-вычислительной машине (ЭВМ) и представлены в виде гистограммы, изображенной на рисунке 7. Они подтверждают невозможность отделения почвенных комков от луковиц лука-севка на сепарирующих рабочих органах уборочных машин в связи с тем, что щелевое расстояние между прутками выполнено меньше минимального размера корнеплода, выделение соизмеримых почвенных комков на щелевых рабочих органах (прутковые транспортеры и грохоты) невозможно.

Полевые исследования сепарирующего пруткового элеватора с асимметричным расположением встряхивателей машины для уборки лука проводились на

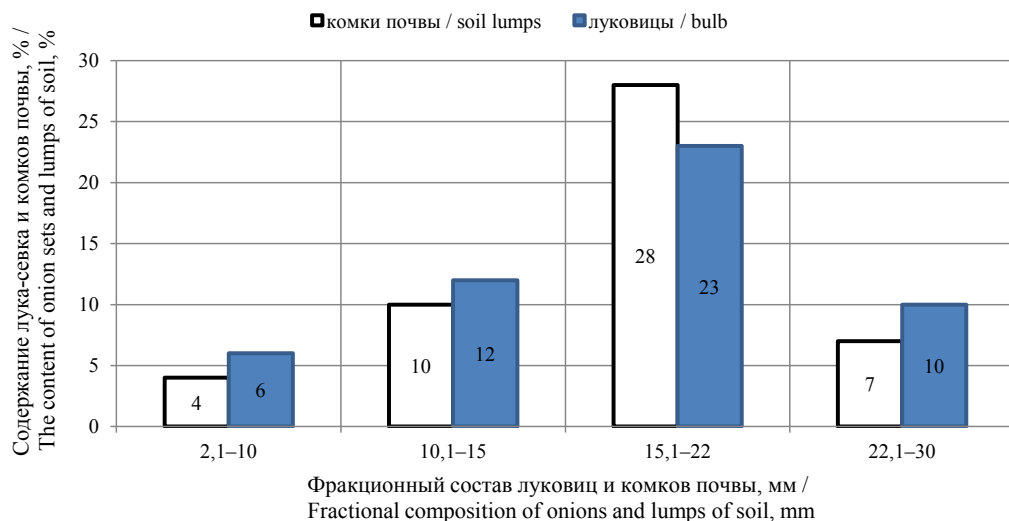
полях ЗАО «Озёры» (Московская обл.) в 2017 г. на уборке лука сорта «Штутгартен Ризен».

Результаты исследования

Методика проведения лабораторно-полевых исследований машины для уборки лука-севка, оснащенной прутковым элеватором с асимметричным расположением встряхивателей, заключается в следующем.

При проведении исследований сепарирующего пруткового элеватора с асимметрично установленными эллиптическим встряхивателем и поддерживающим роликом, установленного на самоходном комбайне «Амас-ZM2», определялись физико-механические свойства почвы, а также определялись показатели качества сепарации вороха лука-севка. Почва на выбранном для проведения исследований участке – среднесуглинистый чернозем, рельеф поля ровный, контур поля близкий к прямоугольной форме, длина гона 350 м.

При определении оптимального значения исследуемого фактора при производственных исследованиях остальные факторы оставались неизменными: рав-



Р и с. 7. Размерно-массовая характеристика комков почвы в ворохе лука-севка

Fig. 7. Dimensional mass characteristic of soil lumps in a heap onion sets

ными оптимальным значениям, определенным при лабораторно-полевых исследованиях.

В процессе производственных исследований пруткового элеватора с асимметрично установленными эллиптическим встряхивателем и поддерживающим роликом технологические параметры устанавливались в интервале значений, полученных при лабораторных исследованиях, а именно: межосевое расстояние S_5 в пределах 0,34...0,42 м с интервалом варьирования 0,02 м. Поступательная скорость движения полотна пруткового элеватора $v_{эл}$ изменялась в пределах от 1,0 м до 1,8 м/с с интервалом варьирования 0,2 м/с.

Исключение составляют лишь те факторы, оптимальные значения которых в лабораторно-полевых условиях исследовать не удалось, к числу данных факторов принадлежат глубина погружения в почву подкапывающего лемеха $h_{л}$ и поступательная скорость движения машины для подбора лука-севка из валков $v_{к}$.

Кроме того, с целью исследования влияния величины подачи $Q_{Вэл}$ вороха лука-севка на качество сепарации пруткового элеватора с асимметрично установленными эллиптическим встряхивателем и поддерживающим роликом изменялись поступательная скорость движения машины для уборки лука-севка $v_{п}$, а также глубина погружения подкапывающего лемеха в почву $h_{л}$.

Поступательная скорость движения машины для подбора лука-севка $v_{к}$ изменялась в пределах от 1,0 до 1,8 м/с с интервалом варьирования в 0,2 м/с; глубина погружения подкапывающего лемеха в почву $h_{л}$ изменялась в интервале 0,02...0,06 м с шагом варьирования 0,01 м.

При определении оптимальной скорости движения машины для подбора лука-севка $v_{к}$ глубина погружения подкапывающего лемеха в почву $h_{л}$ устанавливалась в пределах 0,02 м, согласно исследованиям К. З. Кухмазова², Н. П. Ларюшина³, А. М. Ларюшина [13], А. А. Протасова [4], Э. С. Рейнгарта [14; 15], В. А. Хвостова⁴ [16].

Качество работы пруткового элеватора с асимметрично установленными эллиптическим встряхивателем и поддерживающим роликом определялось следующим образом.

В начале учетной делянки при безостановочном движении самоходного комбайна I (рис. 8) по сигналу под сепарирующий прутковый элеватор подставляли брезент, в который собиралась вся убранная масса.

В процессе прохождения делянки за комбайном разматывался брезент, на который попадал ворох после сепарации. Далее производился отбор проб с поверхности брезента со всей территории учетной делянки. При этом определялся фракционный состав вороха, в котором учитывались: луковичи, свободная почва и почва, связанная с луковичами.

Исследование технологического процесса работы пруткового элеватора с асимметрично установленными эллиптическим встряхивателем и поддерживающим роликом в лабораторно-полевых условиях проводилось при варьировании факторов в следующих пределах:

- поступательная скорость движения полотна пруткового элеватора $v_{эл} = 1,55...1,67$ м/с;

- межосевое расстояние между эллиптическим встряхивателем и поддерживающим роликом $S_5 = 0,23...0,42$ м.

² Ларюшин Н. П., Кухмазов К. З. Теоретические и экспериментальные исследования битерного теребильного аппарата на выкопке лука: монография. Пенза: Полиграфист, 1996. 320 с.

³ Там же.

⁴ Хвостов В. А., Рейнгарт Э. С. Машины для уборки корнеплодов и лука (теория, конструкция, расчет). М., 1996. 350 с.

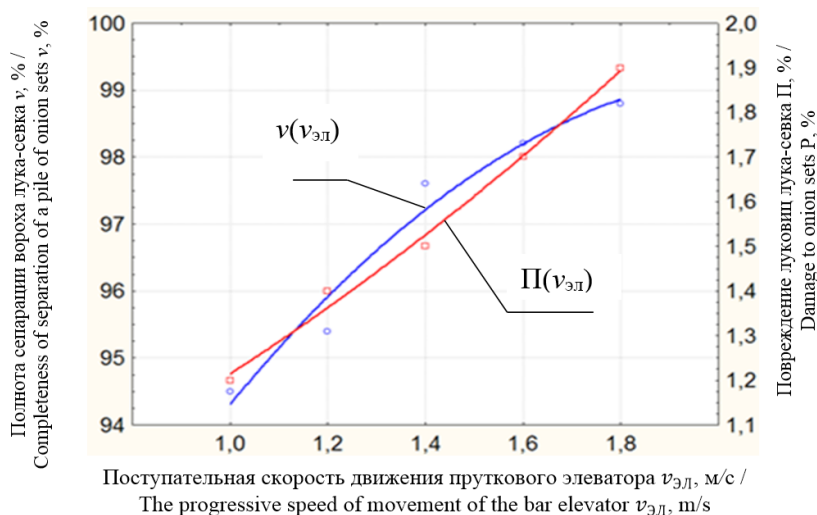


Р и с. 8. Общий вид уборочного агрегата для подбора лука-севка из валков в работе, оснащенного прутковым элеватором с асимметричным расположением встряхивателей:
1 – комбайн самоходный «Амас-ЗМ2»; 2 – автомобиль «КамАЗ 4539»

F i g. 8. General view of the harvesting unit for the selection of onion sets from rolls in operation, equipped with a rod-type elevator with an asymmetric arrangement of shakers:
1 – Amac-ZM2 combine; 2 – KamAZ 4539 truck

Результаты исследований поступательной скорости движения пруткового элеватора $v_{эл}$ с асимметричным расположением эллиптического встряхивате-

ля и поддерживающего ролика (рис. 9) на качественные показатели уборки в производственных условиях свидетельствуют о том, что оптимальное



Р и с. 9. Зависимость полноты сепарации v , %, и повреждений луковиц лука-севка P , %, сепарирующего пруткового элеватора с асимметрично установленными эллиптическим встряхивателем и поддерживающим роликом от поступательной скорости движения полотна пруткового элеватора $v_{эл}$

F i g. 9. The dependence of the completeness of separation v , %, and damage to onions sets P , %, of separating bar elevator with asymmetrically mounted elliptical shaker and support roller on the translational speed of the movement of the bar of the elevator $v_{эл}$

значение исследуемого фактора соответствует значению 1,6 м/с при полноте сепарации 98,5 % и повреждении продукции 2,3 %.

Соотношение качественных показателей (v и Π) уборки лука-севка и поступательной скоростью $v_{\text{эл}}$ определяется корреляционной зависимостью, которая выражается уравнением параболических функций:

$$\begin{cases} v = 92,38 + 2,08 \cdot v_{\text{эл}} + 0,15 \cdot v_{\text{эл}}^2, \\ \Pi = 1,04 + 0,12 \cdot v_{\text{эл}} + 0,04 \cdot v_{\text{эл}}^2. \end{cases} \quad (3)$$

Корреляционная связь между качественными показателями уборки лука-севка (полнотой сепарации v , %, и повреждениями луковиц лука-севка Π , %) и межосевого расстояния S_5 между эллиптическим встряхивателем и поддер-

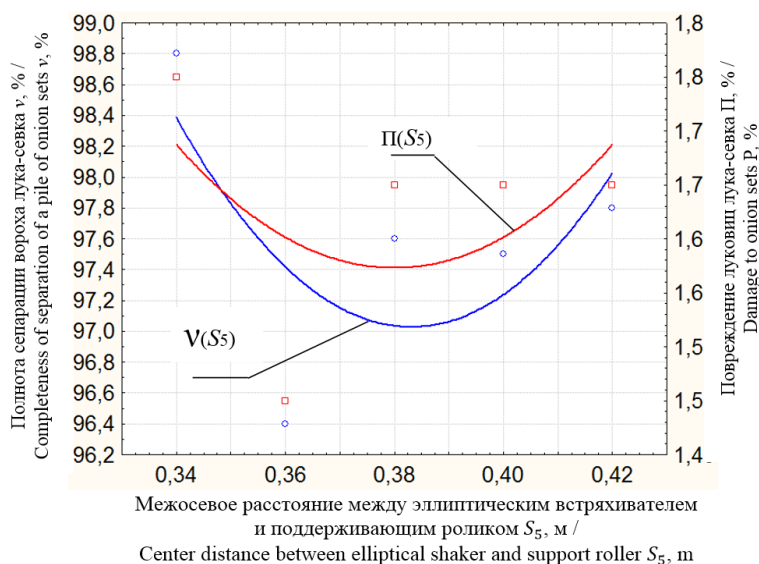
живающим роликом выражается уравнением:

$$\begin{cases} v = 99,94 - 1,84 \cdot S_5 + 0,15 \cdot S_5^2, \\ \Pi = 1,04 + 0,12 \cdot S_5 + 0,04 \cdot S_5^2. \end{cases} \quad (4)$$

Оптимальное значение межосевого расстояния S_5 между эллиптическим встряхивателем и поддерживающим роликом согласно графику, представленному на рисунке 8, находится в интервале значений 0,36–0,4 м при полноте сепарации 97,0–97,2 % и повреждениями луковиц лука-севка 1,65–1,68 %.

Увеличение данного параметра пруткового элеватора приводит к ухудшению качественных показателей работы.

Корреляционная связь между качественными показателями технологического процесса работы машины



Р и с. 10. Зависимость полноты сепарации v , %, и повреждений луковиц лука-севка Π , %, пруткового элеватора с асимметрично установленными эллиптическим встряхивателем и поддерживающим роликом от межосевого расстояния между эллиптическим встряхивателем и поддерживающим роликом S_5

Fig. 10. The dependence of the quality of separation v , %, and damage to onion sets P , %, bar elevator with an asymmetrically mounted elliptical shaker and support roller on the center distance between the elliptical shaker and support roller S_5

для уборки лука-севка, оснащенной прутковым элеватором с асимметрично установленными эллиптическим встряхивателем и поддерживающим роликом, от глубины h_L погружения подкапывающего лемеха в почву выражается уравнением параболических функций:

$$\begin{cases} v = 100,76 - 2,74 \cdot h_L + 0,31 \cdot h_L^2, \\ \Pi = 2,88 - 0,04 \cdot h_L + 0,04 \cdot h_L^2. \end{cases} \quad (5)$$

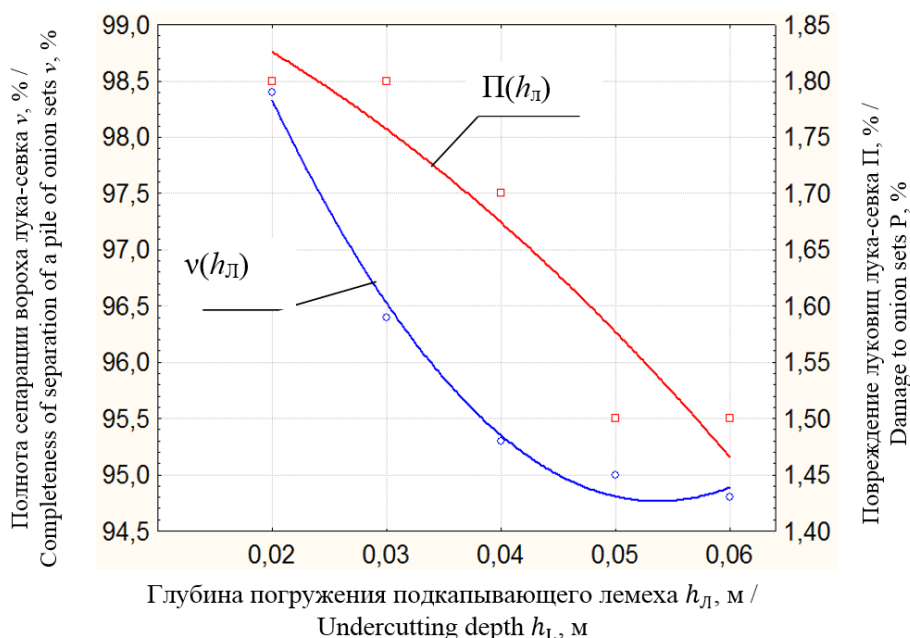
Анализируя график (рис. 11), можно сказать, что высокое качество сепарации вороха лука-севка более 98 % обеспечивается при глубине подкапывания лемеха 0,02 м, при увеличении глубины подкапывания полнота сепарации вороха лука-севка значительно снижается.

Данное обстоятельство объясняется повышением относительно оптимальной подачи вороха лука-севка, определенной в лабораторных условиях для исследуемого пруткового элеватора.

Наименьшие показатели повреждения лукович лука-севка (менее 2,5 %) достигаются при наибольшей глубине подкапывания подкапывающего лемеха в почву 0,06 м/с, что объясняется наличием почвенной прослойки между прутками элеватора и сепарируемой продукцией лука.

Обсуждение и заключение

Результаты проведенных производственных исследований машины для подбора лука-севка, оснащенной прутковым элеватором с асимметрично установленными эллиптическим



Р и с. 11. Зависимость полноты сепарации v , %, и повреждений лукович лука-севка Π , %, сепарирующего пруткового элеватора с асимметрично установленными эллиптическим встряхивателем и поддерживающим роликом от глубины погружения подкапывающего лемеха в почву h_L

F i g. 11. The dependence of the quality of separation v , %, and damage to onions Π , %, of the separating bar elevator with asymmetrically mounted elliptical shaker and support roller on the depth of the immersing plowshare immersed in the soil h_L

встряхивателем и поддерживающим роликом, показали качественное выполнение технологического процесса сепарации вороха лука-севка при оптимальных значениях параметров:

– межжосевое расстояние S_5 между эллиптическим встряхивателем и поддерживающим роликом 0,36–0,4 м при полноте сепарации 97,0–97,2 % и повреждениями луковичек лука-севка 1,65–1,68 %;

– поступательная скорость $v_{эл}$ движения пруткового элеватора с асимметричным расположением эллиптического встряхивателя и поддерживающего ролика 1,6 м/с при полноте сепарации 98,5 % и повреждениях продукции 1,3 %;

– глубина подкапывания $h_{л}$ подкапывающего лемеха равна 0,02 м при полноте сепарации вороха лука-севка более 98 % и повреждении продукции менее 1,5 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сибирёв, А. В. Полевые исследования катка-ложеобразователя машины для уборки лука / А. В. Сибирёв, А. Г. Аксенов, П. А. Емельянов [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2017. – № 8. – С. 15–21. URL: https://mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory_i_selhozmashiny_No8_2017_dlya_sajta.pdf (дата обращения: 27.02.2020). – Рез. англ.
2. Сибирёв, А. В. Повышение эффективности уборки лука качественной заделкой посадочного материала при посадке в борозде / А. В. Сибирёв, А. Г. Аксенов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2018. – № 3 (24). – С. 31–36. URL: [http://vestnik.ulsau.ru/upload/iblock/892/vestnik-2018-3\(43\).pdf](http://vestnik.ulsau.ru/upload/iblock/892/vestnik-2018-3(43).pdf) (дата обращения: 27.02.2020). – Рез. англ.
3. Лобачевский, Я. П. Устойчивость системы управления процессом сепарации клубненосной массы картофелеуборочного комбайна / Я. П. Лобачевский, В. И. Славкин, С. В. Белов [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2012. – № 3. – С. 12–14.
4. Протасов, А. А. Особенности однофазной уборки лука-репки / А. А. Протасов // Научное обозрение. – 2017. – Т. 13, № 19. – С. 79–84. URL: http://www.sced.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=625:nauchnoe-obozenie-19-2017&catid=39&Itemid=156 (дата обращения: 27.02.2020). – Рез. англ.
5. Измайлов, А. Ю. Средства автоматизации для управления сельскохозяйственной техникой / А. Ю. Измайлов, В. К. Хорошенков, В. А. Колесникова [и др.]. – DOI 10.22314/2073-7599-2017-3-3-9 // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2017. – № 3. – С. 3–9. URL: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/188> (дата обращения: 27.02.2020). – Рез. англ.
6. Younus, A. Performance Evaluation of Root Crop Harvesters / A. Younus, P. R. Jayan // International Journal of Engineering Research and Development. – 2015. – Vol. 6. – Pp. 38–52. URL: http://www.ijerd.com/paper/vol11-issue6/Version_1/F1163852.pdf (дата обращения: 27.02.2020).
7. Farhadi, R. Design and Construction of Rotary Potato Grader. (Part I) / R. Farhadi, N. Sakenian, P. Azizi // Bulgarian Journal of Agricultural Science. – 2012. – Vol. 18, issue 2. – Pp. 304–314. URL: <http://www.agrojournal.org/18/02-21-12.pdf> (дата обращения: 27.02.2020).
8. Storozhuk, I. M. Research Results of Harvesting Haulm Remnants of Root Crops / I. M. Storozhuk, V. R. Pankiv // INMATEH – Agricultural Engineering. – 2015. – Vol. 46, issue 2. – Pp. 101–108. URL: https://www.researchgate.net/publication/286121902_Research_results_of_harvesting_haulm_remnants_of_root_crops (дата обращения: 27.02.2020).
9. Baranovsky, V. M. Investigation of the Structural Model of Adapted Machine for Harvesting Root Crop / V. M. Baranovsky, M. R. Pankiv, V. V. Teslyuk // Innovative Solutions in Modern Science. – 2016. – Vol. 8, issue 8. – Pp. 1–10. URL: <https://naukajournal.org/index.php/ISMSD/article/view/991> (дата обращения: 27.02.2020).
10. Dubrovin, V. G. Identification of the Development Process Adapted Machines for Harvesting Root Crops / V. G. Dubrovin, G. Golub, V. M. Baranovskiy [et al.] // MOTROL – Engineering Sciences. – 2013. – Vol. 15. – Pp. 243–255.

11. Патент № 2638190 Российская Федерация, МПК A01D 17/10 (2006.01), A01D 33/08 (2006.01). Сепарирующий транспортер корнеклубнеуборочной машины : № 2017107814 : заявл. 10.03.2017 : опубл. 12.12.2017 / Сибирёв А. В., Аксенов А. Г., Колчин Н. Н. [и др.] ; Патентообладатель ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ». – 4 с. : ил. URL: http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2638190&TypeFile=html (дата обращения: 27.02.2020). – Рез. англ.
12. Сибирёв, А. В. Результаты экспериментальных исследований сепарации вороха лука-севка на прутковом элеваторе с асимметрично установленными встряхивателями / А. В. Сибирёв, А. Г. Аксенов, М. А. Мосяков. – DOI 10.15507/2658-4123.029.201901.091-107 // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 1. – С. 91–107. URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/ru/article/es2/81-19-1/682-10-15507-0236-2910-029-201901-7> (дата обращения: 27.02.2020). – Рез. англ.
13. Ларюшин, Н. П. Теоретическое обоснование конструктивных и режимных параметров вальцово-битерного подбирающего устройства / Н. П. Ларюшин, А. М. Ларюшин // Нива Поволжья. – 2009. – № 1 (10). – С. 82–87. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/teoreticheskoe-obosnovanie-konstruktivnyh-i-rezhimnyh-parametrov-valtsovo-biternogo-podbirayuschego-ustroystva> (дата обращения: 27.02.2020).
14. Рейнгарт, Э. С. Машина ЛКГ-1,8 повышенной производительности для уборки лука / Э. С. Рейнгарт, И. И. Мейлахс, В. Г. Раскатов [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 1986. – № 8. – С. 44–45.
15. Рейнгарт, Э. С. Машины для уборки и послеуборочной обработки лука в Японии / Э. С. Рейнгарт, И. М. Мейлахс // Тракторы и сельхозмашины. – 1981. – № 6. – С. 38–40.
16. Хвостов, В. А. Тенденция развития машин для уборки столовых корнеплодов за рубежом / В. А. Хвостов, А. А. Ключко // Тракторы и сельхозмашины. – 1983. – № 6. – С. 35–37.

Поступила 15.04.2019; принята к публикации 12.06.2019; опубликована онлайн 31.03.2020

Об авторах:

Дорохов Алексей Семёнович, заместитель директора по научно-организационной работе ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), доктор технических наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН, Researcher ID: H-4089-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>, dorokhov@rgau-msha.ru

Сибирёв Алексей Викторович, старший научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат технических наук, Researcher ID: M-6230-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>, sibirev2011@yandex.ru

Аксенов Александр Геннадьевич, заведующий отделом технологий и машин в овощеводстве ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат технических наук, Researcher ID: V-5572-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9546-7695>, 1053vim@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. С. Дорохов – научное руководство, формулирование основной концепции исследования; А. В. Сибирёв – литературный и патентный анализ, подготовка начального варианта текста и формирование выводов, редактирование текста; А. Г. Аксенов – проведение критического анализа экспериментальных и теоретических исследований.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Sibirev A.V., Aksenov A.G., Emelyanov P.A., et al. Field Research of a Roller-Scraper Bar Machine for Harvesting Onions. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2017; (8):15-21. Available at: https://mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory_i_selkhoz mashiny_No8_2017_dlya_sajta.pdf (accessed 27.02.2020). (In Russ.)
2. Sibirev A.V., Aksenov A.G. Efficiency Increase of Onion Harvesting by Proper Embedding of Seeding Material in the Seed Furrow. *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* = Ulyanovsk State Agricultural Academy Bulletin. 2018; (3):31-36. Available at: [http://vestnik.ulsau.ru/upload/iblock/892/vestnik-2018-3\(43\).pdf](http://vestnik.ulsau.ru/upload/iblock/892/vestnik-2018-3(43).pdf) (accessed 27.02.2020). (In Russ.)
3. Lobachevskiy Ya.P., Slavkin V.I., Belov S.V., et al. Sustainability of the Potato Harvester's Tuber Mass Separation Control System. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2012; (3):12-14. (In Russ.)
4. Protasov A.A. Features of One-Phase Harvesting of Bulb Onion. *Nauchnoye obozreniye* = Scientific Review. 2017; 13(19):79-84. Available at: http://www.sced.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=625:nauchnoe-obozrenie-19-2017&catid=39&Itemid=156 (accessed 27.02.2020). (In Russ.)
5. Izmaylov A.Yu., Khoroshenkov V.K., Kolesnikova V.A., et al. Automation Facilities for Agricultural Machinery Control. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2017; (3):3-9. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-3-3-9>
6. Younus A., Jayan P.R. Performance Evaluation of Root Crop Harvesters. *International Journal of Engineering Research and Development*. 2015; 6:38-52. Available at: http://www.ijerd.com/paper/vol11-issue6/Version_1/F1163852.pdf (accessed 27.02.2020). (In Eng.)
7. Farhadi R., Sakenian N., Azizi P. Design and Construction of Rotary Potato Grader. (Part I). *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2012; 18(2):304-314. Available at: <http://www.agrojournal.org/18/02-21-12.pdf> (accessed 27.02.2020). (In Eng.)
8. Storozhuk I.M., Pankiv V.R. Research Results of Harvesting Haulm Remnants of Root Crops. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2015; 46(2):101-108. Available at: https://www.researchgate.net/publication/286121902_Research_results_of_harvesting_haulm_remnants_of_root_crops (accessed 27.02.2020). (In Eng.)
9. Baranovsky V.M., Pankiv M.R., Teslyuk V.V. Investigation of the Structural Model of Adapted Machine for Harvesting Root Crop. *Innovative Solutions in Modern Science*. 2016; 8(8):1-10. Available at: <https://naukajournal.org/index.php/ISMSD/article/view/991> (accessed 27.02.2020). (In Eng.)
10. Dubrovin V.G., Golub G., Baranovskiy V.M., et al. Identification of the Development Process Adapted Machines for Harvesting Root Crops. *MOTROL – Engineering Sciences*. 2013; 15:243-255. (In Eng.)
11. Separating Conveyors for Root and Tuber Harvesters: Patent 2638190 Russian Federation. No. 2017107814; appl. 10.03.2017; publ. 12.12.2017. Bulletin No. 35. Available at: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2638190&TypeFile=html (дата обращения: 27.02.2020). – Рез. англ.
12. Sibirev A.V., Aksenov A.G., Mosyakov M.A. The Results of the Experimental Study of Onions Separation Using a Rod Elevator with Asymmetric Installed Burners. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(1):91-107. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.091-107>
13. Laryushin N.P., Laryushin A.M. Theoretical Justification of the Design and Operating Parameters of the Roller-Biter Harvesting Unit. *Niva Povolzhya* = Cornfield of Volga Region. 2009; (1):82-87. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/teoreticheskoe-obosnovanie-konstruktivnyh-i-rezhimnyh-parametrov-valtsovo-biternogo-podbirayushchego-ustroystva> (accessed 27.02.2020). (In Russ.)
14. Reyngart E.S., Meylakh I.I., Raskatov V.G., et al. LKG-1.8 Extra Productivity Onion Cleaning Machine. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 1986; (8):44-45. (In Russ.)
15. Reyngart E.S., Meylakh I.M. Onion Cleaning and Post-Harvest Machines in Japan. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 1981; (6):38-40. (In Russ.)

16. Khvostov V.A., Klochko A.A. Development Trend of Machines for Canteen Root Cleaning Abroad. *Traktory i selkhozmachiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 1983; (6):35-37. (In Russ.)

Received 15.04.2019; revised 12.06.2019; published online 31.03.2020

About the authors:

Aleksey S. Dorokhov, Deputy Director on Scientific and Organizational Work, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor of Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of RAS, Researcher ID: H-4089-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>, dorokhov@rgau-msha.ru

Alexey V. Sibirev, Senior Researcher of Department of Technology and Machines in Vegetable Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: M-6230-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>, sibirev2011@yandex.ru

Aleksandr G. Aksenov, Head of Department of Technology and Machines in Vegetable Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: V-5572-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9546-7695>, 1053vim@mail.ru

Contribution of the authors:

A. S. Dorokhov – scientific guidance, formulation of the basic research concept; A. V. Sibirev – literary and patent analysis, writing the draft, drawing conclusions, editing the final text; A. G. Aksenov – critical analysis, experimental and theoretical researches.

All authors have read and approved the final manuscript.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ / PHYSICS AND MATHEMATICS

УДК 553.8+550.42

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202001.149-161



Исследование физическими методами нефритов различной окраски

И. Ю. Шелехов*, Т. И. Шишелова, Е. И. Смирнов
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский
технический университет» (г. Иркутск, Россия)
*promteplo@yandex.ru

Введение. В статье представлен анализ различного применения кристаллов, описываются исторические и культурные основы использования минерального сырья для различных целей, в том числе медицинских. Показывается, что особое место в этом списке занимает нефрит, который является одним из самых распространенных минералов, применяемых в терапевтическом оборудовании. Причем стоимость этого оборудования определяется окраской применяемого материала, поэтому ставится задача провести исследования нефритов различной окраски физическими методами. **Материалы и методы.** Для исследования были выбраны образцы желтого, зеленого, черного и белого нефрита. Образцы различных цветов нефрита изготавливались по типу «шлиф» и имели плоскую поверхность. Фазовый анализ нефритов проводился на дифрактометре ДРОН-1. Регистрация дифракционной картины проводилась с помощью сцинтилляционного счетчика с амплитудной дискриминацией. Дифракционная картина регистрировалась последовательно по мере вращения образца и счетчика, которые расположены на гониометре ГУР-5. Отчет углов поворота производится с погрешностью до 0,005°.

Результаты исследования. В статье приводятся результаты исследования химического анализа нефритов различной окраски, представлена дифрактограмма нефритов желтого, зеленого, черного и белого цветов. Авторами также приводится таблица расшифровки межплоскостных расстояний и интенсивности главных линий исследуемых образцов нефрита.

Обсуждение и заключение. Исследования показали, что изучаемые образцы по химическому составу относятся к тремолитам. Химический анализ черного нефрита показал, что за счет возрастания закисного железа и снижения доли магния отмечается переход к актинолиту. В образце черного нефрита также наблюдается понижение на один порядок содержания фтора. Проведенные исследования открывают новые возможности по расширению общих понятий области создания здоровой среды, где все события связываются в единую логическую цепочку. Представленный материал дает возможность добавить в логическую цепочку исследования из области химии, биологии и медицины.

Ключевые слова: минералы, нефрит, физические методы исследования, оптическая абсорбционная спектроскопия, рентгеноструктурный анализ, здоровая среда, терапевтическое оборудование

Финансирование: Исследование проводилось при поддержке ФГБУ «Российский фонд фундаментальных исследований» (договор № 20-48-380002/20).

© Шелехов И. Ю., Шишелова Т. И., Смирнов Е. И., 2020



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

Для цитирования: Шелехов, И. Ю. Исследование физическими методами нефритов различной окраски / И. Ю. Шелехов, Т. И. Шишелова, Е. И. Смирнов. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202001.149-161 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 149–161.

Physical Methods for Studying Jades of Different Colors

I. Yu. Shelekhov*, T. I. Shishelova, E. I. Smirnov
National Research Irkutsk State Technical University
(Irkutsk, Russia)

*promteplo@yandex.ru

Introduction. The article presents an analysis of the various applications of crystals, describes the historical and cultural foundations of using mineral raw materials for various purposes, including medical ones. It is shown that a special place in this list is occupied by jade (nephrite), which is one of the most common minerals used in therapeutic equipment. Moreover, the cost of this equipment is determined by the color of the material used. Therefore, the task is to conduct a study of jade of different colors by physical methods.

Materials and Methods. For the study samples of yellow jade, green jade, black jade, and white jade were made; samples of different colors of jades were made according to the “thin section” type and had a flat surface. The phase analysis of jades was carried out on the DRON-1 diffractometer. The diffraction pattern was recorded using a scintillation counter with amplitude discrimination. The diffraction pattern was recorded sequentially as the sample and counter, which were located on the GUR-5 goniometer, rotated. The report of rotation angles was made with an error of up to 0.005°.

Results. The article presents the results of studying the chemical analysis of jades of different colors and a diffractogram of yellow, green, black and white jades. The authors also provide a table for deciphering the interplanar distances and the intensities of the main lines of the studied jade samples.

Discussion and Conclusion. The studies have shown that the studied samples are tremolites by chemical composition. The chemical analysis of black jade showed that because of an increase in ferrous iron and a decrease in the proportion of magnesium, a transition to actinolite is noted. A decrease in fluorine content by an order of magnitude is also observed in the black jade sample. The conducted studies offer new possibilities for expanding the general concepts of creating a healthy environment, where all events are connected in a single logical chain. The presented material gives the opportunity to add research from the fields of chemistry, biology, and medicine to the logical chain.

Keywords: minerals, jade, physical research methods, optical absorption spectroscopy, X-ray diffraction analysis, healthy environment, therapeutic equipment

Funding: The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Contract No. 20-48-380002/20).

For citation: Shelekhov I.Yu., Shishelova T.I., Smirnov E.I. Physical Methods for Studying Jades of Different Colors. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(1):149-161. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.149-161>

Введение

Использование различных минералов и камней не ограничивается их применением в качестве украшений и поделочного материала. В последнее время широкое применение они

нашли в виде терапевтического оборудования, которое используется по всему миру и имеет особое значение для азиатских народов. Актуальность работы в данном направлении признают многие научные школы, считая,

что знания, которые использовались в древности, имеют под собой научную основу¹, и, чтобы обосновать эти знания, необходимо проводить исследования физическими, химическими, биологическими и другими методами.

Обзор литературы

Результаты исследования физическими методами материалов и сопоставление их с результатами натурных исследований дают новые знания, что является особенно интересным для науки, если результаты имеют практическое применение. При участии ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (г. Иркутск) осуществляется внедрение в производство нагревательных приборов, теплопередающая поверхность которых изготавливается из нефрита, добытого в Восточных Саянах (бассейн рек Китой, Онон, Урик, Белая) [1]. Процесс работы нагревательных приборов описан в одной из наших статей «Комбинированная электрическая система отопления для карасных домов» [2].

Исследования в этой области ведутся, но их недостаточно, чтобы получить общую картину влияния минералов на окружающий мир. Например, методом оптической абсорбционной спектроскопии исследовался нефрит Баженовского месторождения [3], для объективного измерения и описания окраски нефрита использована методика расчета координат цветности по международной колориметрической системе XYZ [4]. Оптические спектры поглощения записывались на специализированном спектрофотометре SHIMADZU UV-3600 в диапазоне длин волн 185–3300 нм и на стандартизированном спектро-

фотометре МСФУ-К в интервале длин волн 400–800 нм с шагом 1 нм. По этой методике было определено, что коэффициент отношения интенсивности полос на длинах волн 3 646, 3 662 и 3 675 см⁻¹ ОН-колебаний около 1 свойственен белому нефриту, 0,98–1 – светло-зеленому, 0,90–0,98 – голубовато-зеленому и менее 0,91 – ярко-зеленому. Расчет данного коэффициента позволил стандартизировать определение цвета нефрита, выявить и дать оценку дополнительных оттенков, которые присутствуют в окраске нефрита. Авторами было определено, что коэффициент отношения интенсивности полос колебаний ОН-групп нефрита Баженовского месторождения составляет 0,94–0,95, а зеленая окраска нефрита связана исключительно с ионами Fe²⁺.

Действительно, основным хромофорным компонентом нефрита является железо (закисное и окисное), входящее как видообразующий элемент в составляющие нефрит амфиболы, и прежде всего актинолит. Окраска высоко железистых нефритов светло-зеленая. Основная роль в окраске нефритов отводится закисному железу. Предполагается также красящее действие хрома, который является характерной изоморфной примесью минералов² [5]. Все имеющиеся сведения о составе нефрита не позволяют с уверенностью судить об индивидуальной роли каждого из хромофорных элементов Fe²⁺, Fe³⁺, Cr²⁺ в окраске этого камня³ [6–8].

Имеется ряд натурных исследований, показывающих благоприятное воздействие на живой организм нефрита, особенно при контактом термическом воздействии, при этом цвет не всегда является определяющим фактором [9].

¹ Голубева Е. О., Швайко Е. С. Использование минералов в медицине древности // Фундаментальная наука в современной медицине 2016: материалы сателлитной дистанционной научно-практической конференции студентов и молодых ученых. М., 2016. С. 89–93.

² Болдырев А. И. Инфракрасные спектры минералов. М.: Недра, 1976. 199 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007736757> (дата обращения: 26.02.2020).

³ Балицкий В. С., Платонов А. Н., Таран М. Н. Природа окраски минералов. М.: Недра, 1984. 196 с. URL: <http://www.geokniga.org/books/7233> (дата обращения: 26.02.2020).

Доказательством благоприятного медицинского воздействия могут служить только длительные клинические исследования, но при изучении мы можем получить только фактический результат, а не объяснение определенных лечебных свойств. Для объяснения результатов исследований служат специальные физические методы, которые определяют структуру материала и могут охарактеризовать свойство материала. Целью нашей работы является исследование характеристик нефрита разной окраски физическими методами.

Известно множество трудов ученых древности, где они описывали полезные свойства препаратов минерального происхождения, например, в работе Педания Диоскорида «О лекарственных веществах» (*De Materia Medica*) представлено более ста таких медицинских препаратов. Целебную силу минералов изучали в своих работах такие известные врачи древности, как Гиппократ, Гален, Плиний Старший и Корнелий Цельс⁴ [10; 11].

В своей работе член-корреспондент РАН А. А. Сидоров отметил, что свойствами камней интересовались не только известные писатели (У. Коллинз, А. Куприн, А. К. Дойль, П. Бажов, И. В. Гете, О. Уайльд), но и ученые, которые внесли неоценимый вклад в современную науку (Н. Коперник, Р. Бойль, А. Я. Ферсман, И. Баумер) [12].

Исследования современных ученых показывают, что ИК-излучение от нагретых минералов стимулирует терморегуляционную реакцию поверхностной сосудистой сети, развивается временная гиперемия. Поглощенная тепловая энергия активизирует мигра-

цию лейкоцитов, пролиферацию и дифференцировку фибробластов. Имеет место активизация обменных процессов, ускоряются процессы заживления⁵. Имеются экспериментальные данные о продлении жизни у лабораторных животных на 25–30 % при регулярных термических воздействиях различными минералами. На текущий момент существует множество установок, предназначенных для лечения отдельных заболеваний через воздействие на определенные сегменты, участки тела⁶ [13].

Материалы и методы

Методы спа-терапии реализуются во многих лечебно-профилактических центрах, причем не только в виде терапевтических установок. В ряде гостиниц и отелей используется метод созерцания камней, которые оказывают биостимулирующее воздействие на организм, компенсируя такое явление, как «световой голод». Построенные архитектурные ансамбли из таких камней в парках, усадьбах и садах, безусловно, воздействуют на психологическое состояние людей, оказывая желаемое положительное влияние [14]. Ярким примером создания архитектурных лечебных ансамблей является клинический санаторий «Роша» (г. Харьков), где реализована на практике возможность такого лечения⁷.

Особое внимание среди минералов уделяется нефриту. Медики древности считали, что нефрит облегчает почечные колики, лечит боли в печени, также помогает при мигрени и при болезнях глаз. Считалось, что вода, в которой лежал нефрит, укрепляет мышцы, кости и очищает кровь. Из нефрита даже делали пломбы для зубов.

⁴ Jouanna J. Greek Medicine from Hippocrates to Galen. Leiden: Koninklijke Brill, 2012. URL: <https://www.jstor.org/stable/10.1163/j.ctt1w76vvr> (дата обращения: 26.02.2020).

⁵ Yang Hu., Liu G., Tang Ch. The Origin of Jade in East Asia. Jades of the Xinglongwa Culture. Hong Kong: The Chinese University of Hong Kong, 2007. 323 p.

⁶ Валеев Р. Г. Камни лечат! Новеллы о драгоценных камнях. Киев: Радянський письменник, 1971. 191 с.

⁷ Журавлев В. А., Тондий Л. Д. Книга о клиническом санатории «РОЩА». Харьков: Слово, 2014. 260 с.

Нефрит по праву занимает ведущее место среди замечательных самоцветов и поделочных камней, изделия из нефрита вызывают восхищение уже не одно тысячелетие. Одним из основных достоинств нефрита, привлекающих к нему внимание специалистов, является его замечательная окраска, которая включает в себя все оттенки листвы⁸. Нефрит является одним из самых распространенных минералов, который применяется в терапевтическом оборудовании. Ценность этого оборудования, зачастую определяется окраской применяемого минерала. Сложно перечислить всех ученых, которые утверждали, что одним из целебных факторов камней является их цвет: данный метод лечения носит название хромотерапия (колортерапия). По запасам нефрита Иркутская область занимает одно из лидирующих положений, добываемый нефрит имеет светло-зеленую окраску, бывает белым, темно-зеленым и черным, поэтому научные исследования в этой сфере будут полезны в различных отраслях народного хозяйства [15–17].

Для исследования были изготовлены образцы желтого, зеленого, черного и белого цветов типа «шлиф», имеющие плоскую поверхность.

Результаты исследования

Для определения химического состава нефрита в основном пользуются расчетом по А. А. Булаху. Используя данный метод, определялся химический состав исследуемых образцов⁹. Несмотря на имеющиеся работы, связанные с окраской нефрита, этот вопрос не решен полностью, поэтому исследования в этом направлении являются необходимыми и актуальными.

Развитие знаний в данной области во многом обязано применению физических методов анализа: изотопный, спектроскопический, рентгеновский и др.

Атомная структура кристаллических тел может быть изучена методом рентгеноструктурного анализа, в основе которого лежит взаимодействие рентгеновского излучения с электронами вещества, в результате возникает дифракция рентгеновских лучей. Дифракционная картина зависит от длины волны используемого рентгеновского излучения и строения объекта. Рентгеновский фазовый анализ является наиболее эффективным методом установления фазового состава вещества. Каждая кристаллическая фаза дает индивидуальную дифракционную картинку. Рентгенограмма смеси нескольких фаз может быть произведена путем сопоставления рентгенограммы исследуемого и известных веществ методом сравнения межплоскостных расстояний d и интенсивности отражения.

Каждая фаза имеет кристаллическую решетку. Семейства атомных плоскостей, образующих эту решетку, обладают характерным для данной решетки набором значений межплоскостных расстояний d_{hkl} . Межплоскостные расстояния определяются по формуле Вульфа – Брэггов:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

или

$$\frac{d}{n} = d_{hkl} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}, \quad (1)$$

где n – порядок отражения; λ – длина волны характеристического рентгеновского излучения; d – межплоскостное расстояние; θ – угол дифракции.

Знание межплоскостного расстояния исследуемого объекта позволяет охарактеризовать его кристаллическую решетку, так как значения $d_{hkl} =$

⁸ Смелый В. М. Нефрит. Обработка нефрита // Образование. Наука. Производство: сборник статей IX Международного молодежного форума. Белгород, 2017. С. 3423–3427.

⁹ Булах А. Г. Руководство и таблицы для расчета формул минералов. М.: Недра, 1967. 140 с.

$= d_{hkl}/n$ можно рассматривать как межплоскостные расстояния для фиктивных плоскостей с индексами HKL , где HKL – индексы интерференции, равные произведению соответствующих индексов плоскости hkl на порядок отражения, то есть $H = nh$; $K = nk$; $L = nl$.

Поскольку λ величина известная, то задача определения межплоскостных расстояний d/n сводится к нахождению углов θ для всех линий рентгенограммы.

Для идентификации фаз не требуется высокой точности измерений (достаточно сотых долей градуса $\Delta\theta$). При этом удастся оценивать межплоскостные расстояния с ошибкой 0,01–0,001 Å. По мере приближения угла θ к 90° небольшая ошибка дает исчезающе малую ошибку в d . Это видно, если продифференцировать уравнение Вульфа – Брэггов:

$$\left| \frac{\Delta d}{d} \right| = \text{ctg} \theta \Delta \theta. \quad (2)$$

Средняя чувствительность метода к содержанию фазы в образце составляет несколько процентов.

Фазовый анализ нефритов проводился в ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» на дифрактометре ДРОН-1. Регистрация дифракционной картины проводилась с помощью сцинтилляционного счетчика с амплитудной дискриминацией. Дифракционная картина регистрировалась последовательно по мере вращения образца и счетчика, которые расположены на гониометре ГУР-5. Отчет углов поворота производится с погрешностью до 0,005°.

В результате исследования был определен химический состав исследуемых образцов нефритов (1 – желтый нефрит, 2 – зеленый нефрит, 3 – черный

нефрит, 4 – белый нефрит), результаты представлены в таблице 1.

Характеристики нефритов различной окраски были исследованы рентгеновским методом, съемка проводилась на дифрактометре ДРОН-1 с использованием медного излучения $\text{Cu-K}\alpha$ с длиной волны $\lambda = 1,54 \text{ Å}$. Режим съемки: напряжение на аноде $U = 25 \text{ кВ}$ (3 ступень), анодный ток $I = 20 \text{ мА}$, скорость поворота счетчика 2 град/мин , скорость протяжки ленты на потенциометре 600 мм/ч , отчет поворота счетчика начинался с 2 градусов . Дифрактограмма нефритов различной окраски представлена на рисунке 1.

Расшифровка о межплоскостных расстояниях и интенсивности главных линий представлена в таблице 2.

Обсуждение и заключение

Исследования показали, что образцы по химическому составу относятся к тремолитам. Химический анализ черного нефрита показал, что за счет возрастания закисного железа и снижения доли магния отмечается переход к актинолиту. В пособии для высших учебных заведений предлагается относить к актинолитам только те амфиболы, в которых отношение $100 \text{ Mg} : (\text{Mg} + \text{Fe}^{+2} + \text{Fe}^{+3} + \text{Mn})$ колеблется от 80 до 20. Исследованные минералы попадают в интервал 100–80 и относятся к тремолитам¹⁰. В образце черного нефрита также наблюдается понижение на один порядок содержания фтора. В остальном существенных отклонений в составах исследуемых образцов не отмечается. Общей особенностью тремолитов является постоянное участие Al, состоящее в координации с Si. Незначительное снижение Al в исследуемой серии образцов имеет место и соответствует увеличению мольной доли актинолита, то есть не исключено, что Al, участвующий в качестве иона-компенсатора Si как главного компонента,

¹⁰ Краснощекова Л. А. Породообразующие минералы и структуры кристаллических пород: учебное пособие. Изд. 3-е. Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2011. 83 с.

Т а б л и ц а 1

Table 1

Химический состав нефритов разной окраски
The chemical composition of jades of different colors

Химический элемент / Chemical element	1	2	3	4
SiO ₂	56,9800	56,7300	56,310	56,9700
Al ₂ O ₃	1,2000	1,2000	0,600	1,1000
TiO ₂	0,0500	0,0500	0,050	0,1500
FeO	0,0800	0,1700	3,500	0,0800
Fe ₂ O ₃	0,6200	0,6200	0,320	0,3200
CaO	13,4900	13,2700	12,940	13,1600
MgO	25,2000	25,6000	23,600	25,4000
MnO	0,1000	0,1100	0,160	0,0900
P ₂ O ₅	н/о	0,0110	н/о	0,0500
K ₂ O	0,0600	0,1300	0,036	0,1500
Na ₂ O	0,1300	0,1700	0,046	0,1800
Li ₂ O	0,0024	0,0030	н/о	0,0008
Rb ₂ O	0,0030	0,0090	н/о	0,0010
Cs ₂ O	н/о	н/о	н/о	н/о
H ₂ O	1,2800	1,4800	2,390	2,2200
F	0,5000	0,6300	0,100	0,7100
S	0,0400	0,0500	0,030	0,0400

Т а б л и ц а 2

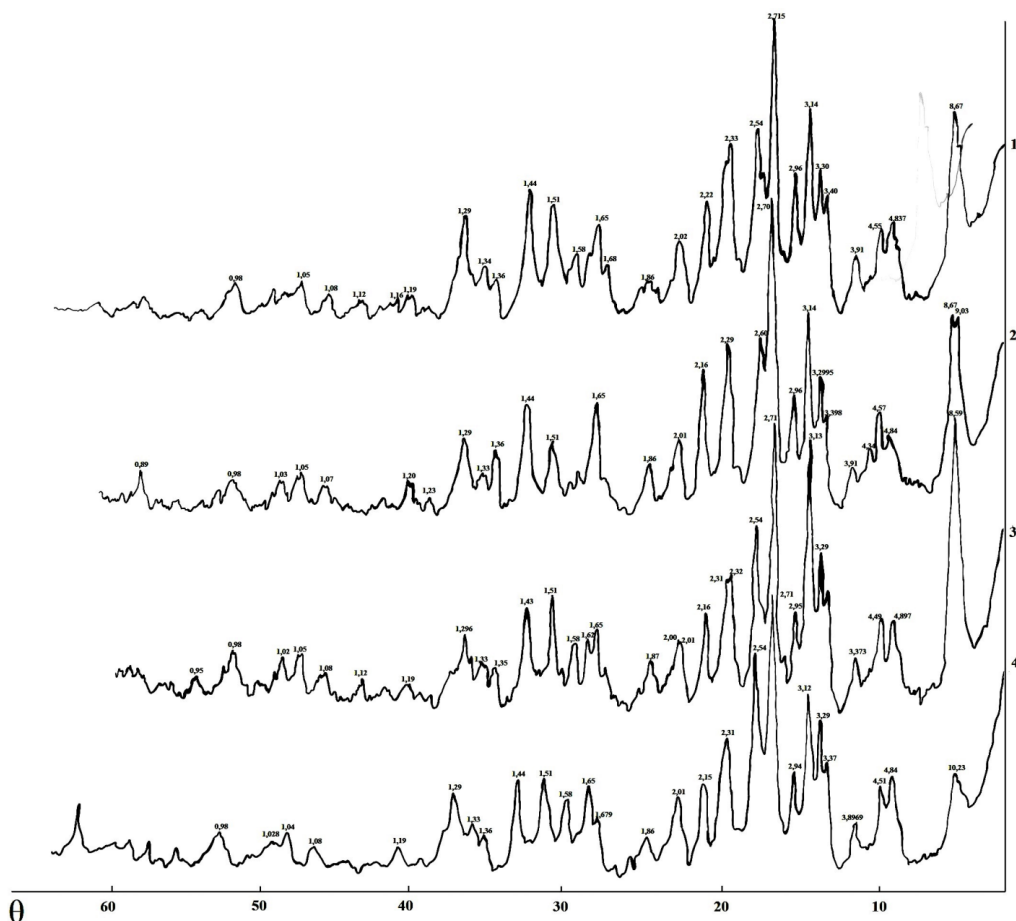
Table 2

Рентгенограммы образцов нефрита различной окраски
X-ray diffraction patterns of jade samples of different colors

ASTM тремолит / ASTM tremolite		Черный нефрит / Black jade		Белый нефрит / White jade		Зеленый нефрит / Green jade		Желтый нефрит / Yellow jade	
d/n	(I/I ₁)* 100%	d/n	(I/I ₁)* 100%	d/n	(I/I ₁)* 100%	d/n	(I/I ₁)* 100%	d/n	(I/I ₁)* 100%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8,9800	16	8,588	100,0	10,230	45,0	9,0300	68	8,6700	72
8,3800	100	4,897	42,0	4,840	44,0	8,6700	69	6,8100	20
5,0700	16	4,494	47,0	4,510	41,0	4,8400	40	4,8968	40
4,8700	10	3,373	54,0	3,896	30,0	4,5700	46	4,5483	39
4,7600	20	3,290	64,0	3,370	47,5	4,3500	34	3,9139	30
4,5100	20	3,130	94,0	3,290	60,0	3,9100	31	3,3984	49
4,2000	35	2,950	49,0	3,120	62,0	3,3980	44	3,2995	58
3,8700	16	2,710	99,0	2,940	45,0	3,2995	54	3,1400	73

Окончание табл. 2 / End of table 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3,3760	40	2,540	71,0	2,710	100	3,1400	70	2,9600	55
3,2680	75	2,320	58,0	2,540	80	2,9600	49	2,9000	32
3,1210	100	2,310	57,0	2,340	54	2,7000	100	2,7150	100
3,0280	10	2,160	48,0	2,150	40	2,6000	65	2,6100	55
2,9380	40	2,020	40,0	2,010	36	2,2900	64	2,5980	56
2,8050	45	2,000	40,0	1,860	24	2,1600	55	2,5400	68
2,7300	16	1,870	35,0	1,680	29	2,0100	32	2,3300	63
2,7050	90	1,820	28,0	1,640	39	1,8600	31	2,3100	59
2,5920	30	1,680	33,0	1,570	34	1,6500	46	2,2200	30
2,4070	40	1,650	43,0	1,510	40	1,5800	29	2,1700	48
2,3800	8	1,620	41,0	1,440	39	1,5600	26	2,0800	35
2,3350	30	1,580	9,0	1,350	24	1,5100	36	1,9000	22
2,3210	40	1,440	4,9	1,330	26	1,4400	46	1,8600	23
2,2980	12	1,350	33,0	1,290	35	1,3600	34	1,7500	15
2,2730	16	1,330	34,0	1,190	19	1,3300	28	1,6900	28
2,2060	6	1,310	35,0	1,080	17	1,2900	32	1,6500	40
2,1800	6	1,300	41,0	1,040	22	1,2300	21	1,6200	31
2,1630	35	1,190	27,0	1,030	19	1,19500	26	1,5800	31
2,0242	18	1,130	28,0	0,980	21	1,1800	21	1,5100	46
2,0150	45	1,080	30,0	0,920	20	1,1300	19	1,4400	50
2,0020	16	1,050	34,0	0,910	18	1,0890	20	1,3600	25
1,9630	6	1,030	34,0	0,890	18	1,0760	24	1,3400	28
1,9290	6	1,020	29,0	–	–	1,0590	20	1,2900	43
1,8920	50	–	–	–	–	1,0480	27	1,2300	15
–	–	–	–	–	–	1,0250	25	1,2000	18
–	–	–	–	–	–	1,0150	22	1,1900	18
–	–	–	–	–	–	1,0080	20	1,1600	17
–	–	–	–	–	–	0,9890	20	1,1200	18
–	–	–	–	–	–	0,9800	25	1,1200	18
–	–	–	–	–	–	0,9700	23	1,0800	19
–	–	–	–	–	–	0,9500	20	1,0500	22
–	–	–	–	–	–	0,9300	20	0,9800	16
–	–	–	–	–	–	0,9200	20	0,9500	22
–	–	–	–	–	–	0,9000	21	0,9300	14
–	–	–	–	–	–	0,8900	21	0,9100	18
–	–	–	–	–	–	–	–	0,9000	15
–	–	–	–	–	–	–	–	0,8800	15
–	–	–	–	–	–	–	–	0,8700	15



Р и с. 1. Дифрактограммы нефритов различной окраски: 1 – желтый нефрит; 2 – зеленый нефрит; 3 – черный нефрит; 4 – белый нефрит

Fig. 1. Diffraction patterns of jades of different colors: 1 – yellow jade; 2 – green jade; 3 – black jade; 4 – white jade

мог оказывать регулирующее влияние на состояние кристаллической решетки. Иначе говоря, перераспределение элементов в исследуемых образцах происходит таким образом, что повышение мольной доли актинолита соответственно сопровождается снижением мольной доли тремолита. Рентгеновский метод исследования показал, что существенной разницы в дифрактограммах нефритов различной окраски не обнаружено.

Проведенные нами исследования открывают новые возможности по расширению общих понятий области

Physics and mathematics

создания здоровой среды, где все события связываются в единую логическую цепочку. Наши исследования простирались от создания технологий по изготовлению нагревательных и термоэлектрических элементов [18], конструкций нагревательных и термоэлектрических элементов [19; 20] и до физико-математического модулирования конструкции нагревательного прибора [21; 22]. Используя представленный материал, можно в данную логическую цепочку добавить исследования из области химии, биологии и медицины.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Патент № 177507 Российская Федерация, МПК F24H 3/04(2006.01), H05B 3/20(2006.01). Нагревательный прибор для комбинированной системы обогрева помещений с низкой теплоизоляцией : № 2016149900 : заявл. 16.12.2016 : опубл. 28.02.2018 / Шелехов И. Ю., Шелехова И. В., Шелехов М. И. [и др.] ; патентообладатель ООО «Термостат+». – 8 с. : ил. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU177507U1_20180228.pdf (дата обращения: 26.02.2020).
2. Шелехов, И. Ю. Комбинированная электрическая система отопления для каркасных домов / И. Ю. Шелехов, Т. И. Шишелова, Е. И. Смирнов [и др.]. – DOI: 10.15507/0236-2910.027.201702.198-214 // Вестник Мордовского университета. – 2017. – Т. 27, № 2. – С. 198–214. URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/ru/articles2/51-17-2/316-10-15507-0236-2910-027-201702-05> (дата обращения: 26.02.2020). – Рез. англ.
3. Николаев, А. Г. Природа окраски и кристаллохимические особенности нефрита Баженовского месторождения хризотил-асбеста (Средний Урал) / А. Г. Николаев, М. П. Попов, А. В. Низамова // Металлогения древних и современных океанов. – 2019. – № 1. – С. 241–244. URL: https://krfu.ru/publication?p_id=203226&p_lang=2 (дата обращения: 26.02.2020). – Рез. англ.
4. Feng, X. Characterization of Mg and Fe Contents in Nephrite Using Raman Spectroscopy / X. Feng, Y. Zhang, T. Lu [и др.]. – DOI 10.5741/GEMS.53.2.204 // Gems and Gemology. – 2017. – Vol. 53, № 2. – Pp. 204–212. URL: <https://www.gia.edu/gems-gemology/summer-2017-mg-fe-nephrite> (дата обращения: 26.02.2020).
5. Попов, М. П. Новые данные о генетической связи хромофоров берилла и хризоберилла из умрудных копей Урала с хромшпинелидами Баженовского офиолитового комплекса / М. П. Попов, Е. С. Сорокина, Н. Н. Кононкова [и др.]. – DOI 10.31857/S0869-56524866699-703 // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 486, № 6. – С. 699–703. URL: <https://journals.eco-vector.com/0869-5652/article/view/14519> (дата обращения: 26.02.2020). – Рез. англ.
6. Emmett, J. L. The Role of Silicon in the Color of Gem Corundum / J. L. Emmett, J. Stone-Sundberg, Y. Guan [et al.] // Gems & Gemology. – 2017. – Vol. 53, № 1. – Pp. 42–47. URL: <https://www.gia.edu/gems-gemology/spring-2017-role-silicon-color-gem-corundum> (дата обращения: 26.02.2020).
7. Pham, V. L. Update on Gemstone Mining in Luc Yen / V. L. Pham, V. Pardieu, G. Giuliani // Gems & Gemology. – 2013. – Vol. 49, № 4. – Pp. 233–245. URL: <https://www.gia.edu/doc/WN13.pdf> (дата обращения: 26.02.2020).
8. Оранска, О. И. Рентгенодифракційне та термічне дослідження деяких харчових та косметичних бентонітових глин / О. И. Оранска, Ю. И. Горников. – DOI 10.15407/hftp10.01.013 // Хімія, фізика та технологія поверхні. – 2019. – Т. 10, № 1. – С. 13–21. URL: <http://www.cpts.com.ua/index.php/cpts/article/view/490> (дата обращения: 26.02.2020).
9. Стрельченко, О. В. Информатизация как важнейший фактор успешного развития учреждения здравоохранения / О. В. Стрельченко, М. И. Воевода, А. Л. Заиграев [и др.]. – DOI 10.15372/SSMJ20190216 // Сибирский научный медицинский журнал. – 2019. – Т. 39, № 2. – С. 110–115. URL: http://sibran.ru/journals/issue.php?ID=176369&ARTICLE_ID=176407 (дата обращения: 26.02.2020). – Рез. англ.
10. Risse, G. B. Ancient Egyptian Medicine / G. B. Risse. – DOI 10.1086/384532 // A Journal of the History of Science Society. – 1999. – Vol. 90, № 4. – Pp. 800. URL: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/pdfplus/10.1086/384532> (дата обращения: 26.02.2020).
11. Šedinova H. Stones in the Ancient and Early-medieval Medicine Scripts / H. Šedinova // Listy filologické. – 2000. – Vol. 123, № 1.
12. Сидоров, А. А. Об исцелении камнями / А. А. Сидоров // Вестник Российской академии наук. – 2012. – Т. 82, № 8. – С. 774–776. URL: http://www.ras.ru/publishing/rasherald/rasherald_article-info.aspx?articleid=4e61a196-fc90-4984-82b5-bb0f288e2f5e (дата обращения: 26.02.2020).
13. Тондий, Л. Д. Лечат ли камни? / Л. Д. Тондий, Е. Л. Закревская. – DOI 10.15407/internalmed2016.02.033 // Восточноевропейский журнал внутренней и семейной медицины. – 2016. – № 2 (5). – С. 34–36. URL: <http://www.internalmed-journal.in.ua/archives/932> (дата обращения: 26.02.2020).

14. **Wang, R.** Progress Review of the Scientific Study of Chinese Ancient Jade / R. Wang. – DOI: 10.1111/j.1475-4754.2010.00564.x // *Archaeometry*. – 2011. – Vol. 53, № 4. – Pp. 674–692. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1475-4754.2010.00564.x> (дата обращения: 26.02.2020).

15. **Бурцева, М. В.** Нефриты Восточной Сибири: геохимические особенности и проблемы генезиса / М. В. Бурцева, Г. С. Рипп, В. Ф. Посохов [и др.]. – DOI 10.15372/GiG20150303 // *Геология и геофизика*. – 2015. – Т. 56, № 3. – С. 516–527. URL: http://sibran.ru/journals/issue.php?ID=163519&ARTICLE_ID=163525 (дата обращения: 26.02.2020). – Рез. англ.

16. **Ван, Н.** Перспективы развития экономического сотрудничества провинции Хэнань и Иркутской области / Н. Ван // *Известия Иркутской государственной экономической академии*. – 2015. – Т. 25, № 3. – С. 512–518. URL: <http://izvestia.bgu.ru/reader/article.aspx?id=20190> (дата обращения: 26.02.2020). – Рез. англ.

17. **Татаринов, А. В.** Первая находка нефрита с аксессуарными минералами платиновой группы / А. В. Татаринов, Л. И. Ялович, С. В. Канакин [и др.]. – DOI 10.7868/S0869565217080217 // *Доклады Академии наук*. – 2017. – Т. 473, № 2. – С. 201–204. URL: <https://www.libnauka.ru/item.php?doi=10.7868/S0869565217080217> (дата обращения: 26.02.2020). – Рез. англ.

18. **Патент № 2463748 Российская Федерация, МПК H05B 3/00(2006.01).** Способ изготовления толсто пленочного резистивного нагревателя : № 2011103148/07 : заявл. 28.01.2011 : опубл. 10.08.2012 / Шелехов И. Ю., Шелехова И. В., Иванов Н. А. [и др.] ; заявитель ООО «Термостат». – 1 с. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2011103148A_20120810.pdf (дата обращения: 26.02.2020).

19. **Патент № 109628 Российская Федерация, МПК H05B 3/14 (2006.01).** Нагревательный элемент : № 2011110667/07 : заявл. 21.03.2011 : опубл. 20.10.2011 / Шелехов И. Ю., Шелехова И. В., Иванов Н. А. [и др.] ; патентообладатели ООО «Термостат», Институт кооперации науки и промышленности Пусанского национального университета. – 9 с. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU109628U1_20111020.pdf (дата обращения: 26.02.2020).

20. **Шелехов, И. Ю.** Применение новых технических решений в конструировании термо-электрических систем / И. Ю. Шелехов, Т. И. Шишелова, Е. И. Смирнов. – DOI 10.15507/0236-2910.028.201801.048-061 // *Вестник Мордовского университета*. – 2018. – Т. 28, № 1. – С. 48–61. URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles-2en/58-18-1/381-10-15507-0236-2910-028-201801-04> (дата обращения: 26.02.2020). – Рез. англ.

21. **Шелехов, И. Ю.** Конструкции отопительных приборов на основе физико-математического моделирования / И. Ю. Шелехов, Е. И. Смирнов, В. П. Иноземцев // *Научное обозрение*. – 2016. – № 1. – С. 42–48.

22. **Шишелова, Т. И.** Разработка отопительного оборудования и исследование его эффективности в системах жизнеобеспечения / Т. И. Шишелова, И. Ю. Шелехов // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2007. – Т. 1, №1 (29). – С. 104–109. URL: http://journals.istu.edu/vestnik_irgtu/journals/2007/01a (дата обращения: 26.02.2020). – Рез. англ.

Поступила 02.09.2019; принята к публикации 06.11.2019; опубликована онлайн 31.03.2020

Об авторах:

Шелехов Игорь Юрьевич, доцент кафедры городского строительства и хозяйства Института архитектуры, строительства и дизайна ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83), кандидат технических наук, Researcher ID: V-3045-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7677-3187>, promteplo@yandex.ru

Шишелова Тамара Ильинична, профессор кафедры физики ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83), доктор технических наук, Researcher ID: V-2981-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2372-8144>, tamara.shishelova@gmail.com

Смирнов Евгений Игоревич, аспирант кафедры инженерных коммуникаций и систем жизнеобеспечения Института архитектуры, строительства и дизайна ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83), Researcher ID: V-3117-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4999-7342>, jeka7.7.7@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

И. Ю. Шелехов – анализ литературных данных, научное руководство, постановка задачи исследования, обработка данных, написание текста статьи; Т. И. Шишелова – анализ литературных данных, редактирование текста; Е. И. Смирнов – анализ литературных данных, подготовка образов, сбор и анализ аналитических и практических материалов, разработка методики проведения эксперимента, компьютерная реализация решения задачи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Heater for Combined System for Heating Rooms with Low Thermal Insulation: Patent 177507 Russian Federation. No. 2016149900; appl. 16.12.2016; publ. 28.02.2018. Bulletin No. 7. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU177507U1_20180228.pdf (accessed 26.02.2020). (In Russ.)
2. Shelekhov I.Yu., Shishelova T.I., Smirnov Ye.I., et al. Combined Electric Heating System for Timber Frame Houses. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2017; 27(2):198-214. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.027.201702.198-214> (accessed 26.02.2020).
3. Nikolaev A.G., Popov M.P., Nizamova A.V. Color Nature and Crystallochemical Features of Nephrite at Bazhenovsky Chrysotile-Asbestos Deposit (Middle Urals). *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov* = Metallogeny of Ancient and Modern Oceans. 2019; (1):241-244. Available at: https://kpfu.ru/publication?p_id=203226&p_lang=2 (accessed 26.02.2020). (In Russ.)
4. Feng X., Zhang Y., Lu T., et al. Characterization of Mg and Fe Contents in Nephrite Using Raman Spectroscopy. *Gems and Gemology*. 2017; 53(2):204-212. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5741/GEMS.53.2.204>
5. Popov M.P., Sorokina E.S., Kononkova N.N., et al. New Data on the Genetic Linkage of Beryl and Chrysoberyl Chromophors of the Ural's Emerald Mines with Chromium-Bearing Spinels of the Bazhenov Ophiolite Complex. *Doklady Akademii nauk* = Reports of the Academy of Sciences. 2019; 486(6):699-703. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524866699-703>
6. Emmett J.L., Stone-Sundberg J., Guan Y., et al. The Role of Silicon in the Color of Gem Corundum. *Gems & Gemology*. 2017; 53(1):42-47. Available at: <https://www.gia.edu/gems-gemology/spring-2017-role-silicon-color-gem-corundum> (accessed 26.02.2020). (In Eng.)
7. Pham V.L., Pardieu V., Giuliani G. Update on Gemstone Mining in Luc Yen. *Gems & Gemology*. 2013; 49(4):233-245. Available at: <https://www.gia.edu/doc/WN13.pdf> (accessed 26.02.2020). (In Eng.)
8. Oranska O.I., Gornikov Yu.I. X-Ray Diffraction and Thermal Studies on Some Food and Cosmetic Bentonite Clays. *Khimiya, fizika ta tekhnologiya poverkhni* = Chemistry, Physics and Technology of Surface. 2019; 10(1):13-21. (In Ukr.) DOI: <https://doi.org/10.15407/hftp.10.01.013>
9. Strelchenko O.V., Voevoda M.I., Zaigraev A.L., et al. Informatization as the Most Important Factor in the Successful Development of Healthcare Facilities. *Sibirskiy nauchnyy meditsinskiy zhurnal* = The Siberian Scientific Medical Journal. 2019; 39(2):110-115. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15372/SSMJ20190216>
10. Risse G.B. Ancient Egyptian Medicine. *A Journal of the History of Science Society*. 1999; 90(4):800. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1086/384532>
11. Šedinova H. Stones in the Ancient and Early-medieval Medicine Scripts. *Listy filologické*. 2000; 123(1). (In Eng.)
12. Sidorov A.A. On Healing by Stones. *Vestnik Rossiyskoy Akademii Nauk* = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2012; 82(8):774-776. Available at: http://www.ras.ru/publishing/raserald/raserald_articleinfo.aspx?articleid=4e61a196-fc90-4984-82b5-bb0f288e2f5e (accessed 26.02.2020). (In Russ.)
13. Tondiy L.D., Zakrevskaya E.L. May the Stones Do Clinic Effect? *Vostochnoevropeyskiy zhurnal vnutrenney i semeynoy meditsiny* = East European Journal of Internal and Family Medicine. 2016; (2):34-36. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15407/internalmed2016.02.033>

14. Wang R. Progress Review of the Scientific Study. *Archaeometry*. 2011; 53(4):674-692. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2010.00564.x>
15. Burtseva M.V., Ripp G.S., Posokhov V.F., et al. Nephrites of East Siberia: Geochemical Features and Problems of Genesis. *Geologiya i geofizika* = Russian Geology and Geophysics. 2015; 56(3):516-527. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15372/GiG20150303>
16. Wang N. Prospects of Economic Cooperation Development between Henan Province and Irkutsk Oblast. *Izvestiya Irkutskoy gosudarstvennoy ekonomicheskoy akademii* = Izvestiya of Irkutsk State Economics Academy. 2015; 25(3):512-518. Available at: <http://izvestia.bgu.ru/reader/article.aspx?id=20190> (accessed 26.02.2020). (In Eng.)
17. Tatarinov A.V., Yalovik L.I., Kanakin S.V., et al. The First Discovery of Nephrite With Platinum Group Accessory Minerals. *Doklady Akademii nauk* = Reports of the Academy of Sciences. 473(2):201-204. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.7868/S0869565217080217>
18. Method for Production of Thick Film Resistance Heater: Patent 2463748 Russian Federation. No. 2011103148/07; appl. 28.01.2011; publ. 10.08.2012. Bulletin No. 28. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU2011103148A_20120810.pdf (accessed 26.02.2020). (In Russ.)
19. Heating Element: Patent 109628 Russian Federation. No. 2011110667/07; appl. 21.03.2011; publ. 20.10.2011. Bulletin No. 29. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU109628U1_20111020.pdf (accessed 26.02.2020). (In Russ.)
20. Shelekhov I.Yu., Shishelova T.I., Smirnov Ye.I. New Technical Solutions for Designing Thermoelectric Systems. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(1):48-61. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201801.048-061>
21. Shelekhov I.Yu., Smirnov Ye.I., Inozemtsev V.P. Heating Appliance Designs Based on Physical and Mathematical Modeling. *Nauchnoye obozreniye* = Scientific Review. 2016; (1):42-48. (In Russ.)
22. Shishelova T.I., Shelekhov I.Yu. Development of Heating Equipment and Study of Its Efficiency in Life Support Systems. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Irkutsk State Technical University Bulletin. 2007; 1(1):104-109. Available at: http://journals.istu.edu/vestnik_irgtu/journals/2007/01a (accessed 26.02.2020). (In Russ.)

Received 02.09.2019; revised 06.11.2019; published online 31.03.2020

About the authors:

Igor Yu. Shelekhov, Associate Professor of Chair of Urban Construction and Economy of Institute of Architecture, Construction and Design, Irkutsk National Research Technical University (83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: V-3045-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7677-3187>, promptplo@yandex.ru

Tamara I. Shishelova, Professor of Chair of Physics, Irkutsk National Research Technical University (83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: V-2981-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2372-8144>, tamara.shishelova@gmail.com

Evgeniy I. Smirnov, Postgraduate Student of Chair of Engineering Communications and Life Support Systems of Institute of Architecture, Construction and Design, Irkutsk National Research Technical University (83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia), Researcher ID: V-3117-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4999-7342>, jeka7.7.7@mail.ru

Contribution of the authors:

I. Yu. Shelekhov – literary data analysis, scientific guidance, research task definition, data processing, article writing; T. I. Shishelova – literature analysis, text editing; E. I. Smirnov – analysis of literary data, preparation of samples, collection and analysis of analytical and practical materials, development of the experiment's methodology, computer implementation of the problem solution.

All authors have read and approved the final manuscript.



Моделирование дозвуковых многокомпонентных реагирующих газовых потоков на неструктурированных сетках

Р. В. Жалнин^{1*}, В. Ф. Масыгин¹, Е. Е. Пескова¹,
В. Ф. Тишкин²

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

²ИПМ им. М. В. Келдыша РАН (г. Москва, Россия)

*zhrv@mrsu.ru

Введение. В работе проведено моделирование задачи о дозвуковом течении газа в проточном химическом реакторе. Численный алгоритм основан на методе конечных объемов, расчет проведен на неструктурированных треугольных сетках с использованием технологии параллельных вычислений Message Passing Interface (MPI). **Материалы и методы.** Для описания исследуемых течений многокомпонентного химически активного газа приняты в рассмотрение уравнения Навье – Стокса в приближении малых чисел Маха. Для решения данных уравнений используется метод конечных объемов на неструктурированных треугольных сетках. В работе применяется схема расщепления по физическим процессам, а именно: сначала решаются уравнения химической кинетики, отвечающие за превращения веществ, а затем ищется решение уравнений, описывающих законы сохранения импульса и энергии для каждой компоненты газовой смеси. Для нахождения численных потоков через ребра элементов сетки используется схема Лакса – Фридрихса – Рунанова. Для решения уравнений химической кинетики применен алгоритм, предложенный коллективом под руководством Н. Н. Калиткина. Для разделения сетки на связанные подобласти с примерно равным количеством ячеек используется библиотека METIS. Для организации параллельных вычислений применяется MPI.

Результаты исследования. В статье представлены результаты моделирования течения многокомпонентного газа с учетом эффектов вязкости, диффузии, теплопроводности и химических реакций на неструктурированных треугольных сетках, а именно: было проведено численное моделирование течения дозвукового газа в проточном химическом реакторе на примере пиролиза этана, проведено сравнение полученных результатов с результатами эксперимента и известными численными решениями данной задачи.

Обсуждение и заключение. Полученные в работе результаты по конверсии исходной газовой смеси хорошо согласуются с известными экспериментальными данными. Представленные картины распределения основных компонент смеси и газодинамические параметры соответствуют картине течения, наблюдаемой экспериментально. Дальнейшая работа в данном направлении предполагает моделирование дозвуковых газовых течений на неструктурированных тетраэдральных сетках с использованием алгоритмов повышенного порядка точности для исследования протекающих процессов.

Ключевые слова: уравнения Навье – Стокса, дозвуковые течения, малые числа Маха, химическая кинетика, пиролиз этана, неструктурированные треугольные сетки



Финансирование: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (№ 1.6958.2017/8.9), ФГБУ «Российский фонд фундаментальных исследований» (проект № 18-31-00102) и гранта Президента РФ для молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-2007.2018.1).

Для цитирования: Жалнин, Р. В. Моделирование дозвуковых многокомпонентных реагирующих газовых потоков на неструктурированных сетках / Р. В. Жалнин, В. Ф. Масыгин, Е. Е. Пескова [и др.]. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202001.162-175 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 162–175.

Modeling the Flow of Multicomponent Reactive Gas on Unstructured Grids

R. V. Zhalnin^{a*}, V. F. Masyagin^a, E. E. Peskova^a,
V. F. Tishkin^b

^aNational Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

^bKeldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

*zhrv@mrsu.ru

Introduction. The article deals with mathematical modeling of the subsonic flow of a multicomponent reactive mixture in a flowing chemical reactor. The numerical algorithm is based on the finite volume method; the calculation is performed on unstructured triangular grids using the Message Passing Interface parallel computing technology.

Materials and Methods. To describe the flows under studying, the Navier–Stokes equations are used in the approximation for low Mach numbers. To solve these equations, the finite volume method on unstructured triangular grids is used. The study uses a splitting scheme for physical processes, namely, the chemical kinetics equations responsible for the transformations of substances are first solved, and then the equations describing the conservation laws of momentum and energy for each component of the gas mixture are solved. To find numerical flows through the edges of the grid elements, the Lax–Friedrichs–Rusanov scheme is used. To solve the equations of chemical kinetics, a compact algorithm proposed by the team led by N.N. Kalitkin is used. The METIS library is used to divide the grid into connected subdomains with an approximately equal number of cells. To organize parallel computing, Message Passing Interface technology is used.

Results. The article presents a numerical algorithm for studying multicomponent gas flows on unstructured triangular grids taking into account viscosity, diffusion, thermal conductivity, and chemical reactions. As a result of the study, a numerical simulation of the flow of a subsonic multicomponent gas in a flowing chemical reactor was carried out using ethane pyrolysis as an example. Computational, known numerical solutions and experimental data of ethane pyrolysis in a flowing reactor are compared.

Discussion and Conclusion. The numerical results on the conversion of the initial gas mixture are in good agreement with the known experimental data. The presented distribution patterns of the main components of the mixture and gas-dynamic parameters correspond to the flow pattern observed experimentally. Further work in this direction involves the modeling of subsonic gas flows on unstructured tetrahedral meshes using algorithms of higher accuracy for a more accurate study of ongoing processes.

Keywords: Navier–Stokes equations, subsonic flows, low Mach number, chemical kinetics, ethane pyrolysis, unstructured triangular grids

Funding: The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. 1.6958.2017/8.9), the Russian Foundation for Basic Research (Project No. 18-31-00102) and a grant of the President of the Russian Federation for young Russian scientists (МК-2007.2018.1).

For citation: Zhalnin R.V., Masyagin V.F., Peskova E.E., et al. Modeling the Flow of Multicomponent Reactive Gas on Unstructured Grids. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(1):162-175. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.162-175>

Введение

В настоящее время для исследования газовых течений активно применяется математическое моделирование [1–3]. Так, в задачах нефтехимической промышленности перед технологами стоит цель проведения реакции с максимальным выходом целевых продуктов, для ее достижения необходимо выбрать оптимальные значения температуры проведения реакции, состава и расхода исходной газовой смеси и других параметров. Проведение натурных экспериментов зачастую является трудоемкой и дорогостоящей процедурой, поэтому целесообразно пользоваться средствами математического моделирования.

При исследовании множества химических процессов приходится сталкиваться с низкоскоростными течениями, что приводит к необходимости выбора соответствующей математической модели. К тому же исследование реальных течений газовых смесей приходится проводить в областях сложной геометрической формы, в связи с чем возникает необходимость в использовании неструктурированных сеток. Нужно отметить, что численные алгоритмы решения задач исследования газовых течений очень требовательны к ресурсам вычислительной техники (необходимо учитывать процессы теплообмена, диффузии, химических превращений, использовать детальные кинетические схемы, которые могут включать сотни элементарных стадий). В этой связи целесообразно использовать средства параллельного программирования на суперкомпьютерах. Таким образом, в настоящей работе

стоит задача моделирования многокомпонентных реагирующих потоков газа в проточных реакторах на неструктурированной треугольной сетке с применением суперкомпьютерных технологий. Было проведено сравнение численных результатов по конверсии исходной газовой смеси на выходе из реактора с экспериментальными данными и данными, полученными в ходе других вычислительных экспериментов.

Обзор литературы

Во многих областях современной науки рассматриваются многокомпонентные течения газовых смесей с протекающими в них химическими реакциями. С такими течениями можно встретиться, например, при исследовании процессов горения, процессов в нефтехимической промышленности, газодинамике лазеров и катализаторов.

При исследовании реагирующих течений зачастую встречаются низкоскоростные газовые потоки, при моделировании которых приходится сталкиваться с вычислительными трудностями, связанными с неоправданно малым шагом интегрирования по времени и незначительным изменением давления в области¹. В работах ряда исследователей предложено множество подходов к решению данных проблем [4–7]. Описан метод проекций, в ходе реализации которого было проведено интегрирование законов сохранения массы, импульса и энергии, используя начальное поле давления [5; 8–10]. Таким образом были получены значения концентраций веществ, температуры и плотности газовой смеси, предварительное поле скорости. Затем с учетом найденных величин

¹ Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 618 с.; Лапин Ю.В., Стрелец М. Х. Внутренние течения газовых смесей. М.: Наука, 1989. 368 с.; Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984.

находились давление и поправки к вектору скорости.

Для численного моделирования химически реагирующих потоков приходится решать жесткие системы уравнений, описывающие химические превращения веществ. Использование явных схем интегрирования не всегда возможно для решения данных задач. Для решения жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений широко применяются неявные многошаговые методы Гира [11], схемы Розенброка [12], которые обладают высокой трудоемкостью. В одной из работ Н. Н. Калиткиным и В. Я. Гольдиным была предложена явная схема первого порядка точности, основанная на специфическом виде задач химической кинетики, в другом исследовании разработана схема второго порядка точности [13; 14].

Расчеты реальных газодинамических течений с учетом химических превращений являются ресурсоемкими, поэтому их практическое использование сложно представить без использования технологий параллельных вычислений. Применение технологий параллельных вычислений дает возможность разработать программные средства для исследования газодинамических течений на основе схем высокого порядка точности и провести вычисления на неструктурированных сетках большого объема с детальным описанием механизмов химических превращений [15; 16].

Данная работа посвящена математическому моделированию низкоскоростного течения газа с учетом процессов вязкости, теплопроводности и химических превращений. В работе проводится сравнение численных результатов с известными экспериментальными и численными данными.

Материалы и методы

Рассмотрим систему уравнений Навье – Стокса в приближении малых чисел Маха [4; 5; 10]:

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho Y_i \vec{v}) - \nabla \cdot \vec{J}_i + Q_i,$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) - \nabla \pi + \nabla \cdot \vec{\tau},$$

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho h \vec{v}) - \nabla \cdot \vec{q}.$$

Уравнение состояния и условие на дивергенцию вектора скорости:

$$p_0 = \rho RT \sum_i \left(\frac{Y_i}{M_{wi}} \right),$$

$$\begin{aligned} S \equiv \nabla \cdot \vec{v} = & \frac{1}{\rho C_p T} \left(\nabla \cdot \lambda \nabla T + \sum_i \rho D_{im} \nabla Y_i \nabla h_i \right) + \\ & + \frac{1}{\rho} \sum_i \frac{M_w}{M_{wi}} (\nabla \cdot \rho D_{im} \nabla Y_i) + \\ & + \frac{1}{\rho} \sum_i \left(\frac{M_w}{M_{wi}} - \frac{h_i}{C_p T} \right) Q_i, \end{aligned}$$

где Y_i – массовая доля i -й компоненты; M_{wi} – молекулярная масса i -й компоненты; ρ – плотность смеси; h – энтальпия смеси; T – температура; \vec{v} – вектор скорости; $\pi = p - p_0$ – динамическая составляющая давления; p_0 – термодинамическая составляющая давления; $\vec{\tau}$ – тензор вязких напряжений; \vec{J}_i – вектор диффузионного потока; \vec{q} – вектор потока тепла смеси; Q_i – скорость образования или расхода i -й компоненты.

Вектор диффузионного потока i -й компоненты и вектор потока тепла для смеси определяем с использованием модели средних по смеси значений [10]:

$$\vec{J}_i = -\rho D_{im} \nabla Y_i$$

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T - \sum_i h_i \rho D_{im} \nabla Y_i,$$

где D_{im} – средний по смеси коэффициент диффузии i -й компоненты; λ – коэф-

фициент теплопроводности смеси; h_i – энтальпия i -й компоненты:

$$h_i = \int_{T_0}^T C_{pi}(T) dT + h_i^0,$$

где h_i^0 – энтальпия образования i -й компоненты при стандартной температуре $T_0 = 298,15$ К; C_{pi} – удельная теплоемкость i -й компоненты при постоянном давлении.

Для определения тензора вязких напряжений используем следующее выражение:

$$\bar{\tau} = \mu \left(\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T \right) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \vec{v}) I,$$

где I – единичный тензор; μ – коэффициент динамической вязкости.

Скорость образования или расхода i -й компоненты газовой смеси определяем следующим образом:

$$Q_i = M_{wi} \sum_n v_{in} w_n,$$

где v_{in} – стехиометрические коэффициенты i -й компоненты в стадии реакции n ; w_n – скорость i -й стадии.

Для построения дискретной модели вводим неструктурированную сетку:

$$\omega = \{P_k = (x_k, y_k), k = 1, \dots, K\}.$$

После чего строим на ней триангуляцию Делоне:

$$\Delta(\omega) = \{ \Delta_m = \Delta(P_{i_m}, P_{j_m}, P_{k_m}), P_{i_m}, P_{j_m}, P_{k_m} \in \omega, m = 1 \dots M \}.$$

Газодинамические параметры и массовые доли компонент газовой смеси рассматриваем как интегральные средние в ячейках сетки.

При решении уравнений Навье – Стокса изменение концентраций компонентов газовой смеси за счет хи-

мических превращений учитываем с использованием следующей системы уравнений [10]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} = Q_i, \\ \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = - \sum_i Q_i h_i, \end{cases}$$

где $i = 1, \dots, M$ – количество компонентов газовой смеси и, соответственно, количество уравнений, описывающих химические превращения веществ, которые можно представить в виде [14]:

$$\frac{dc_i}{dt} = -c_i \varphi_i(c) + \psi_i(c), \quad c = (c_1, c_2, \dots, c_M),$$

где $c_i = \frac{\rho Y_i}{M_{wi}}$, причем $c_i \geq 0$, $\varphi_i(c) \geq 0$, $\psi_i(c) \geq 0$.

Используя специализированную явную схему второго порядка точности [14], решение системы уравнений химической кинетики находим простыми итерациями:

$$\begin{aligned} \hat{c}_i^{s+1} &= \frac{c_i + \tau \psi_i(\bar{c}^s) (1 + \tau \varphi_i(\bar{c}^s) / 2)}{1 + \tau \varphi_i(\bar{c}^s) + (\tau \varphi_i(\bar{c}^s))^2 / 2}, \\ \bar{c}^s &= \frac{(c + \hat{c})^{\wedge 0}}{2}, \quad c = c, \end{aligned}$$

где c_i – решение в исходный момент времени; \hat{c} – решение в новый момент времени. Для решения системы необходимо выполнить только две итерации, последующие итерации выполнять не следует: они не повышают порядок точности и ухудшают надежность схемы [14].

Систему уравнений Навье – Стокса с учетом решенных уравнений хими-

ческой кинетики можно представить в следующем векторном виде:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial (F^1(U) - H^1(U, \nabla U))}{\partial x} + \frac{\partial (F^2(U) - H^2(U, \nabla U))}{\partial y} = 0.$$

Вектор консервативных переменных U и векторы конвективных и диффузионных потоков $F^{1,2}(U)$, $H^{1,2}(U, \nabla U)$, заданы в виде:

$$U = \begin{pmatrix} \rho Y_i \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho h \end{pmatrix}, F^{(1)}(U) = \begin{pmatrix} \rho u Y_i \\ \rho u^2 \\ \rho uv \\ \rho hu \end{pmatrix}, F^{(2)}(U) = \begin{pmatrix} \rho v Y_i \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ \rho hv \end{pmatrix},$$

$$H^{(1)}(U, \nabla U) = \begin{pmatrix} J_{ix} \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ q_x \end{pmatrix}, H^{(2)}(U, \nabla U) = \begin{pmatrix} J_{iy} \\ \tau_{yx} \\ \tau_{yy} \\ q_y \end{pmatrix},$$

$$J_{ix} = \rho D_{mi} \frac{\partial Y_i}{\partial x}, J_{iy} = \rho D_{mi} \frac{\partial Y_i}{\partial y},$$

$$q_x = \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \sum_{j=1}^M h_j \rho D_{mj} \frac{\partial Y_j}{\partial x},$$

$$q_y = \lambda \frac{\partial T}{\partial y} + \sum_{j=1}^M h_j \rho D_{mj} \frac{\partial Y_j}{\partial y},$$

$$\tau_{xx} = \mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right),$$

$$\tau_{yy} = \mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right),$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right),$$

где $i = 1, 2, \dots, M$; M – количество элементов в реагирующей смеси.

Для построения разностной схемы проинтегрируем по ячейке Δ_m , ограниченной поверхностью $\partial\Delta_m$, и, используя формулу Гаусса – Остроградского, получим следующее выражение:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Delta_m} U dS + \oint_{\partial\Delta_m} (F^1(U) - H^1(U, \nabla U)) n_x dl + \oint_{\partial\Delta_m} (F^2(U) - H^2(U, \nabla U)) n_y dl = 0,$$

где $\vec{n} = (n_x, n_y)$ – внешняя нормаль к границе ячейки.

При интегрировании в качестве среднего значения на грани принимаем значение в центре грани, в качестве среднего значения по объему – значение в центре ячейки. Тогда уравнение для ячейки запишем следующим образом:

$$\frac{\partial U}{\partial t} S_{\Delta_m} + \sum_{e=1}^3 (\tilde{F}^1(U) - \tilde{H}^1(U, \nabla U)) n_{ex} l_e + \sum_{e=1}^3 (\tilde{F}^2(U) - \tilde{H}^2(U, \nabla U)) n_{ey} l_e = 0,$$

где l_e – длина грани; $\tilde{F}^1(U) = \tilde{F}^1(U^l, U^r)$, $\tilde{F}^2(U) = \tilde{F}^2(U^l, U^r)$ – конвективные потоки на границе ячейки, которые рассчитываем по схеме Лакса – Фридрихса – Русанова; $\tilde{H}^1(U, \nabla U)$, $\tilde{H}^2(U, \nabla U)$ – диффузионные и тепловые потоки на границе ячейки, которые рассчитываем по схеме с центральными разностями [16–18].

Вычисленное предварительное поле скорости \vec{v}^* не удовлетворяет условию на дивергенцию скорости S [10]. Для его коррекции используем следующее выражение:

$$\vec{v} = \vec{v}^* - \frac{\Delta t}{\rho} \nabla \pi.$$

Для нахождения динамической составляющей давления решаем уравнение Пуассона:

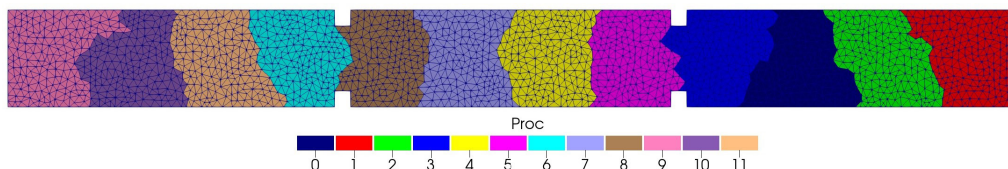
$$\nabla \cdot \frac{1}{\rho} \nabla \pi = \frac{1}{\Delta t} (\nabla \cdot \vec{v}^* - S).$$

Построение параллельного вычислительного алгоритма основано на технологии для систем с распределенной памятью Message Passing Interface (MPI). Используя пакет METIS, было проведено геометрическое разбиение расчетной области на подобласти, количество которых равно количеству используемых процессоров (рис.1). В каждой области с использованием описанной численной схемы проводим расчет газодинамических параметров и концентраций веществ. Учитывая особенность построения вычислительного алгоритма, на каждой из подобластей дополнительно хранится информация о соседних ячейках (соседей по ребру), расчет в которых ведется на другом процессоре. Для определения граничных условий между соседними подобластями организован межпроцессорный обмен, для которого используем стандартные методы библиотеки Message Passing Interface CNameleon (MPICH), а именно парные блокирующие функции *MPI_Send()* и *MPI_Recv()*. Выбор данных функций обусловлен наличием обменов только между соседними подобластями. Каждый процессор выводит результаты расчетов в файлы XML-формата (VTU, PVTU). Визуализацию численных данных осуществляем с использованием открытого пакета Para View.

Результаты исследования

В результатах серии исследований представлена установка, предназначенная для термического пиролиза углеводородов [19–22]. Также исследуются результаты численного моделирования процесса термического пиролиза этана и проведено сравнение с результатами эксперимента [19; 23; 24]. Сравнение данных, полученных экспериментально, и результатов расчетов выполнено на основе сравнения конверсии исходной газовой смеси. Для расчетов, описанных О. А. Стадниченко и соавторами, был использован пакет Ansys Fluent, в статье Р. В. Жалнина и коллег численный алгоритм построен на основе метода конечных объемов на прямоугольной сетке с использованием Weighted Essentially Non-Oscillatory (WENO) схем пятого порядка точности [19; 23; 25]. Результаты, приведенные в данных работах, хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Для моделирования процесса термического разложения этана в реакторе с внешним обогревом зоны реакции была принята следующая физическая постановка задачи [19–22]. В начальный момент времени реактор заполнен метаном, температура в области 300 К, давление 101 325 Па. В буферную зону подается метан с температурой 300 К и расходом 0,316 мг/с. В реакционную зону подается этан, температура которого 600 К, расход 0,754 мг/с. Температура торцевых стенок 300 К, нагревательных элементов 973 К, температура корпуса в буферных зонах меняется по линейному закону от 300 К у торцевых стенок до 973 К на границе с реакционной зоной.



Р и с. 1. Декомпозиция расчетной области

F i g. 1. Decomposition of the computational domain

На рисунке 2 представлены распределения массовых долей основных компонент смеси: этана, этилена, водорода, метана. Из рисунков 2b, 2c видно, что концентрация целевых продуктов пиролиза, этилена и водорода, наблюдается в правой части зоны реакции и у нагревательных элементов, так как именно в этих областях температура газа (рис. 3) максимальна и, следовательно, химические превращения происходят наиболее интенсивно. Доля защитного газа метана (рис. 2d) максимальна в буферных зонах за счет постоянной его подачи через соответствующие вводы. Максимальная плотность (рис. 4) наблюдается в областях подачи газовой смеси и у торцевых стенок, так как газ по своим характеристикам близок к идеальному, и температура его в этих областях минимальна.

В таблице 1 представлена зависимость конверсии исходной газовой смеси, подаваемой в реакционную зону, от температуры нагревательных элементов. Можно сделать вывод о хорошем соответствии экспериментальных данных, ранее полученных результатов на структурированной прямоугольной сетке с использованием алгоритмов повышенного порядка точности [23] и результатов текущих расчетов. Из таблицы 1 видно, что при самой низкой и самой высокой температуре результаты текущего расчета на неструктури-

рованной сетке дают завышенный результат по конверсии. Такое поведение можно объяснить первым порядком точности используемой численной схемы и погрешностью, которую вносит в схему использование неструктурированной сетки. Для достижения лучших численных результатов по исследованию газового потока с указанными начальными и граничными условиями необходимо уточнение геометрии реактора и использование в расчетах схем повышенного порядка точности.

Обсуждение и заключение

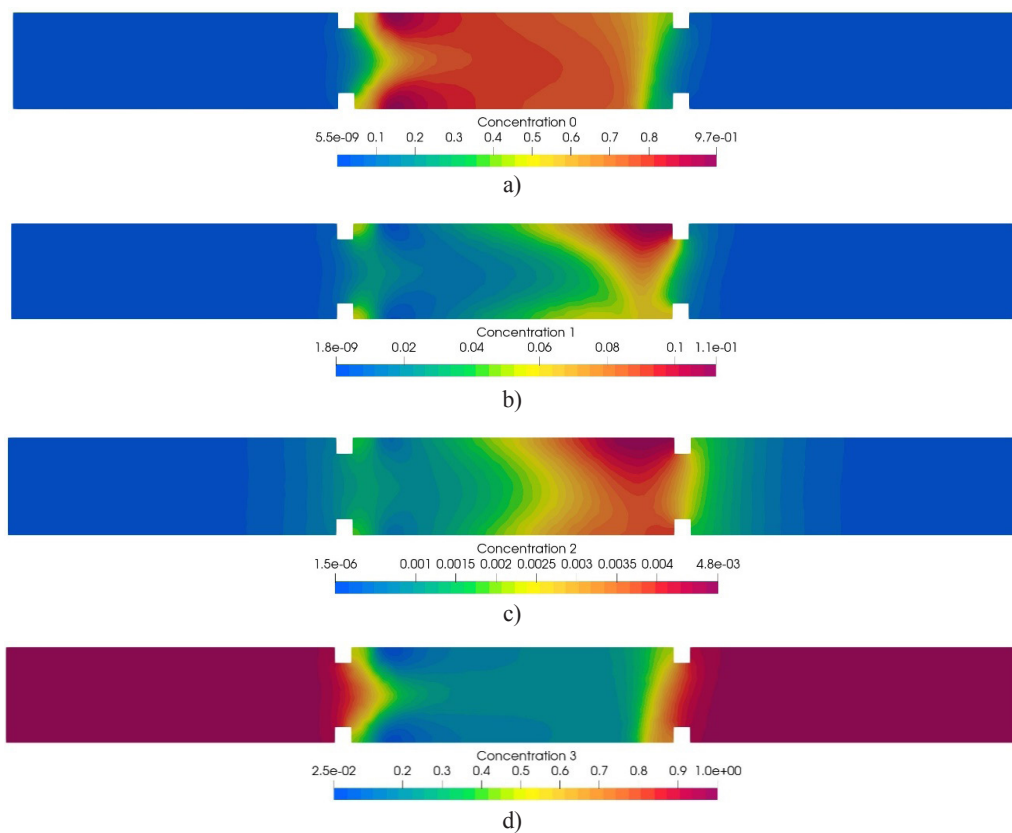
В работе проведено математическое моделирование динамики дозвукового многокомпонентного химически реагирующего газа на неструктурированных треугольных сетках с учетом процессов вязкости, диффузии и теплопроводности. Разработан параллельный вычислительный алгоритм и комплекс программ на его основе с использованием технологии MPI для моделирования течения газа в проточном химическом реакторе с внешним обогревом стенок. Проведено тестирование разработанного программного комплекса на задаче, описывающей процесс термического разложения этана. Результаты, полученные в ходе сравнения расчетных и экспериментальных данных, показали хорошее соответствие. Картины распределения основных компонент газовой смеси и газодинамических па-

Таблица 1

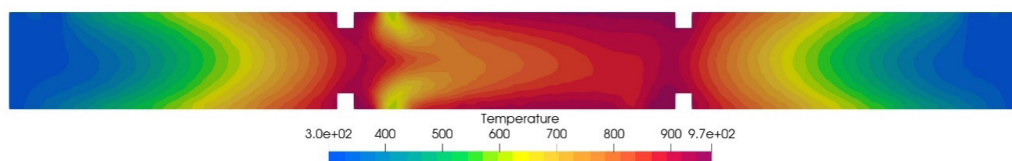
Table 1

Сравнение расчетных и экспериментальных данных конверсии этана
Comparison of calculated and experimental conversion of ethane

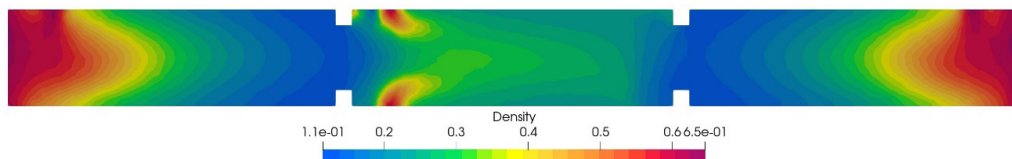
Температура, К / Temperature, K	Эксперимент, % / Experiment, %	Расчет на прямоугольной сетке, % / Calculation on a rectangular grid, %	Текущий расчет, % / Current calculation, %
915	2,10	1,97	7,20
973	15,60	14,28	15,24
1 015	37,00	35,15	35,27
1 033	48,78	48,15	51,73



Р и с. 2. Распределение массовых долей: а) этан; б) этилен; в) водород; д) метан
 F i g. 2. Distribution of the mass fraction: a) ethane; b) ethylene; c) hydrogen; d) methane



Р и с. 3. Температура
 F i g. 3. Temperature



Р и с. 4. Плотность
 F i g. 4. Density

параметров согласуются с основными физико-химическими законами, протекающими в ходе термического пиролиза углеводородов в химическом реакторе. Для более точного анализа исследуемых процессов в дальнейшем плани-

руется уточнение геометрии реактора, а именно предполагается исследование трехмерной модели реактора с использованием неструктурированных тетраэдральных сеток и алгоритмов повышенного порядка аппроксимации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Бондарев, А. Е.** Численное моделирование низкоскоростных течений на примере энергоустановки с использованием комплекса NOISEtte / А. Е. Бондарев, В. А. Галактионов, В. Т. Жуков [и др.]. – DOI 10.20948/prepr-2018-224 // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. – 2018. – № 224. – 20 с. URL: <https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-224> (дата обращения: 25.02.2020).
2. **Кулешов, А. А.** Алгоритм численного решения для двумерной трехфазной модели лесных пожаров / А. А. Кулешов, Е. Е. Мышецкая – DOI 10.20948/prepr-2018-202 // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. – 2018. – № 202. – 16 с. URL: <https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-202> (дата обращения: 25.02.2020).
3. **Abalakin, I. V.** Implementation of the Low Mach Number Method for Calculating Flows in the NOISEtte Software Package / I. V. Abalakin, V. G. Bobkov, T. K. Kozubskaya. – DOI 10.1134/S2070048217060023 // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2017. – Vol. 9. – Pp. 688–696. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS2070048217060023#citeas> (дата обращения: 25.02.2020).
4. **Almgren, A. S.** A Conservative Adaptive Projection Method for the Variable Density Incompressible Navier–Stokes Equations / A. S. Almgren, J. B. Bell, P. Colella [et al.]. – DOI 10.1006/jcph.1998.5890 // Journal of Computational Physics. – 1998. – Vol. 142, issue 1. – Pp. 1–46. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999198958909?via%3Dihub> (дата обращения: 25.02.2020).
5. **Day, M. S.** Numerical Simulation of Laminar Reacting Flows with Complex Chemistry / M. S. Day, J. B. Bell. – DOI 10.1088/1364-7830/4/4/309 // Combustion Theory and Modelling. – 2000. – Vol. 4, issue 4. – Pp. 535–556. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1088/1364-7830/4/4/309> (дата обращения: 25.02.2020).
6. **Metzner, M.** Computing Low Mach Number Flows by Parallel Adaptive Multigrid / M. Metzner, G. Wittum. – DOI 10.1007/s00791-006-0025-x // Computing and Visualization in Science. – 2006. – Vol. 9, issue 4. – Pp. 259–269. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2FS00791-006-0025-x#citeas> (дата обращения: 25.02.2020).
7. **Turkel, E.** Assessment of Preconditioning Methods for Multidimensional Aerodynamics / E. Turkel, R. Radespiel, N. Kroll. – DOI 10.1016/S0045-7930(97)00013-3 // Computers & Fluids. – 1997. – Vol. 26, issue 6. – Pp. 613–634. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045793097000133?via%3Dihub> (дата обращения: 25.02.2020).
8. **Almgren, A. S.** A Numerical Method for the Incompressible Navier – Stokes Equations Based on an Approximate Projection / A. S. Almgren, J. B. Bell, W. G. Szymczak. – DOI 10.1137/S1064827593244213 // SIAM Journal on Scientific Computing. – 1996. – Vol. 17, issue 2. – Pp. 358–369. URL: <https://epubs.siam.org/doi/10.1137/S1064827593244213> (дата обращения: 25.02.2020).
9. **Bell, J. B.** A Second-Order Projection Method for the Incompressible Navier – Stokes Equations / J. B. Bell, P. Colella, H. M. Glaz. – DOI 10.1016/0021-9991(89)90151-4 // Journal of Computational Physics. – 1989. – Vol. 85, issue 2. – Pp. 257–283. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0021999189901514?via%3Dihub> (дата обращения: 25.02.2020).
10. **Борисов, В. Е.** Применение адаптивных иерархических сеток для расчета течений реагирующих газов / В. Е. Борисов, С. Е. Якуш // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2015. – Т. 16, вып. 2. – 13 с. URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-2/articles/544/> (дата обращения: 25.02.2020). – Рез. англ.

11. **Gear, W. C.** Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations / W. C. Gear. – New Jersey : Prentice Hall, 1971. – 253 p.
12. **Rosenbrock, H. H.** Some General Implicit Processes for the Numerical Solution of Differential Equations / H. H. Rosenbrock. – DOI 10.1093/comjnl/5.4.329 // The Computer Journal. – 1963. – Vol. 5, issue 4. – Pp. 329–330. URL: <https://academic.oup.com/comjnl/article/5/4/329/316388> (дата обращения: 25.02.2020).
13. **Goldin, V. Ya.** Finding the Solutions of Constant Sign of Ordinary Differential Equations / V. Ya. Goldin, N. N. Kalitkin. – DOI 10.1016/0041-5553(66)90044-9 // USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 1966. – Vol. 6, issue 1. – Pp. 228–230. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0041555366900449?via%3Dihub> (дата обращения: 25.02.2020).
14. **Belov, A. A.** Modeling of Chemical Kinetics in Gases / A. A. Belov, N. N. Kalitkin, L. V. Kuzmina. – DOI 10.1134/S2070048217010057 // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2017. – Vol. 9. – Pp. 24–39. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS2070048217010057> (дата обращения: 25.02.2020).
15. **Горобец, А. В.** Производительность отечественного процессора Эльбрус-8С в суперкомпьютерном моделировании задач вычислительной газовой динамики / А. В. Горобец, М. И. Нейманзаде, С. К. Окунев [и др.]. – DOI 10.1134/S0234087919040026 // Математическое моделирование. – 2019. – Т. 31, № 4. – С. 17–32. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37242382> (дата обращения: 25.02.2020). – Рез. англ.
16. **Lyupa, A. A.** Simulation of Oil Recovery Processes with the Employment of High-Performance Computing Systems / A. A. Lyupa, D. N. Morozov, M. A. Trapeznikova [et al.]. – DOI 10.1134/S2070048216020095 // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2016. – Vol. 8. – Pp. 129–134. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS2070048216020095#citeas> (дата обращения: 25.02.2020).
17. **Rusanov, V. V.** The Calculation of the Interaction of Non-Stationary Shock Waves and Obstacles / V. V. Rusanov. – DOI 10.1016/0041-5553(62)90062-9 // USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 1962. – Vol. 1, issue 2. – Pp. 304–320. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0041555362900629?via%3Dihub> (дата обращения: 25.02.2020).
18. **Lax, P. D.** Weak Solutions of Nonlinear Hyperbolic Equations and Their Numerical Computation / P. D. Lax. – DOI 10.1002/Сра.3160070112 // Communications on Pure and Applied Mathematics. – 1954. – Vol. 7, issue 1. – Pp. 159–193. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/сра.3160070112> (дата обращения: 25.02.2020).
19. **Стадниченко, О. А.** Математическое моделирование потоков многокомпонентного газа с энергоемкими химическими процессами на примере пиролиза этана / О. А. Стадниченко, В. Н. Снытников, В. Н. Снытников // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. – 2014. – Т. 15. – С. 658–668. – Рез. англ.
20. **Snytnikov, V. N.** Autocatalytic Gas-Phase Dehydrogenation of Ethane / V. N. Snytnikov, T. I. Mishchenko, V. N. Snytnikov. – DOI 10.1007/s11164-011-0449-x // Research on Chemical Intermediates. – 2012. – Vol. 38, issue 3. – Pp. 1133–1147. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11164-011-0449-x> (дата обращения: 25.02.2020).
21. **Stadnichenko, O. A.** Mathematical Modeling of Ethane Pyrolysis in a Flow Reactor with Allowance for Laser Radiation Effects / O. A. Stadnichenko, V. N. Snytnikov, V. N. Snytnikov. – DOI 10.1016/j.cherd.2016.02.008 // Chemical Engineering Research and Design. – 2016. – Vol. 109. – Pp. 405–413. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026387621600071X?via%3Dihub> (дата обращения: 25.02.2020).
22. **Masyuk, N.** Effect of Infrared Laser Radiation on Gas-Phase Pyrolysis of Ethane / N. Masyuk, A. Sherin, V. N. Snytnikov [et al.]. – DOI 10.1016/j.jaap.2018.05.017 // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2018. – Vol. 134. – Pp. 122–129. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237017305594?via%3Dihub> (дата обращения: 25.02.2020).
23. **Жалнин, Р. В.** Моделирование течения многокомпонентного реагирующего газа с использованием алгоритмов высокого порядка точности / Р. В. Жалнин, Е. Е. Пескова, О. А. Стадниченко [и др.]. – DOI 10.20537/vm170410 // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. – 2017. – Т. 27, № 4. – С. 608–617. URL: http://www.mathnet.ru/php/archive.php?ml?wshow=paper&jrnid=vuu&paperid=612&option_lang=eng (дата обращения: 25.02.2020).

24. **Жалнин, Р. В.** Моделирование течения многокомпонентного химически активного газа на примере пиролиза углеводородов / Р. В. Жалнин, Е. Е. Пескова, О. А. Стадниченко [и др.]. – DOI 10.20948/prepr-2017-101 // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. – 2017. – № 101. – 16 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2017-101> (дата обращения: 25.02.2020).

25. **Shu, C.-W.** Essentially Non-Oscillatory and Weighted Essentially Non-Oscillatory Schemes for Hyperbolic Conservation Laws / C.-W. Shu. – DOI 10.1007/BFb0096355 // Advanced Numerical Approximation of Nonlinear Hyperbolic Equations. – 1997. – Vol. 1697. – Pp. 325–432. URL: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/BFb0096355#citeas> (дата обращения: 25.02.2020).

Поступила 13.09.2019; принята к публикации 07.11.2019; опубликована онлайн 31.03.2020

Об авторах:

Жалнин Руслан Викторович, ведущий научный сотрудник, заведующий кафедрой прикладной математики, дифференциальных уравнений и теоретической механики факультета математики и информационных технологий ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат физико-математических наук, доцент, Researcher ID: Q-6945-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1103-3321>, zhrv@mrsu.ru

Масягин Виктор Федорович, старший научный сотрудник, доцент кафедры прикладной математики, дифференциальных уравнений и теоретической механики факультета математики и информационных технологий ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат физико-математических наук, Researcher ID: C-2439-2013, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6738-8183>, vmasyagin@mrsu.ru

Пескова Елизавета Евгеньевна, младший научный сотрудник, доцент кафедры прикладной математики, дифференциальных уравнений и теоретической механики факультета математики и информационных технологий ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат физико-математических наук, Researcher ID: U-7971-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2618-1674>, e.e.peskova@mail.ru

Тишкин Владимир Федорович, заведующий отделом ИПМ им. М. В. Келдыша РАН (125047, Россия, г. Москва, Миусская пл., д. 4), доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Researcher ID: R-5820-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7295-7002>, v.f.tishkin@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Р. В. Жалнин – разработка методики исследования; В. Ф. Масягин – реализация алгоритма и программного комплекса; Е. Е. Пескова – поиск алгоритма расчетов, проведение исследования полученных численных результатов; В. Ф. Тишкин – постановка задачи и общее руководство работой.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Bondarev A.E., Galaktionov V.A., Zhukov V.T., et al. Numerical Simulation of Low-Speed Flows Around of Power Plant Using NOISEtte. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha* = KIAM Preprint. 2018; 224. 20 p. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.20948/prepr-2018-224>

2. Kuleshov A.A., Myshetskaya E.E. Numerical Algorithm for Two-Dimensional Three-Phase Mathematical Model of Forest Fires. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha* = KIAM Preprint. 2018; 202. 16 p. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.20948/prepr-2018-202>

3. Abalakin I.V., Bobkov V.G., Kozubskaya T.K. Implementation of the Low Mach Number Method for Calculating Flows in the NOISEtte Software Package. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2017; 9:688-696. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070048217060023>

4. Almgren A.S., Bell J.B., Colella P., et al. A Conservative Adaptive Projection Method for the Variable Density Incompressible Navier – Stokes Equations. *Journal of Computational Physics*. 1998; 142(1):1-46. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1006/jcph.1998.5890>
5. Day M.S., Bell J.B. Numerical Simulation of Laminar Reacting Flows with Complex Chemistry. *Combustion Theory and Modelling*. 2000; 4(4):535-556. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1364-7830/4/4/309>
6. Metzner M., Wittum G. Computing Low Mach Number Flows by Parallel Adaptive Multigrid. *Computing and Visualization in Science*. 2006; 9(4):259-269. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s00791-006-0025-x>
7. Turkel E., Radespiel R., Kroll N. Assessment of Preconditioning Methods for Multidimensional Aerodynamics. *Computers & Fluids*. 1997; 26(6):613-634. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-7930\(97\)00013-3](https://doi.org/10.1016/S0045-7930(97)00013-3)
8. Almgren A.S., Bell J.B., Szymczak W.G. A Numerical Method for the Incompressible Navier – Stokes Equations Based on an Approximate Projection. *SIAM Journal on Scientific Computing*. 1996; 17(2):358-369. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1137/S1064827593244213>
9. Bell J.B., Colella P., Glaz H.M. A Second-Order Projection Method for the Incompressible Navier – Stokes Equations. *Journal of Computational Physics*. 1989; 85(2):257-283. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(89\)90151-4](https://doi.org/10.1016/0021-9991(89)90151-4)
10. Borisov V.Ye., Yakush S.Ye. Application of Adaptive Hierarchical Grids to Simulation of Reacting Gas Flows. *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoy dinamike* = Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics. 2015; 16(2). 13 p. Available at: <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-2/articles/544/> (accessed 25.02.2020). (In Russ.)
11. Gear W.C. Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations. New Jersey: Prentice Hall; 1971. 253 p. (In Eng.)
12. Rosenbrock H.H. Some General Implicit Processes for the Numerical Solution of Differential Equations. *The Computer Journal*. 1963; 5(4):329-330. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1093/comjnl/5.4.329>
13. Goldin V.Ya., Kalitkin N.N. Finding the Solutions of Constant Sign of Ordinary Differential Equations. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1966; 6(1):228-230. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0041-5553\(66\)90044-9](https://doi.org/10.1016/0041-5553(66)90044-9)
14. Belov A.A., Kalitkin N.N., Kuzmina L.V. Modeling of Chemical Kinetics in Gases. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2017; 9:24-39. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070048217010057>
15. Gorobets A.V., Neiman-Zade M.I., Okunev S.K., et al. Performance of Elbrus-8C Processor in Supercomputer CFD Simulations. *Matematicheskoe modelirovanie* = Mathematical Models and Computer Simulations. 2019; 31(4):17-32. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S0234087919040026>
16. Lyupa A.A., Morozov D.N., Trapeznikova M.A., et al. Simulation of Oil Recovery Processes with the Employment of High-Performance Computing Systems. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2016; 8:129-134. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070048216020095>
17. Rusanov V.V. The Calculation of the Interaction of Non-Stationary Shock Waves and Obstacles. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1962; 1(2):304-320. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0041-5553\(62\)90062-9](https://doi.org/10.1016/0041-5553(62)90062-9)
18. Lax P.D. Weak Solutions of Nonlinear Hyperbolic Equations and Their Numerical Computation. *Communications on Pure and Applied Mathematics*. 1954; 7(1):159-193. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1002/Cpa.3160070112>
19. Stadnichenko O.A., Snytnikov V.N., Snytnikov V.N. Mathematical Modeling of Multicomponent Gas Flows with Energy Intensive Chemical Processes by the Example of Ethane Pyrolysis. *Vychislitelnye metody i programmirovaniye: novye vychislitelnye tekhnologii* = Numerical Methods and Programming. 2014; 15:658-668. (In Russ.)
20. Snytnikov V.N., Mishchenko T.I., Snytnikov V.N. Autocatalytic Gas-Phase Dehydrogenation of Ethane. *Research on Chemical Intermediates*. 2012; 38(3):1133-1147. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11164-011-0449-x>

21. Stadnichenko O.A., Snytnikov V.N., Snytnikov V.N. Mathematical Modeling of Ethane Pyrolysis in a Flow Reactor with Allowance for Laser Radiation Effects. *Chemical Engineering Research and Design*. 2016; 109:405-413. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.02.008>
22. Masyuk N., Sherin A., Snytnikov V.N., et al. Effect of Infrared Laser Radiation on Gas-Phase Pyrolysis of Ethane. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2018; 134:122-129. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.05.017>
23. Zhalnin R.V., Peskova E.E., Stadnichenko O.A., et al. Modeling the Flow of a Multicomponent Reactive Gas Using High Accuracy Algorithms. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Kompyuternye nauki* = Bulletin of Udmurt University. Mathematics. Mechanics. Computer Science. 2017; 27(4):608-617. Available at: http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=vuu&paperid=612&option_lang=eng (accessed 25.02.2020). (In Russ.)
24. Zhalnin R.V., Peskova E.E., Stadnichenko O.A., et al. Modeling the Flow of Multicomponent Reactive Gas by the Example of Hydrocarbons Pyrolysis. *Preprinty IPM im. M. V. Keldysha* = KIAM Preprint. 2017; 101. 16 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.20948/prepr-2017-101>
25. Shu C.-W. Essentially Non-Oscillatory and Weighted Essentially Non-Oscillatory Schemes for Hyperbolic Conservation Laws. *Advanced Numerical Approximation of Nonlinear Hyperbolic Equations*. 1997; 1697:325-432. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/BFb0096355>

Received 13.09.2019; revised 07.11.2019; published online 31.03.2020

About the authors:

Ruslan V. Zhalnin, Leading Researcher, Head of Chair of Applied Mathematics, Differential Equations and Theoretical Mechanics of Faculty of Mathematics and Information Technology, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Researcher ID: Q-6945-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1103-3321>, zhrrv@mrsu.ru

Victor F. Masyagin, Senior Researcher, Associate Professor of Chair of Applied Mathematics, Differential Equations and Theoretical Mechanics of Faculty of Mathematics and Information Technology, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Physics and Mathematics), Researcher ID: C-2439-2013, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6738-8183>, vmasyagin@mrsu.ru

Elizaveta E. Peskova, Researcher, Associate Professor of Chair of Applied Mathematics, Differential Equations and Theoretical Mechanics of Faculty of Mathematics and Information Technology, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Physics and Mathematics), Researcher ID: U-7971-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2618-1674>, e.e.peskova@mail.ru

Vladimir F. Tishkin, Head of Department of Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences (4 Miusskaya Sq., Moscow 125047, Russia), D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Corresponding Member of RAS, Researcher ID: R-5820-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7295-7002>, v.f.tishkin@mail.ru

Contribution of the authors:

R. V. Zhalnin – research methodology development; V. F. Masyagin – implementation of the algorithm and the software complex; E. E. Peskova – search for the calculation algorithm, study of the numerical results; V. F. Tishkin – problem formulation and general work management.

All authors have read and approved the final manuscript.

Информация для авторов и читателей

Научный журнал «Инженерные технологии и системы» публикует оригинальные научные исследования, способствующие развитию науки в области инженерных систем и технологий.

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

- 01.04.01 Приборы и методы экспериментальной физики
- 01.04.05 Оптика
- 01.04.13 Электрофизика, электрофизические установки
- 05.20.01 Технологии и средства механизации сельского хозяйства
- 05.20.02 Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве
- 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве

Не допускается направление в редакцию уже опубликованных статей или статей, отправленных на публикацию в другие журналы. **В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий опубликованная статья будет ретрагирована (отозвана из печати).** Мониторинг несанкционированного цитирования осуществляется с помощью систем «Антиплагиат» и CrossCheck.

Журнал приветствует статьи, имеющие потенциально высокий импакт-фактор и/или содержащие материал о значительных достижениях в указанных направлениях. Особое внимание следует уделить качеству перевода. Желательно, чтобы он был выполнен носителем английского языка.

При подготовке статьи к публикации в журнале «Инженерные технологии и системы» необходимо учесть следующие пункты.

1. Указать **УДК**.

2. **Заголовок статьи** должен кратко и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного исследования. *Приводится на русском и английском языках.*

3. **Аннотация** (200–250 слов) выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В ней должны быть четко обозначены следующие составные части:

- 1) Введение (Introduction);
- 2) Материалы и методы (Materials and Methods);
- 3) Результаты исследования (Results);
- 4) Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion).

Приводится на русском и английском языках.

4. **Ключевые слова** (5–10) являются поисковым образом научной статьи. В связи с этим они должны отражать основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования. *Приводятся на русском и английском языках.*

5. **Благодарности.** В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам. *Приводятся на русском и английском языках.*

6. **Основной текст** статьи излагается на русском или английском языках.

1) Введение – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

2) Обзор литературы. Необходимо описать основные (последние по времени) исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы; выделить нерешенные вопросы в пределах общей проблемы, которым посвящена статья.

3) Материалы и методы. В данном разделе описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, использованная аппаратура; даются подробные сведения об объекте исследования; указывается последовательность выполнения исследования и обосновывается выбор используемых методов (наблюдение, опрос, тестирование, эксперимент, лабораторный опыт и т. д.).

4) Результаты исследования. Это основной раздел, цель которого – при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно эти данные.

5) Обсуждение и заключение. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области.

7. **Список использованных источников** (оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.100–2018). Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 30–40 источников. Из них за последние 3 года – не менее 20, иностранных – не менее 15. Следует указать DOI или адрес доступа в сети Интернет. *Оформляется на русском и английском языках.*

8. **Об авторах.** Ф.И.О., организация(и), адрес организации(й) (требуется указать все места работы автора, в которых выполнялись исследования (постоянное место, место выполнения проекта и др.)), должность и ученое звание, ORCID, Researcher ID, электронная почта, телефон, почтовый адрес для отправки авторского экземпляра. Приводится на русском и английском языках.

9. **Заявленный вклад соавторов.** В конец рукописи необходимо включить примечания, в которых разъясняется фактический вклад каждого соавтора в выполненную работу. *Приводится на русском и английском языках.*

10. **Техническое оформление.**

1) Редакция принимает тексты, сохраненные в формате .doc, .docx, .rtf. Желательно использовать шрифт Times New Roman, кегль 14 и интервал 1,5 строки. Расстановка переносов вручную не допускается. Запрещается использовать двойные пробелы в тексте, а также выполнять отступы (красная строка), используя пробелы.

2) Формулы набираются сочетанием основного шрифта и шрифта Symbol (исключение для дробей, сумм, квадратного корня) в Microsoft Equation 3.0 (Редактор формул в Microsoft Word) или Math Type 6. Латинские знаки в формулах и обозначениях (как в тексте, так и на рисунках) набираются курсивом. Формулы нумеруются в круглых скобках. Нумеровать следует только те формулы и уравнения, на которые есть ссылка в последующем изложении.

3) Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

4) Рисунки могут быть представлены в растровом или векторном формате с разрешением не ниже 300 dpi. Они должны допускать редактирование текста и возможность изменения размеров. Все графические данные помещаются в текст статьи, а также высылаются дополнительно в виде отдельных файлов. Разнохарактерные иллюстрации необходимо приводить к единому стилю графического исполнения, соблюдая единообразие их оформления. Графики, схемы и диаграммы необходимо оформлять в Microsoft Excel.

При подаче статьи в редакцию автор соглашается с положениями прилагаемого лицензионного договора.

Важным этапом в процессе отбора статьи является рецензирование. В журнале «Инженерные технологии и системы» принято «двойное слепое» (рецензент и автор не знают имен друг друга) рецензирование статей. Рецензент на основании анализа статьи принимает решение о рекомендации ее к публикации или о ее отклонении. В случае несогласия автора статьи с замечаниями рецензента его мотивированное заявление рассматривается редакционной коллегией.

Политика редакционной коллегии журнала базируется на современных юридических требованиях в отношении клеветы, авторского права, законности и плагиата, поддерживает Кодекс этики научных публикаций, сформулированный Комитетом по этике научных публикаций, и строится с учетом этических норм работы редакторов и издателей, закрепленных в Кодексе поведения и руководящих принципах наилучшей практики для редактора журнала и Кодексе поведения для издателя журнала, разработанных Комитетом по публикации этической этике.

Допускается свободное воспроизведение материалов журнала в личных целях и свободное использование в информационных, научных, учебных и культурных целях в соответствии со ст. 1273 и 1274 гл. 70 ч. IV Гражданского кодекса РФ. Иные виды использования возможны только после заключения соответствующих письменных соглашений с правообладателем.

Электронные версии статей размещаются на сайте Научной электронной библиотеки. Журнал распространяется по подписке, заявкам высших учебных заведений, учреждений образования и отдельных лиц. Подписной индекс в каталоге агентства «Роспечать» – 70539.

Вдовин Сергей Михайлович – главный редактор. Тел.: +7 (8342) 24-48-88.

Сенин Петр Васильевич – заместитель главного редактора. Тел.: +7 (8342) 23-32-60.

Гордина Светлана Викторовна – ответственный секретарь. Тел.: +7 (8342) 48-14-24.

Information for authors and readers of the journal

“Engineering Technologies and Systems” Journal accepts unpublished earlier original research results promoting the development of science in the field of engineering systems and technologies.

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Technologies and Means of Agricultural Mechanization

Electrotechnologies and Electrical Equipment in Agriculture

Technologies and Means of Maintenance in Agriculture

It is not allowed to submit papers that have already been published or sent for publication to other journals. **In the case of multiple submission of a manuscript, the published article will be retracted.** Monitoring of unauthorized citation is implemented by means of AntiPlagiat and CrossCheck systems.

The Journal gives preference to the articles with potentially high impact factor and/or containing materials about significant achievements in the specified areas of science. Special attention should be paid to the quality of the translation. Preferably it should be made by a native English speaker.

To submit an article in the journal Engineering Technologies and Systems you should know:

1. It is necessary to indicate the **Universal Decimal Classification (UDC)** code.

2. **The title of the article** should accurately reflect the content of the article, the subject matter and the results of the research conducted.

The title should be written in Russian and English.

3. **The abstract** (200–250 words) serves as an enhanced title of the article and briefly presents its content. The abstract consists of the following components:

1) Introduction;

2) Materials and Methods;

3) Results;

4) Discussion and Conclusion.

The abstract should be written in Russian and English.

4. Keywords (5–10) make the search profile of the scientific article. In this regard, they should reflect the main provisions, achievements, results and terminology of the scientific research.

Keywords should be written in Russian and English.

5. **Acknowledgements.** In this section the author may mention the people who helped them to prepare the article or the organizations that provided financial support. It is considered good style to express gratitude to anonymous reviewers.

Acknowledgements should be written in Russian and English.

6. **The main body** of the article should be written in Russian or in English.

1) Introduction. It contains formulation of the scientific problem, its relevance, connection with the most important tasks to be solved, the importance for the development of a particular area of science or practical activities.

2) Literature Review. It is necessary to describe the main (recent) pieces of research and publications relied upon by the author, modern views on the problem, difficulties in solving the problem as well as to highlight the unresolved issues within the general problem of the article.

3) Materials and Methods. This section describes the process of designing the experiment, the methods and equipment used; it gives detailed information about the subject and sequence of the research, justifies the choice of the methods used (observation, survey, testing, experiment, etc.).

4) Results. This is the main section, the purpose of which is to prove the working hypothesis (hypotheses) by analyzing, generalizing and explaining the data. The results should be brief, but they should provide sufficient information to evaluate the conclusions drawn. It should also be justified why the particular data were chosen for the analysis.

5) Discussion and Conclusion. In conclusion, the results of understanding the topic should be summarized; conclusions, generalizations and recommendations arising from the work should be made, their practical significance should be emphasized and the main directions for further research in the studied area should be determined.

7. **References** should be given in accordance with the requirements of the *GOST R 7.0.100–2018* standard. The original sources from scientific journals included in the global citation indices should be cited first of all. It is desirable to refer to 30–40 sources. Of these, at least 20 sources should be those published over the past 3 years and at least 15 foreign ones. DOI or the URL of the source should be indicated.

References should be written in Russian and English.

8. Information **about author(s)** includes: the author's first name and last name, the name of the institution and its address (it is required to specify all the institutions where the author works and where the research was conducted (permanent place of work, the place where the project was done, etc.). The author's position and academic title, ORCID, Researcher ID, e-mail, phone number, postal address for sending a personal copy of the Journal issue.

Information about the authors should be written in Russian and English.

9. **Contribution of the authors.** At the end of the manuscript, the authors should include notes that explain the actual contribution of each co-author to the work performed.

Contribution of the authors should be written in Russian and English.

10. **Manuscript Format Guidelines.**

1) The manuscript should be typed in the Microsoft Word text processing program for Windows (.doc, .docx, .rtf); sheet size – A4, Times New Roman font, font size – 14, line spacing – 1.5. Manual hyphenation is not allowed. It is forbidden to use double spaces in the text, as well as to indent (red line) using spaces.

2) Formulas are typed by combining the main font and the Symbol font (exception for fractions, sums, square root) in Microsoft Equation 3.0 (Formula Editor in Microsoft Word) or Math Type 6. Latin symbols in formulas and notation (both in the text and in the figures) typed in italics. Formulas are numbered in parentheses. Only those formulas and equations referenced in the following presentation should be numbered.

3) All titles, signatures and structural elements of graphs, tables, charts, etc., are to be provided in Russian and English.

4) Figures can be presented in raster or vector format with a resolution of at least 300 dpi. They should allow text editing and resizability. All graphic data are placed in the text of the article, as well as sent additionally as separate files. Diverse illustrations should be brought to a single style of graphic performance, while respecting the uniformity of their design. Graphs, charts and diagrams must be drawn up in Microsoft Excel.

When submitting an article to the Journal, the author agrees with the provisions of the attached license agreement.

As part of the submission, the journal will peer review your article before deciding whether to publish it. *Engineering Technologies and Systems* journal uses double-blind review, which means that both the reviewer and author identities are concealed from the reviewers, and vice versa. On the basis of the analysis of the article, the reviewer makes a decision whether to recommend the article for publication or reject it. If the author disagrees with the reviewer's comments, their reasoned statement shall be considered by the Editorial Board.

Editorial staff's policy is based on modern legal requirements concerning libel, copyright, legitimacy, plagiarism, ethical principles, kept in community of leading scientific issues publishers. Journal's editorial policy is based upon traditional ethical principles of Russian academic periodicals; it supports Academic Periodicals Ethical Codex, stated by Committee on Publication Ethics (Russia, Moscow) and it is formed in account of standards of ethics of editors' and publishers' work confirmed by Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors and Code of Conduct for Journal Publishers, developed by Committee on Publication Ethics.

Free reproduction of the Journal's materials for personal purposes and free use for information, scientific, educational and cultural purposes is allowed in accordance with articles 1273 and 1274 of Chapter 70, part 4 of the Civil Code of the Russian Federation. Other types of use are possible only after the conclusion of relevant written agreements with the right holder.

Electronic copies of the journal with full text of the articles in PDF are in free access at the website of Academic Electronic Library. The Journal is distributed on the basis of a subscription, requests of higher education institutions, educational institutions and individuals. The subscription index in the catalogue of the agency of Rospechat is 70539.

Sergey M. Vdovin – Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 244888.

Petr V. Senin – Deputy Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 233260.

Svetlana V. Gordina – Executive Editor. Tel.: +7 (8342) 481424.

Редактор – *А. Д. Карпов*
Перевод *С. В. Голованова, Н. Н. Плеханковой*
Компьютерная верстка *Е. П. Гординой*
Информационная поддержка *Р. В. Карасева*

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Подписано в печать 11.03.2020 г. Дата выхода в свет 31.03.2020 г.

Формат $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 14,63.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 250 экз. Заказ № 673. Свободная цена.

Адрес типографии: 430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Советская, д. 24
(Издательство федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва»)



Editor *A. D. Karpov*
Translation *S. V. Golovanov, N. N. Plekhankova*
Desktop publishing *E. P. Gordina*
Informational support *R. V. Karasev*

Distributed in Russian Federation and foreign countries.

Signed to print 11.03.2020. Date of publishing 31.03.2020.

Sheet size $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Conventional printed sheets 14,63.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 250 copies. Order no. 673. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)