



ISSN 2687-1149 (Print)
ISSN 2687-1130 (Online)

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Научный журнал

Том 25. № 4 / 2023

Учредитель и издатель:
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева

Свидетельство о регистрации
средства массовой информации
ПИ № ФС77-78053
от 06 марта 2020 г.

Основан в 2003 году

Периодичность: 6 номеров в год

Журнал «Вестник
федерального государственного
образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Московский государственный
агроинженерный университет
имени В.П. Горячкина» переименован
и зарегистрирован с новым названием
«Агроинженерия» 6 марта 2020 г.

Полнотекстовые версии
доступны на сайте <http://elibrary.ru>

Редактор – И.В. Мельникова
Литературная обработка текста –
В.И. Марковская
Компьютерный набор и верстка –
А.С. Лаврова
Перевод на английский язык –
А.Ю. Алипичев

Адрес редакции: 127434, Москва,
Тимирязевская ул., 58, к. 336
Тел.: (499) 976-07-27
E-mail: agroeng@rgau-msha.ru
[http://www.timacad.ru/about/
struktura-universiteta/izdaniia/
vestnik-mgau](http://www.timacad.ru/about/struktura-universiteta/izdaniia/vestnik-mgau)

Отпечатано в типографии
ООО «ЭйПиСиПаблишинг»
127550, г. Москва,
Дмитровское ш., д. 45, корп. 1, оф. 8
Тел.: (499) 976-51-84, (985) 109-44-19

Подписано в печать 31.08.2023 г.
Формат 60 84/8
Тираж 500 экз.

© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева, 2023

Главный научный редактор

Ерохин М.Н., академик РАН, д-р техн. наук, профессор кафедры сопротивления материалов и деталей машин, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>

Заместители главного научного редактора:

Дорохов А.С., академик РАН, д-р техн. наук, профессор, заместитель директора по научно-организационной работе, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>

Водяников В.Т., д-р экон. наук, профессор кафедры организации производства, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0001-7111-9437>

Кубрушко П.Ф., чл.-корр. РАО, д-р пед. наук, профессор, заведующий кафедрой педагогики и психологии профессионального образования, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0002-2142-1037>

Члены редакционного совета:

Алдошин Н.В., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой сельскохозяйственных машин, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>

Балабанов В.И., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой мелиоративных и строительных машин, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>

Бердышев В.Е., д-р техн. наук, профессор, руководитель Центра учебно-методического обеспечения подготовки кадров для АПК, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)

Гайдар С.М., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения и технологии машиностроения, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>

Девянин С.Н., д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры тракторов и автомобилей, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0001-6776-0432>

Загинайлов В.И., д-р техн. наук, профессор кафедры электроснабжения и электротехники имени академика И.А. Будзко, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X>

Казанцев С.П., д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой сопротивления материалов и деталей машин, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)

Кобозева Т.П., д-р. с.-х. наук, профессор кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка и высоких технологий в растениеводстве, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)

Кравченко И.Н., д-р техн. наук, профессор кафедры технического сервиса машин и оборудования, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>

Левшин А.Г., д-р техн. наук, заведующий кафедрой эксплуатации машинно-тракторного парка и высоких технологий в растениеводстве, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <http://orcid.org/0000-0001-8010-4448>

Леонов О.А., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой метрологии, стандартизации и управления качеством, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>

Назарова Л.И., канд. пед. наук, доцент кафедры педагогики и психологии профессионального образования РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0001-5698-6284>

Роберт И.В., академик РАО, д-р пед. наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБНУ «Институт стратегии развития образования РАО» (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0001-9303-6560>

Сторчевой В.Ф., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бородин, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>

Худякова Е.В., д-р экон. наук, профессор, заведующая кафедрой прикладной информатики, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация) <https://orcid.org/0000-0001-7875-074X>

Чумаков В.Л., канд. техн. наук, профессор кафедры тракторов и автомобилей, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)

Чутчева Ю.В., д-р экон. наук, заведующая кафедрой экономики, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0002-7450-5664>

Шогенов Ю.Х., академик РАН, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий сектором механизации, электрификации и автоматизации ОСХН РАН, ФГБУ «Российская академия наук» (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0002-7588-0458>

Иностранные члены редакционного совета:

Абдыров А.М., д-р пед. наук, профессор Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина (г. Нур-Султан, Казахстан), <https://orcid.org/0000-0002-6852-0235>

Божков Снежан Иванов, канд. техн. наук, проф., Институт почвоведения, агротехнологий и защиты растений им. Н. Пушкирова, Сельскохозяйственная академия (г. София, Болгария), <https://orcid.org/0000-0002-5702-4893>

Куанто Фредерик, профессор, Высший национальный институт аграрных наук, продовольствия и окружающей среды (АгроСюп, Дижон, Франция), <https://orcid.org/0000-0001-8541-8382>

Маматов Ф.М., д-р техн. наук, профессор кафедры механизации сельского хозяйства и сервиса, Каршинский инженерно-экономический институт (г. Карши, Республика Узбекистан), <https://orcid.org/0000-0002-8916-4225>

Франтишек Кумхала, профессор, председатель отделения сельскохозяйственного машиностроения и строительства Чешской академии сельскохозяйственных наук, член бюро Чешской академии сельскохозяйственных наук, заведующий кафедрой сельскохозяйственных машин Университета естественных наук (Прага, Чешская Республика), <https://orcid.org/0000-0002-7782-6033>

Хоанг Дык Куанг, канд. хим. наук, Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и технологический центр (г. Хошимин, Вьетнам), <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782>



Founder and Publisher:

**Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy**

The mass media registration certificate
ПИ No. ФС 77-78053 of March 6, 2020

Founded in 2003

Publication Frequency:

6 issues per year

Scientific Journal "Vestnik of Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin" [Vestnik FGOU VPO "Moskovskiy gosudarstvenniy agroinzhenerniy universitet imeni V.P. Goryachkina"] was renamed and registered under a new title on March 6, 2020.

Full versions are posted on the site
<http://elibrary.ru>

EXECUTIVE EDITORS:

I.V. Melnikova
V.I. Markovskaya
A.S. Lavrova
A.Yu. Alipichev

Editors' office address:

Timiryazevskaya str., 58, Moscow, 127434
Tel.: 8 (499) 976-07-27;
E-mail: agroeng@rgau-msha.ru
<http://www.timacad.ru/about/struktura-universiteta/izdaniia/vestnik-mgau>

Printed by APC Publishing LLC
127550, Moscow,
Dmitrovskoe Ave., 45, 1, office 8
Tel.: (499) 976-51-84, (985) 109-44-19

Passed for printing 31.08.2023

Format – 60 84/8

Circulation – 500 copies.

© Federal State Budgetary Establishment
of Higher Education – Russian State
Agrarian University – Moscow Timiryazev
Agricultural Academy, 2023

Science Editor-in-Chief

Mikhail N. Erokhin, Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor of the Department of Resistance of Materials and Machine Parts, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation) <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>

Deputy Science Editor-In-Chief:

Aleksei S. Dorokhov, Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor, Director Deputy for Science and Organizational Work, Federal State Budgetary Research Institution – Federal Scientific Agroengineering Center (VIM) (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>

Vladimir T. Vodyannikov, DSc (Econ), Professor, Professor of the Department of Organization of Production, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0001-7111-9437>

Petr. F. Kubrushko, Corresponding Member of the Russian Academy of Education, DSc (Ed), Deputy Scientific Editor-in-Chief, Head of the Department of Pedagogy and Psychology of Professional Education, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0002-2142-1037>

Members of the Editorial Board:

Nikolay V. Aldoshin, DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Agricultural Machines, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>

Viktor I. Balabanov, DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Land Reclamation and Construction Machines, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>

Viktor Ye. Berdyshev, DSc (Eng), Professor, Head of the Centre for Education-and-Methodological Support of Human Resource Training for Agriculture, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation)

Sergei M. Gaidar, DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Materials Science and Engineering Technology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>

Sergey N. Devyanin, DSc (Eng), Professor, Professor of the Department of Tractors and Automobiles, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0001-6776-0432>

Vladimir I. Zaginailov, DSc (Eng), Professor, Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering named after Academician I.A. Budzko, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X>

Sergey P. Kazantsev, DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Strength of Materials and Machine Parts, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation)

Tamara P. Kobozeva, DSc (Ag), Professor of the Department of Machinery and Tractor Operation and High Technologies in Plant Cultivation, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation)

Igor N. Kravchenko, DSc (Eng), Professor of the Department of Technical Service of Machinery and Equipment, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>

Aleksandr G. Levshin, DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Machinery and Tractor Operation and High Technologies in Plant Cultivation, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <http://orcid.org/0000-0001-8010-4448>

Oleg. A. Leonov, DSc (Eng), Professor, Head of the Metrology, Standardization and Quality Management Department, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>

L.I. Nazarova, CSc (Ed), Associate Professor, Department of Pedagogy and Psychology of Professional Education, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0001-5698-6284>

Irena V. Robert, Full Member of the Russian Academy of Education, DSc (Ed), Professor, Chief Research Associate, the Institute for Educational Development Strategy of the Russian Academy of Education (Moscow, Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0001-9303-6560>

Vladimir F. Storchevov, DSc (Eng), Professor, Head of the Process Automation and Robotisation Department named after Academician I.F. Borodin, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>

Yelena V. Khudyakova, DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Applied Informatics, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation)

Valeriy L. Chumakov, CSc (Eng), Professor, the Department of Tractors and Automobiles, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation)

Yulia V. Chutcheva, DSc (Econ), Head of the Department of Economics, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0002-7450-5664>

Yuriy Kh. Shogenov, Full Member of the Russian Academy of Sciences DSc (Eng), Senior Research Associate, Head of the "Mechanization, Electrification and Automation" Section, Department of Agricultural Sciences, the Russian Academy of Sciences (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0002-7588-0458>

International members of the Editorial Board:

Aytzhan M. Abdyyrov, DSc (Ed), Professor, S. Seifullin Kazakh Agro Technical University (Nur-Sultan, Kazakhstan), <https://orcid.org/0000-0002-6852-0235>

Snezhan I. Bozhkov, PhD (Eng), Professor, Institute of Soil Science, Agrotechnology and Plant Protection named after N. Pushkarov, Agricultural Academy (Sofia, Bulgaria), <https://orcid.org/0000-0002-5702-4893>

Frederick Cointault, Professor, Higher National Institute of Agricultural Sciences, Food and Environment (Agrosup, Dijon, France), <https://orcid.org/0000-0001-8541-8382>

Farmon M. Mamatov, DSc (Eng), Professor, Professor of the Agricultural Mechanization and Service Department, Karshi Institute of Engineering and Economics (Karshi, Republic of Uzbekistan), <https://orcid.org/0000-0002-8916-4225>

Frantisek Kumhala, Professor, Chairman of the Agricultural Machinery and Construction Division of the Czech Academy of Agricultural Sciences, the Bureau Member of the Czech Academy of Agricultural Sciences, Head of the Department of Agricultural Machines of Czech University of Life Sciences (Prague, Czech Republic), <https://orcid.org/0000-0002-7782-6033>

Duc Quang Hoang, PhD (Chem), Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Centre (Ho Chi Minh, Vietnam), <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782>

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

Ерохин М.Н., Кирсанов В.В., Иванов Ю.Г., Кирсанов С.В. Анализ эргономичности труда операторов машинного доения на роторно-конвейерных доильных установках «Карусель»	4
Дорохов А.С., Павкин Д.Ю., Юрочка С.С. Технология цифровых двойников в сельском хозяйстве: перспективы применения.....	14
Левшин А.Г., Гаспарян И.Н., Голубев И.Г. Развитие мобильной энергетики с учётом агротехнологических ограничений	26
Никитченко С.Л., Лесник Н.А., Смыков С.В. Управление техническим обслуживанием сельскохозяйственной техники в условиях автоматизации и цифровизации производства	33
Капустин А.В., Чумаков В.Л., Девянин С.Н., Жоробеков Б.А. Математическое моделирование детонации в двигателях с искровым зажиганием.....	43
Катаев Ю.В., Тишанинов И.А. Применение цифровых технологий при диагностировании двигателей энергонасыщенной сельскохозяйственной техники.....	52
Старовойтов В.И., Жевора С.В., Старовойтова О.А., Семенов Г.В., Манохина А.А. Влияние сублимационной сушки на качественные показатели клубней картофеля	60
Мазур В.В., Никульчев К.А. Совершенствование технологии производства кукурузы на зерно в условиях Приамурья	65

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Нестеркин Г.А. Методика комплектования деталей соединений «Вал-уплотнение» при ремонте	70
Мельников О.М., Серов Н.В., Гамидов А.Г., Лапаев А.В., Павлов А.Е. Влияние браслетной пружины на контактную нагрузку в соединении «Вал-манжета».....	76
Петрик Д.Ю., Корнеев В.М., Петрик В.Ю. Определение оптимальных технологических параметров процесса очистки деталей в погружных моечных машинах	81

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Оськин С.В., Мирошников А.В., Нагучев З.Х., Украинцев М.М. Моделирование потерь энергии в асинхронном электродвигателе.....	85
--	----

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Чистова Я.С., Козленкова Е.Н., Назарова Л.И. Фонды оценочных средств как инструмент диагностики качества профессионального образования.....	91
--	----

CONTENTS

FARM MACHINERY AND TECHNOLOGIES

Mikhail N. Erokhin, Vladimir V. Kirsanov, Yuri G. Ivanov, Sergey V. Kirsanov Analyzing the ergonomics of operators working on rotary conveyor milking machines of the "Carousel" type.....	4
Aleksei S. Dorokhov, Dmitry Yu. Pavkin, Sergey S. Yurochka Digital twin technology in agriculture: prospects for use.....	14
Aleksandr G. Levshin, Irina N. Gasparyan, Ivan G. Golubev Development of mobile power production taking into account agrotechnological limitations	26
Sergei L. Nikitchenko, Natalia A. Lesnik, Sergey V. Smykov Management of agricultural machinery maintenance under the automation and digitalization of production	33
Aleksandr V. Kapustin, Valery L. Chumakov, Sergey N. Devyanin, Bolotbek A. Zhorobekov Mathematical modeling of engine detonation in spark ignition engines.....	43
Yuri V. Kataev, Igor A. Tishaninov Use of digital technologies in diagnosing engines of energy-saturated agricultural machinery	52
Viktor I. Starovoitov, Sergey V. Zhevara, Oksana A. Starovoitova, Gennadiy V. Semenov, Aleksandra A. Manokhina Freeze-drying of potato tubers: a study of the qualitative indicators	60
Vladimir V. Mazur, Konstantin A. Nikulchev Improving the technology of grain corn production in the conditions of the Amur region	65

TECHNICAL SERVICE IN AGRICULTURE

Oleg A. Leonov, Nina Zh. Shkaruba, Yuliya G. Vergazova, Gennady A. Nesterkin Methodology of completing the parts of the "Shaft seal" connections during repair	70
Oleg M. Melnikov, N.V. Serov, A.G. Gamidov, A.V. Lapaev, A.E. Pavlov Influence of the band spring on the contact load in the shaft-seal connection.....	76
Dmitry Yu. Petrik, Viktor M. Korneev, Vladislav Yu. Petrik Determining the optimum technological parameters of cleaning parts in submersible washing machines	81

POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION

Sergey V. Oskin, Aleksei V. Miroshnikov, Zaur H. Naguchev, Maksim M. Ukrainiantsev Modeling of energy losses in an asynchronous electric motor	85
---	----

THEORY AND METHODOLOGY OF PROFESSIONAL EDUCATION

Yana S. Chistova, Elena N. Kozlenkova, Liudmila I. Nazarova Assessment kit as a diagnosing tool of professional education quality ...	91
---	----

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 637.115:331.44

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-4-13



Анализ эргономичности труда операторов машинного доения на роторно-конвейерных доильных установках «Карусель»

Ерохин Михаил Никитьевич, академик РАН, д-р техн. наук, профессор¹

erohin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>; Scopus Author ID: 572092705884

Кирсанов Владимир Вячеславович[✉], чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, зав. отделом механизации и автоматизации животноводства²

kirvv2014@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-2549-4070>

Иванов Юрий Григорьевич, д-р техн. наук, профессор¹

iy.electro@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4766-9532>

Кирсанов Сергей Владимирович, ведущий инженер³

sergejkirsanovv@gmail.com

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

² Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

³ ООО «ТрансЭнергоСнаб»; 105066, Российская Федерация, г. Москва, ул. Нижняя Красносельская, 35, стр. 9

Аннотация. Оператор машинного доения при обслуживании роторно-конвейерной доильной установки молочных комплексов на 1200...3000 и более коров испытывает повышенные психологические и физические нагрузки. Общий функционал человека-оператора машинного доения включает в себя информационно-управляющий (оценка физиологического состояния, статусов животного, передача сигналов с доильного поста в центральный компьютер и др.) и физический функционал по выполнению ручных операций (обработка вымени и сосков животных, подключение доильных аппаратов). Анализ эргономичности труда операторов машинного доения на установках «Карусель» показал, что суммарная работа оператора в расчете на 1 корову на установке с внутренним доением по типу «Ёлочка» (36,62 Дж) выше, чем при внешнем доении по типу «Параллель» (26,42 Дж), ввиду большей составляющей по перемещению доильного аппарата (22,9 против 12,7 Дж). Энергоемкость труда у 3 операторов в расчете на 1 корову является различной: при внутреннем доении («Ёлочка») нагрузка составляет 3,92; 30,74; 1,96 Дж, при внешнем доении («Параллель») – 3,92; 20,54; 1,96 Дж. Физическая нагрузка операторов за рабочую смену также различается: при работе 3 чел. энергозатраты оператора при внутреннем доении («Ёлочка») варьируют от 1372 (у третьего оператора) до 37807 Дж (у второго оператора); для 2 операторов (без операции обработки сосков после доения) нагрузка является одинаковой – от 24262 до 33964 Дж. При работе 3 чел. на «Карусели» типа «Параллель» диапазон энергозатрат составляет от 1918 до 43134 Дж, с 2 операторами – от 23968 до 51366 Дж. Допустимый верхний предел для операторов-мужчин (не более 50000 Дж) превышен в случае внешнего доения и максимальной производительности 300 гол/ч; для операторов-женщин (не более 30000 Дж) у всех вторых операторов при максимальной производительности «Карусели» с внутренним доением – 140 гол/ч, внешним доением – 300 гол/ч. Перегруженность операторов доильных установок роторного типа необходимо учитывать при организации их работы и дальнейшей модернизации установок.

Ключевые слова: доильная установка «Карусель», оператор машинного доения, функционал человека-оператора, энергозатраты оператора, структура энергозатрат, эргономичность труда операторов машинного доения

Формат цитирования: Ерохин М.Н., Кирсанов В.В., Иванов Ю.Г., Кирсанов С.В. Анализ эргономичности труда операторов машинного доения на роторно-конвейерных доильных установках «Карусель» // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 4-13. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-4-13>.

© Ерохин М.Н., Кирсанов В.В., Иванов Ю.Г., Кирсанов С.В., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Analyzing the ergonomics of operators working on rotary conveyor milking machines of the “Carousel” type

Mikhail N. Erokhin, Full Member of RAS, DSc (Eng), Professor¹

n.erohin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>; Scopus Author ID: 572092705884

Vladimir V. Kirsanov[✉], Corresponding Member of RAS, DSc (Eng), Professor²

kirvv2014@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-2549-4070>

Yuri G. Ivanov, DSc (Eng), Professor¹

iy.electro@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4766-9532>

Sergey V. Kirsanov, Lead Engineer³

sergejkirsanovv@gmail.com

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow 127434, Russian Federation

² Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5, 1st Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, Russian Federation

³ LLC “TransEnergoSnab”; Bld. 9, 35 Nizhnaya Krasnoselskaya Str., Moscow, 105066, Russian Federation

Abstract. When operating a rotary conveyor milking plant of dairy facilities for 1200 to 3000 or more cows, a milking machine operator experiences increased psychological and physical stress. The general functionality of the human operator of machine milking plants includes information and control (assessment of the physiological state, status of the animal, signal transmission from the milking point to the central computer, etc.) and physical functionality for performing manual operations (preparing the udder and teats of animals, connecting milking units). The conducted ergonomics analysis of milking machine operators at the “Carousel” plants showed that the total work of the operator per cow at the internal milking plant of the “Herringbone” type (36.62 J) is higher than at those with external milking of the “Parallel” type (26.42 J), due to the larger workload part required to move the milking machine (22.9 versus 12.7 J). The energy intensity of labor for three operators per cow is different: for internal milking (“Herringbone”), the load is 3.92, 30.74, and 1.96 J, with external milking (“Parallel”) – 3.92, 20.54, and 1.96 J. The physical load of operators per shift also varies: for a team of three people, the operator’s energy consumption during internal milking (“Herringbone”) varies from 1372 (for the third operator) to 37807 J (for the second operator); for two operators (without teat treatment after milking) the load is the same – from 24262 to 33964 J. For a team of three people working on the “Parallel”-type “Carousel”, the energy consumption ranges between 1918 and 43134 J, with two operators – between 23968 and 51366 J. The permissible upper limit for male operators (no more than 50000 J) is exceeded in the case of external milking and a maximum production of 300 head/h; for female operators (not more than 30,000 J) for all second operators at the maximum productivity of the “Carousel” with internal milking – 140 head/h, with external milking – 300 head/h. The overload of operators of rotary milking plants must be taken into account when organizing their work and upgrading the plants.

Keywords: milking plant of the “Carousel” type, milking machine operator, human operator functionality, operator energy consumption, energy cost structure, labor ergonomics of milking machine operators

For citation: Erokhin M.N., Kirsanov V.V., Ivanov Yu.G., Kirsanov S.V. Analyzing the ergonomics of operators working on rotary conveyor milking machines of the “Carousel” type. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(4):4-13. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-4-13>.

Введение. Крупные животноводческие молочные комплексы на 1200...3000 и более коров построены в последнее время в ряде регионов нашей страны. Для сравнения: в Советском Союзе аналогичные комплексы, оснащенные доильными установками «Карусель» фирмы «Импульс» (ГДР), насчитывали не более 2000 гол. («Щапово» – 2000 гол., Наро-Осановский – 1600 гол. и др.). Сегодня создаются комплексы с еще более высокой концентрацией поголовья, и оператор машинного доения, обслуживая роторно-конвейерные доильные установки по 8-10 ч в сутки (при двух- и трехсменной работе), испытывает повышенные

психологические и физические нагрузки при монотонных, часто повторяемых операциях: при обтирании сосков влажной салфеткой, сдаивании первых струек в отдельную посуду, подключении доильных стаканов к соскам вымени, их последоильной обработке и др. [1].

Эргономике труда операторов машинного доения в настоящее время уделяется недостаточно внимания, хотя известны работы по оценке загруженности и надежности функционирования операторов машинного доения [2, 3]. Анализ зарубежной литературы и международных стандартов по охране труда не выявил наличия каких-либо нормативов и конкретных показателей

по оценке и нормированию тяжести и напряженности труда операторов в животноводстве [4, 5]. Пооперационный хронометраж работы операторов машинного доения проводился ранее на машиноиспытательных станциях при приемочных испытаниях эксплуатационно-технологической оценки доильных установок с целью определения производительности труда, загрузки оборудования и др. По оценке безопасности в основном отмечались качественные показатели: рациональность рабочей позы оператора, удобство и безопасность технического и технологического обслуживания доильной установки^{1,2}.

Л.П. Карташовым и С.А. Соловьевым, а также другими исследователями (Оренбургский ГАУ) были введены и определены показатели качества и надежности труда операторов доения на разных типах доильных установок. Было отмечено снижение работоспособности и качества их работы к концу дойки по причине психологической и физической усталости. Разработаны тренажеры, позволяющие обучать обслуживающий персонал технике и правилам машинного доения, от которых зависят здоровье и продуктивность животных³. Высокий ритм потока (впуск-выпуск животных на вращающуюся платформу) вынуждает оператора в единицу времени совершать большое количество однообразных движений по обслуживанию животных. При этом в течение преддоильной подготовки ему необходимо в сжатый промежуток времени оценить отсутствие противопоказаний к доению в общий молокопровод: наличие травм, кровоточивость сосков и вымени; признаки заболевания животных маститом; лечение антибиотиками при заболевании или запрет на доение перед запуском; ручной ввод номера коровы при сбое системы идентификации и др. Отсутствие на установках «Карусель» селекционных ворот, размещаемых на выходе из доильных залов, или роботов, сбоя в системах управления доением, нерабочие датчики электропроводности и др. вызывают информационную и эмоциональную перегруженность оператора, а в сочетании с накапливающейся физической и психологической усталостью снижаются скорость реакции и надёжность функционирования оператора, особенно при обслуживании

большого поголовья. В связи с этим актуально рассмотреть эргономичность труда операторов машинного доения, оценить тяжесть и напряженность их труда.

Цель исследований: анализ эргономичности труда операторов машинного доения на роторно-конвейерных доильных установках «Карусель».

Материалы и методы. На основе фотохронометражных наблюдений, требований стандартов ССБТ по охране труда⁴, анализа зарубежной и отечественной литературы оценена эргономичность труда операторов машинного доения (ЧО) коров на разных типах современных высокопроизводительных установок «Карусель» с внутренним и внешним расположением операторов доения. Выполняемая ими информационная и физическая нагрузка сопоставлена с требованиями нормативной документации.

Общий функционал человека-оператора машинного доения $Z_{\text{чо}}$ можно представить в виде информационно-управляющего $Z_{\text{чо}}^u$ (оценка физиологического состояния, статусов животного, передача сигналов с доильного поста в центральный компьютер и др.) и физического функционала по выполнению ручных операций при машинном доении коров $Z_{\text{чо}}^f$:

$$Z_{\text{чо}} = Z_{\text{чо}}^u + Z_{\text{чо}}^f \rightarrow \min. \quad (1)$$

В локальных биотехнических системах доения (доильные залы, роботы, системы обеспечения микроклимата и др.) данный функционал должен стремиться к минимуму за счет развития средств автоматизации, роботизации доения и цифровизации [6, 7]. Уровни автоматизации и роботизации определяют значение физического функционала человека-оператора, а его информационно-управляющий функционал определяется в основном уровнем цифровизации. Если с роботизацией процессов физический функционал оператора доения практически стремится к нулю, то одновременно растет его информационно-управляющая составляющая. Требуется большое количество данных для ввода информации и подбора животных к роботизированному доению, необходим контроль числа невыдоенных животных и промежутков между доениями. Данная нагрузка распределяется уже на сервисного инженера и подгонщика животных.

Напряженность труда операторов машинного доения на установках «Карусель» можно оценить, проанализировав данные таблицы 1, сформированной в соответствии с требованиями к операторскому труду⁵ и исследованиями [1].

⁴ ГОСТ 12.0.001-82. Система стандартов безопасности труда. Основные положения. URL: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30039303&pos=1;-16#pos=1;-16 (дата обращения: 01.04.2023).

⁵ Девесилов В.А. Охрана труда: Учебник. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2013. 448 с.

¹ ГОСТ Р 12.0.001-2013. Система стандартов безопасности труда. Основные положения. URL: <https://docs.cntd.ru> (дата обращения: 06.01.2014).

² Межгосударственный стандарт ГОСТ 34496-2018. Установки и аппараты доильные для коров. Методы испытаний: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 октября 2019 г. № 983-ст. URL: <https://www.dokipedia.ru>.

³ Поздняков В.Д. Повышение надежности и эффективности функционирования операторов механизированных процессов животноводства: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Оренбург, 2006. 40 с. EDN: NJYXSH.

Таблица 1

Классы условий труда по показателям напряженности трудового процесса операторов машинного доения на установках «Карусель»

Table 1

Classes of working conditions according to the indicators of the labor process intensity of milking machine operators at the “Carousel” plants

Показатели тяжести трудового процесса <i>Indicators of the workload intensity</i>	Класс условий труда / <i>Working condition class</i>					
	Оптимальный (легкая физическая нагрузка) <i>Optimal (light physical load)</i>	Допустимый (средняя физическая нагрузка) <i>Permissible (average physical load)</i>	Вредный (тяжелый труд) <i>Harmful (hard work)</i>			
			1-й степени <i>Degree 1</i>	2-й степени <i>Degree 2</i>	3-й степени <i>Degree 3</i>	
			1	2	3,1	3,2
Сенсорные нагрузки / <i>Sensory loads</i>						
1. Длительность сосредоточенного наблюдения за животными, % от времени смены <i>1. Duration of concentrated observation of animals, % of shift time</i>		до 25 <i>up to 25</i>	26-50	51-75	более 75* <i>over 75*</i>	-
2. Плотность сигналов (световых, звуковых) и сообщений в системе «Доильный пост-компьютер» в среднем за 1 ч работы, ед/ч <i>2. Average density of signals (light, sound) and messages in the system “Milking point-computer” per hour of work, units/h</i>		до 75 <i>up to 75</i>	75-175	176-300*	более 300 <i>over 300</i>	-
3. Наблюдение за экранами блоков управления доением, ч в смену <i>3. Supervision of screens of milking control units, hours per shift</i> <i>Monotonicity of loads</i>		до 2 <i>up to 2</i>	2-3	3-4	более 4* <i>over 4*</i>	-
Монотонность нагрузок / <i>Monotonicity of loads</i>						
1. Число элементов (приемов), необходимых для подключения доильного аппарата к вымени, ед. <i>1. Number of elements (methods) required to connect the milking machine to the udder, units.</i>		более 10 <i>over 10</i>	9-6*	5-3	менее 3 <i>less than 3</i>	-
2. Продолжительность выполнения ручных операций при подготовке коровы и подключению доильных стаканов, с <i>2. Duration of manual operations during cow preparation and teat cup connection, s</i>		более 100 <i>over 100</i>	100-25	24-10	менее 10* <i>less than 10*</i>	-
Режим работы / <i>Working mode</i>						
Фактическая продолжительность рабочего дня, ч <i>Actual working hours, h</i>		6-7 Односменная работа (без ночной смены) <i>Single shift work (no night shift)</i>	8-9* Двухсменная работа (без ночной смены) <i>Double shift work (no night shift)</i>	-	более 12 Нерегулярная сменность с работой в ночное время <i>over 12 Irregular shifts with night work</i>	-

* Операции, вызывающие значительные сенсорные и монотонные физические нагрузки оператора, относящиеся к вредному тяжелому по напряженности труду 1-й и 2-й степеней.

* Operations that cause significant sensory and monotonous physical activity of the operator, related to harmful hard labor of the 1st and 2nd degrees.

Информационно-управляющий функционал оператора $Z_{\text{чо}}^{\text{и}}$ зависит не только от чисто информационных (сенсорных) нагрузок, но и от монотонных, часто повторяющихся физических нагрузок, выполняемых при ручных операциях по обработке вымени и сосков животных и подключении доильных аппаратов, вызывающих психологическое напряжение:

$$Z_{\text{чо}}^{\text{и}} = f[\text{ЧО}; X_{\text{и}} \dots X_{\text{пи}}, Y_{\text{лмф}} \dots Y_{\text{пмф}}];$$

$$I_{\text{чо}}^{\text{и}} = \frac{(X_{\text{и}} \dots X_{\text{пи}}) + (Y_{\text{лмф}} \dots Y_{\text{пмф}})}{T_{\text{в}}}, \quad (2)$$

где $X_{\text{и}} \dots X_{\text{пи}}$ – информационные сенсорные нагрузки ЧО; $Y_{\text{лмф}} \dots Y_{\text{пмф}}$ – часто повторяющиеся монотонные физические нагрузки ЧО при обработке сосков и подключении доильных аппаратов; $I_{\text{чо}}^{\text{и}}$ – интенсивность использования информационно-управляющего функционала человека-оператора (количество совершаемых операций в единицу времени); $T_{\text{в}}$ – продолжительность выполнения подготовительно-заключительных операций при машинном доении в расчете на 1 животное, равное 15-20 с.

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим более подробно структуру физического функционала ЧО

при машинном доении на роторно-конвейерной доильной установке «Карусель» с внутренним (по типу «Ёлочка») и внешним (по типу «Параллель») расположением ЧО (рис. 1, 2).

Зоны обслуживания вымени коров представляют собой треугольники со сторонами a , b , c , которые имеют неодинаковую площадь ввиду разного шага расположения животных. При расположении по типу «Ёлочка» шаг составляет примерно 1,2 м, а по типу «Параллель» – 0,8 м, то есть равен ширине коровы. Оператор перемещает доильные аппараты из стартового положения к вымени животных по гипотенузам $c_{\text{с}}$ и $c_{\text{п}}$.

Полную структуру физического функционала оператора машинного доения можно записать как

$$Z_{\text{чо}}^{\text{ф}} = f[\text{ЧО}; A_{\text{ос}}, A_{\text{п}}, A_{\text{уд}}, A_{\text{дс}}], \quad (3)$$

где $A_{\text{ос}}$, $A_{\text{п}}$, $A_{\text{уд}}$, $A_{\text{дс}}$ – соответственно работы, выполняемые оператором (ЧО) по обработке сосков, перемещению доильного аппарата к вымени, удерживанию подвесной части рукой и поочередному подключению доильных стаканов.

Работу по перемещению подвесной части доильного аппарата $A_{\text{п}}$ и подключению доильных стаканов

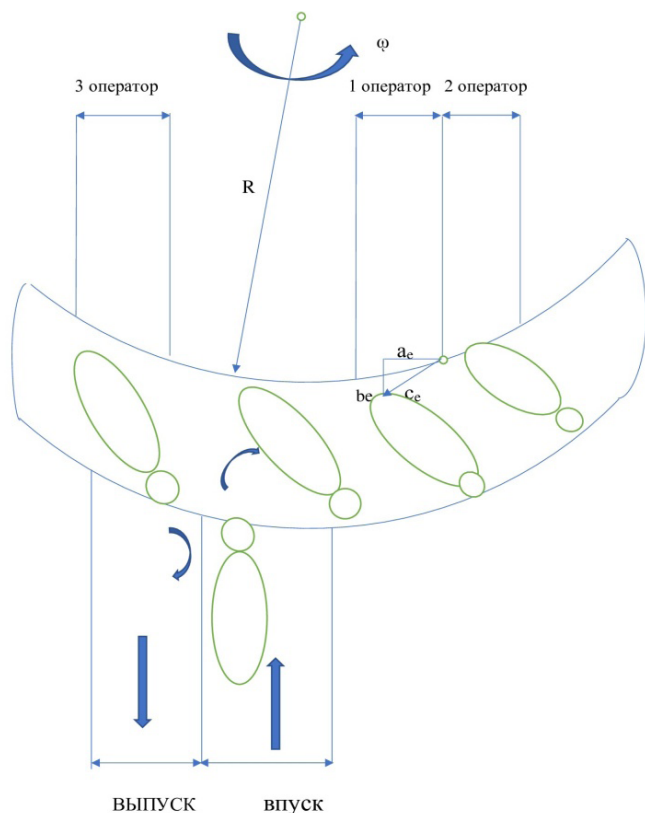


Рис. 1. Доильная установка «Карусель». Схема расположения коров по типу «Ёлочка» с внутренним доением

Fig. 1. Milking plant “Carousel”. The cow layout pattern according to the “Herringbone” type with internal milking

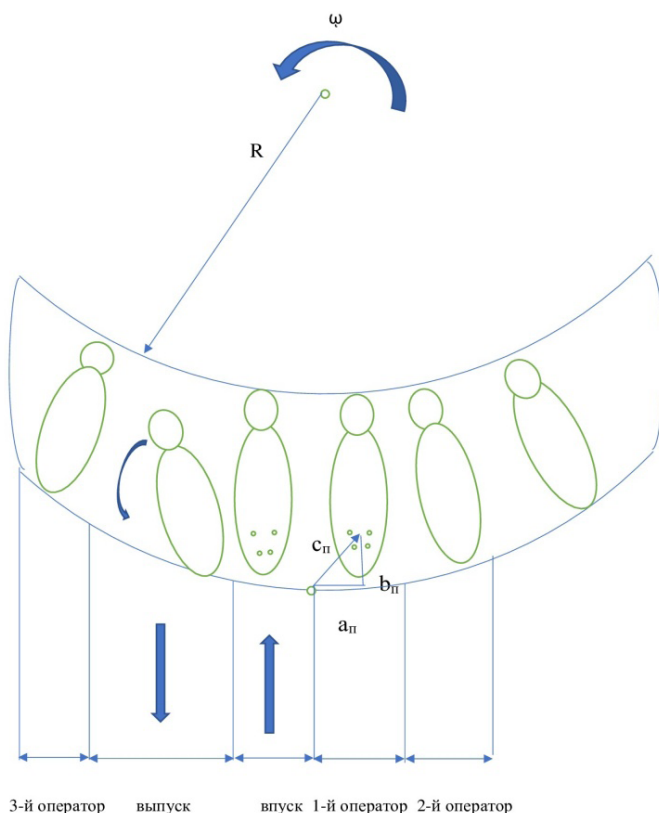


Рис. 2. Доильная установка «Карусель». Схема расположения коров по типу «Параллель» с внешним доением

Fig. 2. Milking plant “Carousel”. The cow layout pattern according to the “Parallel” type with external milking

$A_{\text{дс}}$ можно определить в соответствии с рекомендациями [1]:

$$\begin{aligned} A_{\text{п}}^e &= m_{\text{да}} \cdot g \cdot S_e; \\ A_{\text{п}}^n &= m_{\text{да}} \cdot g \cdot S_n; \\ A_{\text{дс}} &= 4 \cdot m_{\text{дс}} \cdot g \cdot h, \end{aligned} \quad (3)$$

где $A_{\text{п}}^e$, $A_{\text{п}}^n$ – соответственно механические работы, совершаемые оператором по перемещению подвесной части доильного аппарата на роторно-конвейерных доильных установках с расположением коров по типу «Ёлочка» с внутренним доением, по типу «Параллель» – с внешним доением; S_e , S_n – соответственно пути перемещения оператором доильных аппаратов к вымени животного на роторно-конвейерных доильных установках с расположением коров по типам «Ёлочка» и «Параллель»; $m_{\text{да}}$, $m_{\text{дс}}$ – соответственно массы подвесной части доильного аппарата (2,6 кг) и доильного стакана (0,5 кг); g – ускорение свободного падения 9,8 м/с²; h – величина вертикального перемещения доильных стаканов при их подключении к соскам вымени коровы (для всех установок можно принять одинаковой $h \approx 0,2$ м).

Для всех установок работа по подключению доильных стаканов $A_{\text{дс}}$ будет иметь одинаковое значение.

Величины S_e и S_n можно определить в соответствии со схемами на рисунках 1 и 2 как гипотенузы прямоугольных треугольников:

$$\begin{aligned} S_e^2 &= a_e^2 + b_e^2; \\ S_n^2 &= a_n^2 + b_n^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где a_e , a_n – соответственно расстояния от точки подвеса доильного аппарата до проекции центра вымени на горизонтальную ось в установках с внутренним и внешним доением, м; b_e , b_n – соответственно расстояния от точки подвеса доильного аппарата до проекции центра вымени на вертикальную ось в установках с внутренним и внешним доением, м.

В расчетах можно принять средние значения этих параметров: $a_e = 0,85$ м; $a_n = 0,4$ м; $b_e = 0,3$ м; $b_n = 0,3$ м. Тогда в соответствии с выражением (4) $S_e = 0,9$ м; $S_n = 0,5$ м. Подставив данные значения в выражение (3), получим:

$$\begin{aligned} A_{\text{п}}^e &= m_{\text{да}} \cdot g \cdot S_e = 22,9 \text{ Дж}; \\ A_{\text{п}}^n &= m_{\text{да}} \cdot g \cdot S_n = 12,7 \text{ Дж}; \\ A_{\text{дс}} &= 4 \cdot m_{\text{дс}} \cdot g \cdot h = 3,92 \text{ Дж}. \end{aligned} \quad (5)$$

При работе на разных типах установок «Карусель» с внутренним по типу «Ёлочка» и внешним доением по типу «Параллель» могут работать операторы в различном количестве (чаще всего 2 или 3). Например, возможны следующие варианты выполняемых работ:

первым оператором производится обработка сосков перед доением ($A_{\text{ос}}$); вторым оператором – перемещение ($A_{\text{п}}$), удерживание доильного аппарата ($A_{\text{уд}}$) и подключение доильных стаканов ($A_{\text{дс}}$); третьим оператором – обработка сосков после доения, примерно равная работе первого оператора $A_{\text{ос}}$. Если работают двое, то ими выполняются функции первого и второго операторов, а работа третьего оператора не выполняется (не производится обработка сосков после доения).

В соответствии с рекомендациями [1] в расчетах с небольшим допущением можно принять равенство работ по удерживанию подвесной части и подключению доильных стаканов ($A_{\text{уд}} = A_{\text{дс}}$), обтиранию сосков и подключению доильных стаканов ($A_{\text{ос}} = A_{\text{дс}}$). Обработка сосков после доения соответствует 0,5 $A_{\text{ос}}$. Тогда суммарная работа оператора с учетом принятых допущений по обслуживанию одной коровы выглядит следующим образом:

$$A_{\Sigma} = A_{\text{ос}} + A_{\text{п}} + A_{\text{уд}} + A_{\text{дс}} + 0,5 A_{\text{ос}} = A_{\text{п}} + 3,5 A_{\text{дс}}. \quad (6)$$

Анализ структуры энергозатрат операторов машинного доения на доильных установках «Карусель» в расчете на 1 корову показывает существенное превышение суммарной работы оператора на «Карусели» с внутренним доением по типу «Ёлочка» (36,62 Дж) в сравнении с аналогичным показателем на установке с внешним доением по типу «Параллель» (26,42 Дж). Расхождение обусловлено большей составляющей по перемещению доильного аппарата – соответственно 22,9 против 12,7 Дж. Снизить данный показатель можно с применением сервисной руки, поддерживающей подвесную часть доильного аппарата при ее перемещении и подключении к вымени коровы.

Неравномерность нагрузки операторов в расчете на 1 корову является также весьма существенной и составляет соответственно при работе троих операторов 3,92; 30,74; 1,96 Дж на «Карусели» с внутренним доением по типу «Ёлочка» и 3,92; 20,54; 1,96 Дж – на «Карусели» с внешним доением типа «Параллель». Выровнять данную нагрузку можно за счет ротации рабочих мест операторов по схеме «1-2-3» (первый оператор идет на место второго, второй – на место третьего и т.д.), которая должна происходить каждые 30% времени рабочей смены. При работе с двумя операторами их нагрузка на «Карусели» с внутренним доением («Ёлочка») составляет 34,66 Дж, с внешним доением – 24,46 Дж. При этом работа третьего оператора по обработке сосков после доения не выполняется, что может негативно отразиться на здоровье животных, или в таком случае требуется установка работа-спрея.

В соответствии с рекомендациями [1] можно определить часовую и сменную энергоемкость труда

каждого из операторов. С разбивкой по трем операторам запишем:

$$\begin{cases} \mathcal{E}_{\text{ч1}} = A_{\text{оп1}} \cdot Q_{\text{ч}}; \\ \mathcal{E}_{\text{ч2}} = A_{\text{оп2}} \cdot Q_{\text{ч}}; \\ \mathcal{E}_{\text{ч3}} = A_{\text{оп3}} \cdot Q_{\text{ч}}; \\ \mathcal{E}_{\text{см1}} = A_{\text{оп1}} \cdot Q_{\text{ч}} \cdot T_{\text{см}} \cdot K_{\text{см}}; \\ \mathcal{E}_{\text{см2}} = A_{\text{оп2}} \cdot Q_{\text{ч}} \cdot T_{\text{см}} \cdot K_{\text{см}}; \\ \mathcal{E}_{\text{см3}} = A_{\text{оп3}} \cdot Q_{\text{ч}} \cdot T_{\text{см}} \cdot K_{\text{см}}, \end{cases} \quad (7)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ч1}}, \mathcal{E}_{\text{ч2}}, \mathcal{E}_{\text{ч3}}, \mathcal{E}_{\text{см1}}, \mathcal{E}_{\text{см2}}, \mathcal{E}_{\text{см3}}$ – соответственно часовые и сменные энергоёмкости труда операторов

машинного доения; $Q_{\text{ч}}$ – часовая производительность соответствующей доильной установки; $T_{\text{см}}, K_{\text{см}}$ – соответственно продолжительность (8 ч) и коэффициент использования времени смены (0,85...0,9).

При вычислении по формулам (7) из таблицы 2 следует выбирать соответствующие значения работ, выполняемых операторами. При этом каждое животное последовательно обслуживается первым, вторым и третьим операторами.

С разбивкой по двум операторам работа третьего оператора по заключительной обработке сосков не выполняется, а нагрузка между операторами

Таблица 2

Структура энергозатрат операторов машинного доения на доильных установках «Карусель» в расчете на 1 корову

Table 2

Energy consumption structure of milking machine operators at “Carousel” milking plant per cow

Наименование показателей <i>Indicators</i>	Обозначение <i>Designation</i>	Энергозатраты оператора машинного доения, Дж <i>Energy consumption of milking machine operator, J</i>	
		Карусель с внутренним доением по типу «Ёлочка» “Carousel” plant with internal milking of the “Herringbone” type	Карусель с внешним доением по типу «Параллель» “Carousel” plant with external milking of the “Parallel” type
Работа по обработке сосков перед доением <i>Teat treatment before milking</i>	A_{oc}	3,92	3,92
Работа по перемещению доильного аппарата к вымени <i>Moving the milking machine to the udder</i>	$A_{\text{п}}^{\text{e}}$	22,9	-
	$A_{\text{п}}^{\text{II}}$	-	12,7
Работа по удерживанию доильного аппарата <i>Holding the milking machine</i>	$A_{\text{уд}}$	3,92	3,92
Работа по подключению доильных стаканов <i>Connecting teat cups</i>	$A_{\text{дс}}$	3,92	3,92
Работа по обработке сосков после доения <i>Teat care after milking</i>	$0,5A_{\text{oc}}$	1,96	1,96
Суммарная работа оператора в расчете на 1 корову <i>Total workload of the operator per cow</i>	A_{Σ}^{e}	36,62	-
	A_{Σ}^{II}	-	26,42
С учетом разбивки по 3 операторам / <i>Taking into account the teamwork of three operators</i>			
Работа первого оператора по обработке сосков перед доением <i>Workload of the Operator 1 to treat teats before milking</i>	A_{oc}	3,92	3,92
Работа второго оператора по перемещению, удерживанию и подключению доильных стаканов <i>Workload of the Operator 2 to move, hold and connect teat cups</i>	$(A_{\text{п}}^{\text{e}} + 2A_{\text{дс}})$	30,74	-
	$(A_{\text{п}}^{\text{II}} + 2A_{\text{дс}})$	-	20,54
Работа третьего оператора по обработке сосков после доения <i>Workload of the Operator 3 to treat teats after milking</i>	$0,5A_{\text{oc}}$	1,96	1,96
С учетом разбивки по 2 операторам / <i>Taking into account the teamwork of two operators</i>			
Работа первого оператора по обработке сосков перед доением, перемещению, удерживанию и подключению доильных стаканов <i>Workload of the Operator 1 to treat teats before milking, moving, holding and connecting teat cups</i>	$(A_{\text{п}}^{\text{e}} + 3A_{\text{дс}})$	34,66	-
	$(A_{\text{п}}^{\text{II}} + 3A_{\text{дс}})$	-	24,46
Работа второго оператора по обработке сосков перед доением, перемещению, удерживанию и подключению доильных стаканов <i>Workload of the Operator 2 to treat teats before milking, moving, holding and connecting teat cups</i>	$(A_{\text{п}}^{\text{e}} + 3A_{\text{дс}})$	34,66	-
	$(A_{\text{п}}^{\text{II}} + 3A_{\text{дс}})$	-	24,46

делится пополам, поэтому в формулах (7) вместо $Q_{\text{ч}}$ нужно использовать $Q_{\text{ч}}/2$. С учетом этого получим:

$$\begin{cases} \mathcal{E}_{\text{ч1}} = A_{\text{оп1}} \cdot Q_{\text{ч}} / 2; \\ \mathcal{E}_{\text{ч2}} = A_{\text{оп2}} \cdot Q_{\text{ч}} / 2; \\ \mathcal{E}_{\text{см1}} = A_{\text{оп1}} \cdot Q_{\text{ч}} / 2 \cdot T_{\text{см}} \cdot K_{\text{см}}; \\ \mathcal{E}_{\text{см2}} = A_{\text{оп2}} \cdot Q_{\text{ч}} / 2 \cdot T_{\text{см}} \cdot K_{\text{см}}. \end{cases} \quad (8)$$

Расчетные значения часовой и сменной энергоёмкости труда каждого из операторов, допустимые

российскими стандартами⁶⁻⁸, представлены в таблице 3, нормы физической нагрузки на человека сведены в таблицу 4.

Согласно расчетным данным (табл. 3) физическая нагрузка операторов за рабочую смену существенно варьирует. При работе 3 операторов на «Карусели» с внутренним доением («Ёлочка») у третьего оператора энергозатраты составляют до 1921 Дж, у второго оператора – до 37807 Дж;

Таблица 3

Часовая и сменная энергоёмкость труда операторов машинного доения на доильных установках «Карусель»

Table 3

Hourly and shift energy intensity of labor of milking machine operators at “Carousel” milking plants

Наименование показателей <i>Indicators</i>	Расчетные формулы, Дж <i>Calculation formulas, J</i>	Энергозатраты оператора, Дж <i>Energy consumption of the operator, J</i>			
		Карусель с внутренним доением по типу «Ёлочка», Q _ч = 100...140 гол/ч* “Carousel” with internal milking of the “Herringbone” type, Q _h = 100 to 140 head/h*		Карусель с внешним доением по типу «Параллель» Q _ч = 140...300 гол/ч* “Carousel” with external milking of the “Parallel” type Q _h = 140 to 300 head/h*	
		За 1 ч <i>Per one hour</i>	За 1 смену <i>Per one shift</i>	За 1 ч <i>Per one our</i>	За 1 смену <i>Per one shift</i>
		При работе 3 операторов / <i>For a team of three operators</i>			
Работа первого оператора по обработке сосков перед доением <i>Workload of the Operator 1 teat before milking</i>	A _{ос} · Q _ч	392...549	-	549...1176	-
	A _{ос} · Q _ч · T _{см} K _{см}	-	2744...3843	-	3843...8232
Работа второго оператора по перемещению, удержанию и подключению доильных стаканов <i>Workload of the Operator 2 to move, hold and connect teat cups</i>	(A _п ^е + 2A _{дс}) · Q _ч	3858...5401	-	-	-
	(A _п ^е + 2A _{дс}) Q _ч T _{см} K _{см}		27006...37807	-	-
	(A _п ^н + 2A _{дс}) Q _ч	-	-	2876...6162	-
	(A _п ^н + 2A _{дс}) Q _ч T _{см} K _{см}	-	-	-	20132...43134
Работа третьего оператора по обработке сосков после доения <i>Work of the Operator 3 to treat teats after milking</i>	0,5A _{ос} Q _ч	196...274	-	274...588	-
	0,5A _{ос} Q _ч T _{см} K _{см}	-	1372...1921	-	1918...4116
При работе 2 операторов / <i>For a team of three operators</i>					
Работа первого оператора по обработке сосков перед доением, перемещению, удержанию и подключению доильных стаканов <i>Workload of the Operator 1 to prepare teats before milking, moving, holding and connecting teat cups</i>	(A _п ^е + 3A _{дс}) · Q _ч	1733...2426	-	-	-
	(A _п ^е + 3A _{дс}) · Q _ч T _{см} K _{см}	-	12131...16982	-	-
	(A _п ^н + 3A _{дс}) · Q _ч	-	-	1712...3669	-
	(A _п ^н + 3A _{дс}) · Q _ч T _{см} K _{см}	-	-	-	11984...25683
Работа второго оператора по обработке сосков перед доением, перемещению, удержанию и подключению доильных стаканов <i>Workload of the Operator 2 to treat teats before milking, moving, holding and connecting teat cups</i>	(A _п ^е + 3A _{дс}) · Q _ч	1733...2426	-	-	-
	(A _п ^е + 3A _{дс}) · Q _ч T _{см} K _{см}	-	12131...16982	-	-
	(A _п ^н + 3A _{дс}) · Q _ч	-	-	1712...3669	-
	(A _п ^н + 3A _{дс}) · Q _ч T _{см} K _{см}	-	-	-	11984...25683

* Значения производительности $Q_{\text{ч}}$ приняты в соответствии с рекомендациями [1] для основных типов доильных установок «Карусель» с внутренним и внешним доением (Milkline, AutoRotor 40, AutoRotor 60 и др.).

* Performance values Q_{h} are taken in accordance with the recommendations [1] for the main types of “Carousel” milking plants with internal and external milking (Milkline, AutoRotor 40, AutoRotor 60, etc.).

⁶ Р.2.2.2006-05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда: утв. и введен в действие Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации Г.Г. Онищенко 29 июля 2005 г. // Бюллетень нормативной и методической документации Госсанэпиднадзора. 2005. № 21.

⁷ Об утверждении Методики проведения специальной оценки условий труда, классификатора вредных и (или) опасных производственных факторов, формы отчета о проведении специальной оценки условий труда и инструкции по ее заполнению: Утверждена и введена в действие приказом Министра труда и социальной защиты Российской Федерации от 24 января 2014 г. № 33. М.: Стандартинформ, 2014.

⁸ СанПиН 2.2.0.555-96. Гигиенические требования к условиям труда женщин: утверждены и введены в действие Постановлением Госкомсанэпиднадзора России от 28 октября 1996 года № 32. М.: Инф.-изд. центр Госкомсанэпиднадзора России, 1997.

Таблица 4

Допустимые российскими стандартами нормы физической нагрузки на 1 человека

Table 4

Norms of physical activity allowed by Russian standards for a person

Наименование показателей <i>Indicators</i>	Нормы физической нагрузки <i>Norms of physical activity</i>	
	мужчины <i>men</i>	женщины <i>women</i>
Физическая нагрузка за рабочую смену при региональной нагрузке (с преимущественным участием мышц рук и плечевого пояса) при перемещении груза на расстояние до 1 м, Дж <i>Physical workload per shift with regional load (with the predominant participation of the muscles of the arms and shoulder girdle) when moving the load at a distance of up to 1 m, J</i>	50000	30000
Суммарная масса грузов, перемещаемых в течение каждого часа смены с рабочей поверхности, кг <i>Total mass of weights moved during each hour of the shift from the working surface, kg</i>	не более 870 <i>no more 870</i>	не более 350 <i>no more 350</i>
Стереотипные рабочие движения (при региональной нагрузке с преимущественным участием мышц рук и плечевого пояса), количество за смену <i>Stereotypical work movements (with regional load with predominant participation of the muscles of the arms and shoulder girdle), number per shift</i>	не более 20000 <i>no more 20000</i>	
Величина статической нагрузки за смену при удержании груза, приложении усилий (кгс·с) одной рукой <i>Value of the static workload per shift when holding the load, applying efforts (kgf·s) with one hand</i>	36000	22000
Рабочая поза – стоя не более 60% времени смены <i>Working posture – standing no more than 60% of the shift time</i>	более 60% времени смены <i>over 60% shift time</i>	

при работе 2 операторов затраты их энергии являются одинаковыми: от 12131 до 16982 Дж (без выполнения третьей операции по обработке сосков). На «Карусели» с внешним доением («Параллель») при работе 3 операторов энергозатраты третьего рабочего составляют 1918...4116 Дж, второго рабочего – до 43134 Дж. При работе 2 операторов энергозатраты составляют 11984...25683 Дж. При этом допустимый верхний предел для мужчин (не более 50000 Дж) не превышен, а для женщин (не более 30000 Дж) превышен во всех случаях у вторых операторов при максимальной производительности с внутренним доением 140 гол/ч, внешним доением – 300 гол/ч.

Число совершаемых движений за смену у первого оператора на «Карусели» с внешним доением при максимальной производительности 300 гол/ч превышает допустимую величину 20000 движений/смену [1] и составляет 20400.

Суммарная масса грузов, перемещаемых в течение каждого часа смены, превышена у мужчин (при норме не более 870 кг), и особенно – у женщин (не более 350 кг) [1], составляя 644...1380 кг на «Карусели» с внешним доением у второго оператора (при работе 3 операторов).

Выводы

1. Расхождение энергозатрат операторов машинного доения на доильных установках «Карусель»

с внутренним доением по типу «Ёлочка» и с внешним доением по типу «Параллель» (соответственно 36,62 и 26,42 Дж) обусловлено составляющей по перемещению доильного аппарата. Снизить данный показатель можно с применением сервисной руки, поддерживающей подвесную часть доильного аппарата при ее перемещении и подключении к вымени коровы.

2. Структура энергозатрат операторов машинного доения показала неравномерность нагрузки в расчете на 1 корову при работе 3 операторов: при внутреннем доении для первого оператора она составляет 3,92 Дж; для второго оператора – 30,74 Дж; для третьего оператора – 1,96 Дж. При внешнем доении эта нагрузка составляет соответственно 3,92; 20,54; 1,96 Дж. Выровнять данную нагрузку можно за счет ротации рабочих мест операторов по схеме «1-2-3», которая должна происходить каждые 30% времени рабочей смены: первый оператор идет на место второго, второй оператор – на место третьего и т.д. При работе 2 операторов их нагрузка при внутреннем доении составляет 34,66 Дж, при внешнем доении – 24,46 Дж. При этом не выполняется обработка сосков после доения, что может негативно отразиться на здоровье животных, поэтому требуется установка робота-спрея.

3. На установках с внешним доением физическая нагрузка операторов за рабочую смену является неравномерной, превышены число совершаемых движений за смену у первого оператора и суммарная масса

грузов, перемещаемых в течение каждого часа смены, а также величина сменной физической нагрузки у вторых операторов (женщин) на «Каруселях» (при обслуживании 3 операторами): соответственно с внутренним доением – до 37807 Дж, внешним доением – до 43134 Дж.

Список использованных источников

1. Цой Ю.А., Кирсанов В.В., Мамедова Р.А. Оценка эргономичности труда операторов машинного доения, работающих на установках «Карусель» // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2022. Т. 23, № 4. С. 555-561. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.4.555-561>
2. Кузнецов А.Л., Пыталев А.В. Исследование условий труда операторов машинного доения – факторы риска профессиональной заболеваемости и травматизма // Вестник сельского развития и социальной политики. 2017. № 2 (14). С. 9-13. EDN: YSEFQR.
3. Кажено О.А., Барановский М.В., Курак А.С. Особенности организации труда при машинном доении коров на доильной установке «Карусель» // Зоотехническая наука Беларуси. 2016. Т. 51, № 2. С. 164-172. EDN: WKGYZH.
4. Hayati A., Marzban A., Asoodar M.A. Ergonomic evaluation of hand and mechanized milking in dairy farms. *Journal of ergonomics*. 2015;3(3):65-75. Available from: <https://www.sid.ir/paper/103294/en>.
5. Caldas de Oliveira C., Augusto de Paula Xavier A., Ulbricht L., Moro A.R.P., Belinelli M.M. Health in the rural environment: a postural evaluation of milking workers in Brazil. *Journal Cahiers Agricultures*. 2018;27(3):35004. <https://doi.org/10.1051/cagri/2018021>
6. Довлатов И.М., Юфев Л.Ю., Кирсанов В.В., Павкин Д.Ю., Матвеев В.Ю. Автоматизированная система обеспечения микроклимата в птичниках // Вестник НГИЭИ. 2018. № 7 (86). С. 7-18. EDN: XRZDXV.
7. Игнаткин И.Ю., Кирсанов В.В. Универсальная установка обеспечения микроклимата // Вестник НГИЭИ. 2016. № 8 (63). С. 110-116. EDN: WJDATV.

Вклад авторов

М.Н. Ерохин – концептуализация;
В.В. Кирсанов – методология, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование;
Ю.Г. Иванов – ресурсы;
С.В. Кирсанов – визуализация, создание черновика рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 26.04.2023, после рецензирования и доработки 15.05.2023, принята к публикации 16.05.2023

4. Эргономичность труда операторов машинного доения на установках роторного типа «Карусель» с внешним доением характеризуется перегруженностью отдельных операторов, что необходимо учитывать при организации их работы и дальнейшей модернизации установки.

References

1. Tsoy Yu.A., Kirsanov V.V., Mamedova R.A. Evaluation of labor ergonomics of milking machine operators working at milking units “Carousel”. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2022;23(4):555-561. (In Rus.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.4.555-561>
2. Kuznetsov A.L., Pytalev A.V. Study of working conditions of milking machine operators – risk factors for occupational morbidity and injury. *Vestnik selskogo razvitiya i sotsialnoy politiki*. 2017;2(14):9-13. (In Rus.)
3. Kazheko O.A., Baranovskiy M.V., Kurak A.S. Engineering peculiarities of automated milking at “rotary” milking plant. *Zootekhnicheskaya nauka Belarusi*. 2016;51(2):164-172. (In Rus.)
4. Hayati A., Marzban A., Asoodar M.A. Ergonomic evaluation of hand and mechanized milking in dairy farms. *Journal of ergonomics*. 2015;3(3):65-75. URL: <https://www.sid.ir/paper/103294/en>.
5. Caldas de Oliveira C., Augusto de Paula Xavier A., Ulbricht L., Moro A.R.P., Belinelli M.M. Health in the rural environment: a postural evaluation of milking workers in Brazil. *Journal Cahiers Agricultures*. 2018;27(3):35004. <https://doi.org/10.1051/cagri/2018021>
6. Dovlatov I.M., Yuferev L.Yu., Kirsanov V.V., Palkin D.Yu., Matveev V.Yu. Automated system of provision of the microclimate in poultry houses. *Bulletin NGIEI*. 2018;7(86):7-18. (In Rus.)
7. Ignatkin I.Yu., Kirsanov V.V. Universal installation for indoor climate control. *Bulletin NGIEI*. 2016;7(86):7-18. (In Rus.)

Contribution of the authors

M.N. Erokhin – conceptualization;
V.V. Kirsanov – methodology, revision and editing of the final manuscript;
Y.G. Ivanov – resources;
S.V. Kirsanov – visualisation, manuscript drafting.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 26.04.2023; revised 15.05.2023; accepted 16.05.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-14-25

**Технология цифровых двойников в сельском хозяйстве: перспективы применения**

Дорохов Алексей Семенович, академик РАН, д-р техн. наук, главный научный сотрудник
dorokhov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>

Павкин Дмитрий Юрьевич, канд. техн. наук, заведующий лабораторией
dimqaqa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8769-8365>

Юрочка Сергей Сергеевич[✉], канд. техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией
yurochkasr@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-2511-7526>

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Аннотация. Технология цифровых двойников (ЦД) пока недостаточно распространена в сельском хозяйстве. Внедрение адекватной модели цифрового двойника позволит сократить издержки при разработке, внедрении и обслуживании сельскохозяйственной техники. Основной проблемой при разработке цифровых двойников в сельском хозяйстве является высокая потребность проекта в ресурсах: от этапа создания лабораторного прототипа до пилотных и полевых испытаний прототипов сельскохозяйственных объектов. С целью сокращения затрат ресурсов при производстве образцов от идеи до серии и при дальнейшем их использовании в течение всего срока службы авторами предложена технология виртуального полигона с созданием цифровых образцов сельскохозяйственных машин (оборудования/деталей) для проведения виртуальных испытаний. Цифровые двойники в сельском хозяйстве разрабатываются с учетом обмена информации между цифровым двойником и физическим объектом. Таким образом, обеспечивается адекватность цифрового двойника в режиме реального времени изменения параметров цифрового двойника и достигается максимальное соответствие физического объекта цифровой копии. Применяя сформированные большие данные и искусственный интеллект, можно разрабатывать системы, которые в зависимости от изменения параметров физического и цифрового объекта автоматически изменяют параметры функционирования узлов/деталей/машин, что позволяет добиться наибольшей их эффективности. На примере животноводческой фермы и роботизированного доения рассмотрены возможные способы применения технологии ЦД. Предложен способ внедрения метода взаимодействия цифрового двойника с физическим объектом в лабораторные и натурные испытания. Разработанная технология цифровых двойников позволяет оставлять цифровую тень, иметь двухстороннюю связь между ЦД и испытываемым физическим объектом. Представленная концепция виртуального полигона дает возможность проводить виртуальные испытания сельскохозяйственных машин, изделий, технологий и систем.

Ключевые слова: технология цифровых двойников, цифровые двойники, сельское хозяйство, концепция виртуального полигона

Формат цитирования: Дорохов А.С., Павкин Д.Ю., Юрочка С.С. Технология цифровых двойников в сельском хозяйстве: перспективы применения // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 14-25. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-14-25>.

© Дорохов А.С., Павкин Д.Ю., Юрочка С.С., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Digital twin technology in agriculture: prospects for use

Aleksei S. Dorokhov, RAS Corresponding Member, DSc (Eng)

dorokhov.vim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>; Researcher ID: H-4089-2018

Dmitry Yu. Pavkin, PhD (Eng), Head of Laboratory

dimqaqa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8769-8365>

Sergey S. Yurochka[✉], Junior Research Engineer¹

yurochkasr@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-2511-7526>

Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5, 1st Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract. The technology of digital twins (DT) is still insufficiently widespread in agriculture. The introduction of an adequate digital twin model will reduce costs in the development, implementation and maintenance of agricultural machinery. The main problem in the development of digital twins in agriculture is the high need for resources: from

the stage of designing a laboratory prototype to pilot and field testing of agricultural object prototypes. To reduce the cost of resources in the production of samples from an idea to a series and their further use throughout the entire service life, the authors proposed a technology of a virtual test site for testing digital samples of agricultural machines (equipment/parts). Digital twins used in agriculture are developed taking into account the exchange of information between the digital twin and the physical object. Thus, the adequacy of the digital twin is ensured in the real-time mode of changing its parameters. This feature helps achieve maximum correspondence of the physical object of the digital copy. Using the generated big data and artificial intelligence, it is possible to develop systems that, depending on changes in the parameters of a physical and digital object, automatically change the functioning parameters of units / parts / machines to reach their greatest efficiency. Using the example of a livestock farm and robotic milking, the authors consider possible ways of using the DT technology. The article proposes the introduction of a method of interaction between a digital twin and a physical object in laboratory and field tests. The developed technology of digital twins projects a digital shadow and ensures a two-way connection between the digital center and the physical object being tested. The presented concept of the virtual test site is promising for conducting virtual tests of agricultural machines, products, technologies, and systems.

Keywords: digital twin technology, digital twins, agriculture, virtual polygon concept

For citation: Dorokhov A.S., Pavkin D.Yu., Yurochka S.S. Digital twin technology in agriculture: prospects for use. Agricultural Engineering (Moscow), 2023;25(4):14-25. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-14-25>.

Введение. Технология цифровых двойников (ЦД) в мировой практике появилась в 60-е гг. XX в. Впервые технология применена в виде модификации высокоточных симуляторов для космонавтов НАСА. Технология цифровых двойников в сельскохозяйственной отрасли развивалась в 4 этапа (рис. 1).

В период 1960-2002 гг. цифровые двойники являлись односторонними и малоинформативными, а их адекватность была далекой от физического образца.

Технология ЦД формировалась в качестве технологических предпосылок. Например, в 1994 г. зарубежными компаниями были разработаны первые доильные роботы с системами технического зрения, физиологическая реализация роботов на тот момент была еще не готова для повсеместного внедрения, не было связи физического образца с цифровым двойником¹. Создаваемые трехмерные модели устройств, технологических линий увеличивали качество выпускаемых

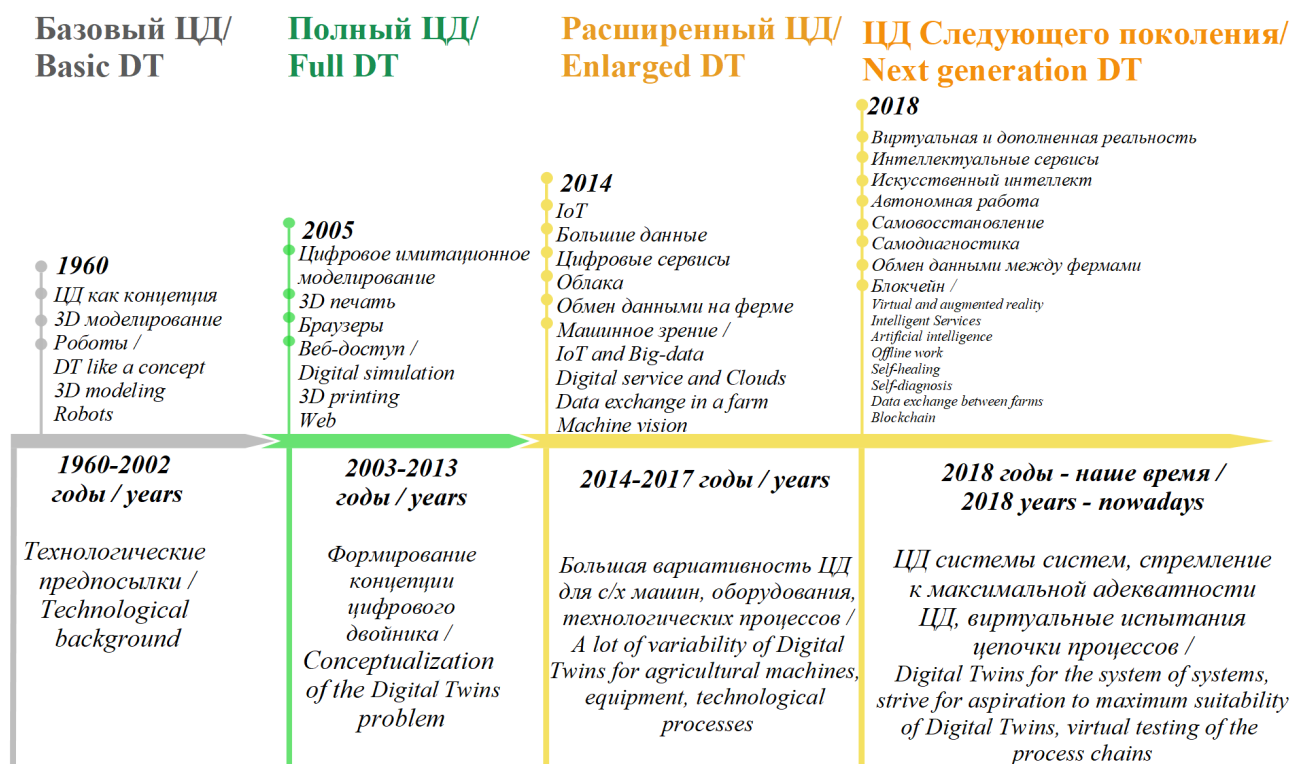


Рис. 1. Концепция цифровых двойников в сельском хозяйстве. Этапы развития

Fig. 1. Key events and stages in the conceptualization of the use of digital twins in agriculture¹

¹ История развития Нидерландской компании Lely. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.lely.com/about-lely/our-company/history/> (дата обращения: 17.11.2022).

чертежей² [1]. Цифровым двойником являлись разработанные двумерные и трехмерные модели в инженерном программном обеспечении, например, в Autocad, без привязки спроектированных деталей к поставщикам, без доработки моделей с учетом производственных издержек (цифровой двойник идеальный, без отображения погрешностей, реальный образец имеет погрешности и недостатки) и т.д.

На втором этапе развития технологии, начиная с 2003 г., увеличивается интерес к цифровым двойникам. Для разработки сельскохозяйственной техники и устройств применяются цифровое имитационное моделирование, технология 3D-печати и программное обеспечение в web-среде, что повышает эффективность процессов проектирования и снижает количество ресурсов, затрачиваемых на выпуск предсерийных образцов. При этом итоговая продукция получается более высокого качества, сокращаются издержки производства и издержки при выполнении технологических процессов³ [2-7]. В этот период разрабатываются доильные роботы второго поколения, усовершенствуются вакуумные системы, системы обнаружения областей интереса (детекция вымени), производится имитационное моделирование не только рабочих узлов (например, манипулятора), но и движения по магистралям жидкостей (молоко, промывочная жидкость, вакуум). Производится моделирование механического воздействия коров на стойло доильных роботов, результаты моделирования сравниваются с опытными данными, по результатам которых производится усиление конструктивных элементов. К цифровому двойнику добавляется информация, отображающая производство и жизненный цикл продукта (PML) в производственном секторе. Постепенно цифровая модель наполняется информацией, позволяющей сблизить модель с реальным объектом.

Третий этап развития технологии ЦД происходил в период 2014-2018 гг. В 2014 г. появляется большое количество цифровых продуктов и решений⁴ [8-11]. Физическая реализация создаваемой машины/изделия имеет обратную связь с цифровым двойником, где информация от одного устройства передается другому. Цифровой двойник имеет еще больше необходимой

информации для его производства [12-15], адекватность и соответствие цифрового двойника с физической моделью выше. Собираются и передаются в облака и цифровые сервисы адекватные данные по интересующим объектам/процессам. Повышается качество машинного зрения⁵ [16]. В доильное оборудование для животноводческих ферм внедряется двух- и трехуровневое программное обеспечение, что позволяет обмениваться данными между машинами и устройствами. Например, доильный робот запрашивает данные по коровам, которые поступают из сортировочных ворот, или данные с метеостанции поступают на внутренний контроллер, который анализирует предыдущий опыт, текущую ситуацию и изменяет режимы работы исполнительных механизмов. Системы собирают данные по животным и ищут взаимосвязи: например, между жирностью молока и его количеством, скоростью молокоотдачи, удоем и уровнем кормления и т.д.

С 2018 г. по настоящее время при проектировании и создании цифровых двойников используются технологии VR и AR⁶ [17-20]. Искусственный интеллект точно обрабатывает накопленные данные, системы имеют функцию самодиагностики и самовосстановления. Например, при оповещении «Система встала в ошибку» цифровые двойники ферм обмениваются друг с другом накопленными данными, на основании которых принимают решение об изменении режимов работы систем микроклимата [21-23]. Технология блокчейн применяется в сельском хозяйстве для отслеживания происхождения молочной и мясной продукции [24-28]. Технология цифровых двойников способна существенно увеличить качество реализации физиологических образцов и выполнения процессов. Однако в сельскохозяйственной отрасли при изготовлении образцов от идеи до запуска мелкой серии существует ряд проблем.

Нами выявлены малая финансовая привлекательность и поддержка (со стороны государства, университетов, частных инвесторов) проектов, находящихся на стадии 4-7 уровней готовности технологии и уровней готовности производства, по сравнению с проектом, находящимся на 1-3 или 8-9 уровнях (рис. 2).

² Krouse J.K. What every engineer should know about computer-aided design and computer-aided manufacturing: the CAD/CAM revolution. CRC Press, 1982. 160 p.; Beasley D.B. CAD/CAM: directions and applications in agricultural engineering. 1982; Kassisieh N.M. The first phase of CAD/CAM implementation: a plan for small engineering companies: California State University, Northridge, 1987; De Gregori T.R. et al. Agriculture and modern technology. Iowa State University Press, 2001.

³ Li D., Zhao C. Computer and Computing Technologies in Agriculture III. Springer, 2010.

⁴ De Wilde S. The future of technology in agriculture. The Hague: Stichting Toekomstbeeld der Techniek. 2016. 118 p.

⁵ Дорохов А.С. Компьютерное зрение как инструмент системы управления технологическими процессами // Система технологий и машин для инновационного развития АПК России: Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 145-летию со дня рождения основоположника земледельческой механики В.П. Горячкина. 2013. Ч. 2. С. 355-357.

⁶ Паршуков Д.В. Применение технологий дополненной и виртуальной реальности в подготовке кадров сельского хозяйства // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития: Материалы Международной научно-практической конференции. Ч. I. Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2019. С. 141-143. EDN: DOGVHT.

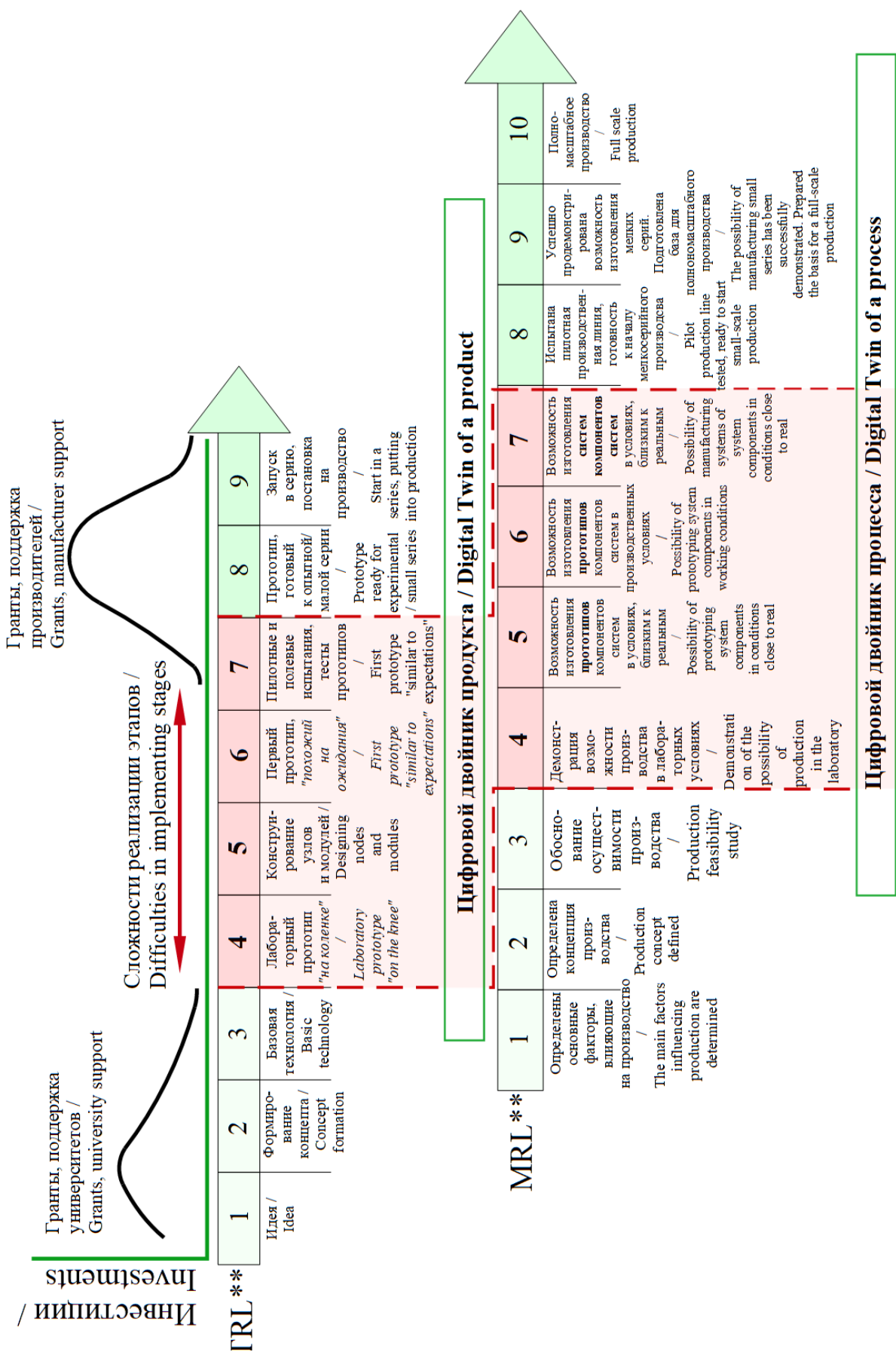


Рис. 2. Сложности внедрения цифрового двойника на рынок от идеи до серии:
TRL – уровень готовности технологии; MRL – уровень готовности производства

Fig. 2. Problems of stages and lack of investment to introduce the product to the market from idea to series:
TRL – technology readiness level; MRL – manufacturing readiness level

Это связано с тем, что при поддержке проектов на уровнях 1-3 проект не требует больших инвестиционных вложений для проверки работоспособности идеи. Поддержка идей и формирование базовых технологий осуществляются фондами: РНФ, ФСИ, Гранты Президента РФ и пр.

Продукт, находящийся на уровнях 8-9, как правило, имеет уже доработанный предсерийный образец, который был произведен на испытанной пилотной, готовой к реализации производственной линии. За предсерийным образцом и технологической линией стоит сформированная команда с определенным набором компетенций. Рынок подтвержден и готов к принятию продукта, уровень рисков является низким.

Продукт, находящийся на уровнях 4-7, является самым непредсказуемым. Зачастую производится только формирование рабочего коллектива, разработчики не могут на 100% оправдать ожидания инвесторов, так как разрабатываемый продукт не был изготовлен и испытан. Не понимая его конкретных характеристик и его пользы на производстве, рынок не может принять разрабатываемый продукт.

Ситуация усугубляется отсутствием повсеместно распространенных машиноиспытательных станций, готовых принять современное инновационное оборудование, поэтому испытания производятся только в лояльных к разработчикам фермах и хозяйствах, где имеются свои издержки и ограничения. Отсутствует персонализированное изготовление изделий/машин/оборудования на заводах.

Преодолеть существующие проблемы можно внедрением в процесс разработки объекта технологии ЦД и дальнейшем сопровождении объекта на этапе всего срока службы и использования.

Цель исследований: разработать технологию мультидисциплинарного кросс-компьютерного инжиниринга (виртуального полигона) с созданием цифровых образцов сельскохозяйственных машин, оборудования, их деталей для проведения виртуальных испытаний с целью сокращения затрат ресурсов при производстве образцов от идеи до серии и дальнейшего сопровождения их на всем сроке службы и использования.

Для достижения поставленной цели поставлены задачи:

- разработать концепцию ЦД сельскохозяйственных объектов и процессов, включающих в себя все современные доступные технологии;
- разработать метод взаимодействия цифрового двойника с физическим объектом, позволяющий оставлять цифровую тень, иметь двухстороннюю связь между ЦД и испытываемым физическим объектом;

– описать концепцию виртуального полигона, дающего возможность проводить виртуальные испытания сельскохозяйственных машин, изделий, технологий, систем.

Материалы и методы. Для решения поставленных задач по применению технологии ЦД в сельском хозяйстве и внедрению технологии ЦД в процесс реализации разработок от идеи до серии проведен анализ зарубежных источников по данной проблеме.

При разработке ЦД, виртуального полигона использовалось имитационное моделирование. При моделировании применялась программа SolidWorks 2022, программный пакет Flow Simulation.

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим возможность применения в сельском хозяйстве технологии ЦД, взаимодействующей с физическими системами, внедряемой при производстве инновационного оборудования в соответствии со схемой, представленной на рисунке 3.

При цифровом моделировании изделий или технологий важно добиться адекватности цифровой модели. Сегодня подход к моделированию может осуществляться путем создания 3D-модели изделия, по которой в дальнейшем могут быть изготовлены и переданы на производство 2D-чертежи, и система после получит физическую реализацию со всеми недостатками, или путем наполнения и описания разрабатываемой цифровой модели с учетом технологии MBD, MBE и MBSE [29-31].

MBD (Model Based Definition) – это трехмерные CAD-модели, чьи спецификации содержат описание геометрии изделий, размеры, допуски, спецификацию материалов, наборы технических данных и решений. MBE (Model-Based Enterprise) – это стратегия управления сложным современным предприятием с производственными линиями, цифровым двойником технологической линии/производства, подстроенной под реализацию изделий, с сохранением трехмерной модели в центре своих операций, и выстраиваемой в цифровом виде сопутствующие процессы закупок, управления запасами и т.д. MBSE (Model Based System Engineering) является центральной концепцией в ЦД, представляющей собой единую согласованную модель проектируемой системы, которая объединяет все данные и свойства о создаваемой системе. Это концепция формализованного применения моделирования для поддержки формирования требований к системе, поддержки проектирования, анализа, верификации и валидации системы на всех фазах ее жизненного цикла.

Виртуальные испытания в технологии ЦД позволяют создать виртуальный полигон. Например, полигон животноводческого хозяйства включает в себя поле, на котором выращивается сельскохозяйственная



Рис. 3. Концепция цифровых двойников при разработке сельскохозяйственных машин, объектов, процессов
 Fig. 3. Concept of the digital twins used for designing agricultural machines, objects, processes, including all modern available technologies

продукция, и на нём присутствуют все типы виртуальных сельскохозяйственных машин, воздействующих на растения, развивающихся в зависимости от заданных погодных условий, состава, характеристики и насыщенности почвы микро- и макроэлементами. Хозяйство включает в себя технологическую линию кормозаготовки (с машинами, оборудованием, процессами), животноводческую ферму с определенным микроклиматом, воздействующим на животных. Разработка виртуального полигона подразумевает сбор всех возможных входных и выходных воздействий, которые являются идентичными реальным производственным условиям. Это позволит поместить в виртуальный полигон, например, корову и относительно ее функции молоковыведения изучить, при прочих равных условиях, воздействие микроклимата на качество и количество получаемой продукции. Можно в виртуальный полигон поместить узел разрабатываемой машины и изучить процесс естественного выхода из строя датчиков контроля сероводорода. Компьютерное моделирование позволит найти закономерности, зависимости, установить влияние среды на техническое устройство и найти способ, который позволит продлить срок службы датчиков контроля уровня сероводорода в воздухе животноводческого помещения с двух месяцев (средняя продолжительность работы датчиков в реальных условиях) до времени целесообразного использования, оправдывающего вложенные в разработку датчика ресурсы. Еще одним примером использования

виртуального полигона может быть моделирование работы плуга во всех возможных характеристиках почвы.

Внедрение испытаний ЦД в виртуальном полигоне позволит ускорить процессы разработки предсерийных образцов, снизить количество затрачиваемых ресурсов, рассмотреть наибольшее количество возможных вариантов развития ситуаций. Достижимый эффект от использования виртуальных испытаний ЦД на виртуальных полигонах возможен только в том случае, когда программный комплекс и существующие ресурсы обеспечивают адекватность цифровой модели и ее соответствие физической среде. Несответствие ЦД физическому объекту должно быть настолько малым, что результаты виртуальных испытаний ЦД должны находиться в текущих допусках, предъявляемых к физическому образцу после проведения натурных испытаний.

Задачу внедрения в лабораторные и натурные испытания метода, позволяющего оставлять цифровую тень, иметь двухстороннюю связь между ЦД и испытываемым физическим объектом, поможет раскрыть схема, представленная на рисунке 4. Взаимосвязь и обмен данными между цифровым двойником и физическим объектом происходят постоянно с заданными режимами на протяжении всей жизни физического объекта/системы. Для примера на схеме изображены цифровой двойник и физическая реализация системы натяжения доильных стаканов в роботизированной доильной установке. После создания трехмерной

модели, изготовления чертежей, проведения имитационного моделирования и доказательства эффективности дальнейшей работы над узлом/прототипом/системой на производстве изготавливается узел. После проведения приемочных работ изготовленного узла натяжения доильных стаканов цифровая модель требует корректировок после изготовления, так как физическая модель всегда имеет отклонения и при правильном проектировании отклонения находятся в пределах допусков.

Перед испытаниями физический объект следует укомплектовать адекватным набором датчиков подходящего типа.

Все полученные данные хранятся в едином источнике информации на протяжении срока жизни физического объекта/системы. В случае выявления цифровым двойником, имеющим встроенную функцию искусственного интеллекта, наиболее оптимального решения, как по режимам работы и алгоритмам, так и по техническому решению, производится модернизация цифрового двойника и физической модели.

Вышеописанный подход позволяет сократить затрачиваемые ресурсы на изготовление опытных образцов за счет предварительной работы с цифровым двойником, рассмотреть наибольшее количество вариаций узлов/прототипов/систем, повысить качество проведения испытаний, сократить путь от идеи до серии. Недостатком данного метода является необходимость большого набора датчиков, ресурсов, а также специалистов. При внедрении метода важно соблюсти баланс между стремлением создать наиболее адекватную цифровую модель с затрачиваемыми ресурсами и сложностью физического объекта.

Разработка виртуальных полигонов позволяет сократить количество затрачиваемых ресурсов на испытания. Виртуальный полигон – это аналог стенда или реального полигона, на котором исследуются технология, машина, узел, деталь с учетом воссозданных воздействий на исследуемый объект, с которыми он столкнется при работе в качестве физического образца.

Для примера рассмотрим разработку виртуального полигона на основании реальной фермы, построенной

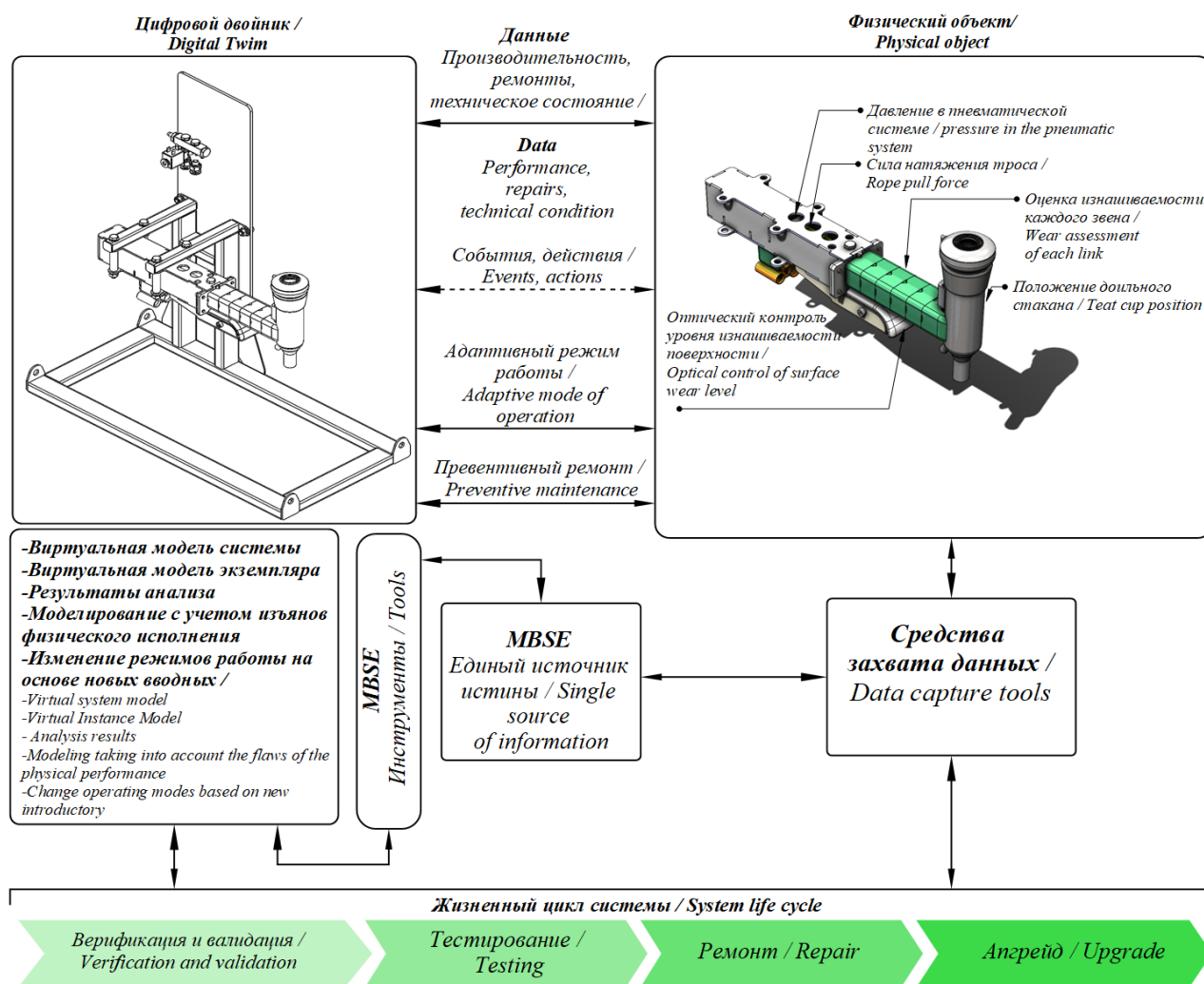


Рис. 4. Метод взаимодействия цифрового двойника и физического объекта

Fig. 4. Method of interaction between a digital twin and a physical object

по типовому проекту ОПТ 801-2-101.12.87 (фермы ФГУП «Григорьевское» в Ярославской области, имеющей проблемы с микроклиматом). Разработчики совместно с фермером принимают решение дооснастить ферму климатическими системами. По документации и в соответствии с реальным физическим объектом нами производился сбор параметров микроклимата на сертифицированные приборы в разное время года с различными сценариями погоды.

Полученные данные фиксировались в виртуальных полигонах. При базовом варианте вентиляционной системы построенного коровника внутри помещения производилось моделирование движения воздушных потоков газов (аммиак, сероводород, углекислый газ), оценивались температура, влажность, скорость движения воздуха и направление воздушных потоков (рис. 5). Адекватность виртуального полигона и цифровой модели объясняется макси-

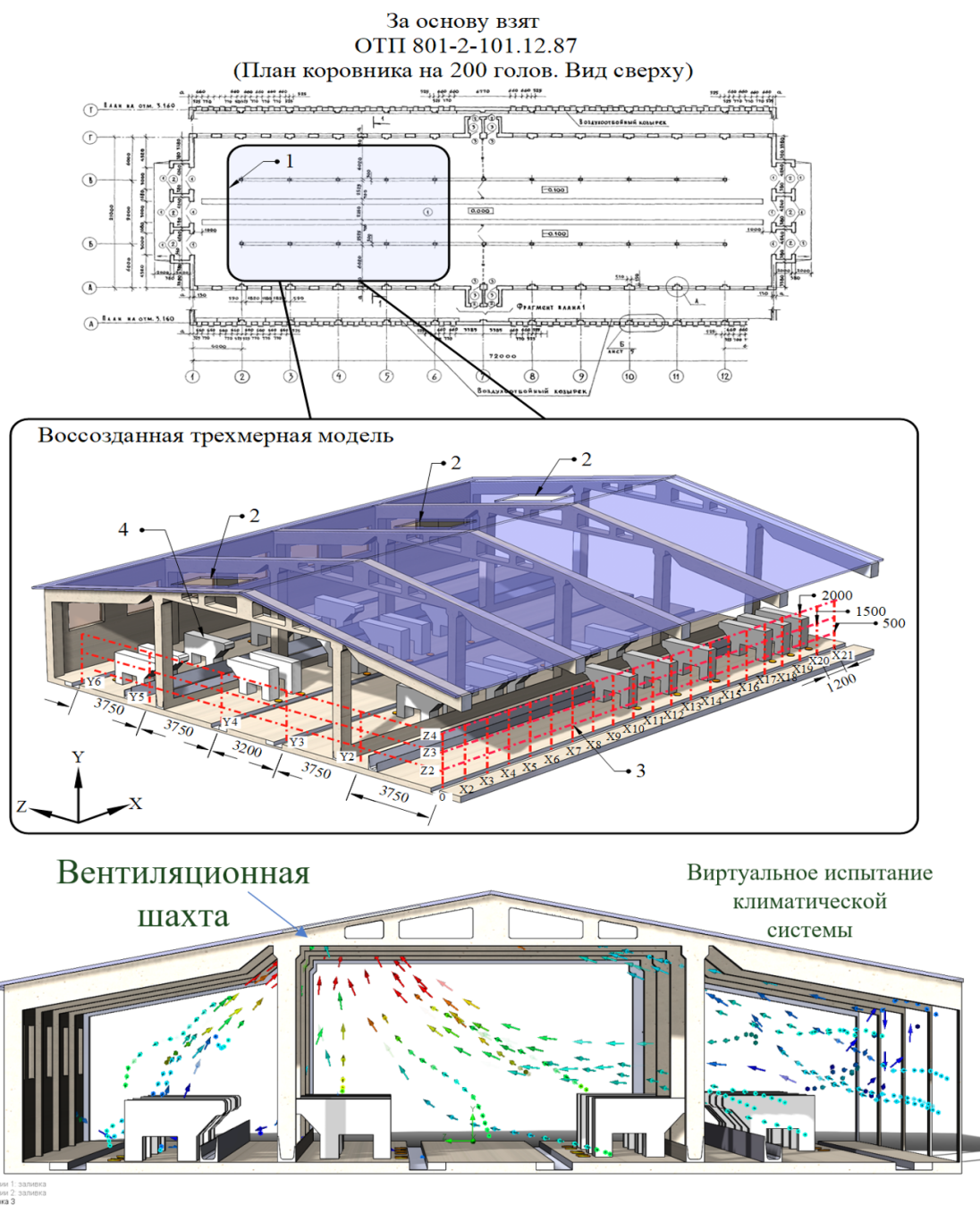


Рис. 5. Концепция виртуального полигона для виртуальных испытаний цифрового двойника климатической системы:

1 – воссозданная область виртуального полигона; 2 – вытяжка; 3 – масштабно-координатная сетка для определения граничных условий, установленных на реальном объекте; 4 – аппроксимированная трёхмерная модель коровы

Fig. 5. The concept of a virtual test site for virtual testing of the digital twin of the climate control system:

1 – recreated area of the virtual polygon; 2 – hood; 3 – scale-coordinate grid for determining the boundary conditions established on a real object; 4 – approximated three-dimensional model of a cow

мальной сходимостью цифровой модели и реального объекта.

Для проведения виртуальных испытаний на виртуальном полигоне создаётся концепт внедряемой технологии с наполнением цифровыми двойниками изделий/объектов/машин, являющихся ее составляющими. Концепт помещается в виртуальный полигон, соответствующий реальному объекту, с воссозданием реальных условий эксплуатации. По разработанным сценариям разработчики проводят виртуальные испытания, по результатам которых получают множество вариантов поведения концепта решения. Далее концепт внедряемой технологии изменяется с повторением виртуальных испытаний. Вышеописанные действия производятся адекватное количество раз при сопоставлении получаемых вновь результатов и их значимости с количеством затрачиваемых ресурсов. По результатам проведенного ряда виртуальных испытаний утверждается финальный концепт внедряемого решения. Решение разрабатывается, устанавливается, осуществляется пуско-наладка системы и проводятся финальные испытания.

Виртуальные испытания на виртуальном полигоне позволяют избегать изготовления промежуточных образцов, однако высокие требования к созданию адекватных моделей обуславливают глубокие поисковые исследования физических объектов. От собранных на первом этапе материалов зависят успех дальнейшей работы и эффективность внедряемых решений. Вторым недостатком являются предъявляемые требования к программно-аппаратной части, используемой как инструмент при создании цифровых двойников, виртуальных полигонов. Ввиду высокой нагрузки и долгой вычислительной мощности обычные мощности привычного программного обеспечения и офисных рабочих станций являются недостаточными, и для выполнения этой работы необходимы суперкомпьютеры. Третьим недостатком являются высокие требования к специалистам, создающим виртуальные полигоны и цифровые двойники, когда допущенные ошибки на этапе создания цифровых моделей могут повлечь за собой неэффективные затраты ресурсов.

Методология оценки соответствия оригиналов и цифровых моделей заключается в первую очередь в запросе, который предъявляется цифровому двойнику. Рассмотрим оценку оригиналов и цифровых моделей на примере автоматического механизма натяжения доильного стакана (рис. 4). При разработке физического объекта данного механизма (на рисунке не показан) основной задачей для нас являлось исследование влияния износа звеньев механизма натяжения на качество натяжения и постановку доильного стакана перед надеванием. В результате продолжительных

исследований (более 700 ч наработки как с чистым механизмом, так и с моделированием загрязнения песком, выступающего в качестве абразива) был получен рабочий износ звеньев механизма натяжения, критично не влияющий на постановку доильного стакана. Далее для формирования цифровой модели необходимо занести в ЦД с необходимой точностью (миллиметр или микрометр в зависимости от поставленной задачи) износ звеньев, материал и граничные условия, при которых работал физический объект. Пополнение ЦД информацией об износе материала необходимо выполнять с тем шагом, который позволит спрогнозировать износ ЦД. В нашем случае регистрация износа осуществлялась каждые 8 ч непрерывной работы при выбранном абразиве в виде песка. Такой подход актуален при дополнении ЦД обратным путем.

Внесенный износ звеньев с абразивом в ЦД позволит при дальнейшей работе изменять форму звена и моделировать износ. При изменении материала необходимо пополнять ЦД данными по износу конкретного материала, поскольку адекватность ЦД при моделировании и адекватность ЦД при моделировании и дополнении данными с физического объекта отличаются. Дополнение данными с физического объекта позволит получить более адекватный ЦД.

В России существует ряд ограничений, не позволяющих на данный момент внедрение в сельское хозяйство технологии ЦД и виртуальных полигонов (табл.).

Внедрением технологии ЦД в сельское хозяйство активно занимаются компании и учёные во всем мире. Британский агротехнический центр, разработчик сервиса The Agri-food Data Marketplace (аккумулирующий передовые сельскохозяйственные данные с дальнейшим их предоставлением производству), отмечает, что будущее ЦД – это индивидуальные цифровые двойники, описывающие конкретный объект. Например, ЦД коровы «Снежка» существует в реальном времени до тех пор, пока существует его аналог в реальном мире, с обновляющимися данными в реальном времени.

По мнению Agrimetrics, в 2023-2025 гг. учёные в области цифровых двойников в сельском хозяйстве будут решать вопрос снижения общей стоимости разработки и развёртывания ЦД. Разработкой ЦД в сельском хозяйстве будут заниматься научно-исследовательские институты, высокотехнологичные стартапы совместно с передовыми агропредприятиями⁷.

Нидерландская компания Connecterra⁸ создала ЦД коровы, под которым разработчики подразумевают

⁷ Исследования агрометрического центра. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.agrimetrics.co.uk/news/10-things-about-digital-twins-in-agriculture> (дата обращения: 17.11.2022).

⁸ Главная страница компании. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.connecterra.io/> (дата обращения: 17.11.2022).

Таблица

Ограничения при внедрении технологии ЦД в сельское хозяйство России

Table

Restrictions for the implementation of Digital Twin technology in Russia

Технические ограничения / Technical limitations	Рыночные ограничения / Market restrictions
•Технология готова. Массовое внедрение возможно с помощью интеграционных решений <i>API</i> или путем принятия стандартов <i>Io T</i>. •Не все фермы страны подключены к Интернету или его скорость является недостаточной. •Ожидается, что в ближайшие 5 лет удаленные места будут обеспечены доступной сетью.⁹ •К 2031 г. в стране планируется создание разветвлённой системы суперкомпьютерных центров для проведения исследовательских работ.¹⁰ • <i>Technology is ready for use. Mass adoption is possible through API integration solutions or through the adoption of IoT standards.</i> • <i>Not all farms in the country are connected to the Internet or its speed is insufficient.</i> • <i>the next 5 years, remote locations are expected to get an accessible network.</i> • <i>By 2031, the country plans to develop an extensive system of supercomputer centers for research work.</i>	•Практика предложения решений для ЦД не распространена в сельском хозяйстве. •Показатели эффективности для оценки преимуществ этой технологии в животноводстве не разработаны. •Бизнес-модели для монетизации технологии ЦД в животноводстве не разработаны и повсеместно не распространены. •Конкретный рынок потребителей технологии ЦД в сельском хозяйстве не сформирован. • <i>The practice of offering DT solutions is not common in agriculture.</i> • <i>No performance metrics have been developed to assess the benefits of this technology in livestock production.</i> • <i>Business models for DT technology monetization in animal husbandry have not been developed and are not widespread.</i> • <i>A specific market of DT technology consumers in agriculture has not been formed.</i>
Экономические ограничения / Economic restrictions	Правовые ограничения / Legal restrictions
• Технология ЦД не внедрена в сельском хозяйстве, поэтому ее экономика неизвестна. • В связи с высокими рисками инвестировать в технологию ЦД склонны только компании с диверсифицированным бизнесом. • <i>The DT technology is not implemented in agriculture, so its economic indicators are unknown.</i> • <i>Due to the high risks, only companies with a diversified business are inclined to invest in the DT technology.</i>	• Нормативные указания этического использования цифровых двойников для сельского хозяйства не разрабатываются. • Использование системы ЦД для животных подлежит юридическим рассмотрениям • <i>Regulations on the ethical use of digital twins for agriculture are not being developed.</i> • <i>Use of the DT system for animals is subject to legal reviews</i>

удалённый контроль течки животных и ее физиологического состояния во время производственных циклов. Разработка основана на технологии *Io T*.

Компания *Delaval* разработала цифровую систему определения физиологической упитанности молочных коров *Body Score Condition*¹¹. Задача системы – оценить выраженность крестца животного и сравнить текущий объем с ранее полученными значениями, чтобы оценить физиологическое состояние животного на предмет наличия кетоза. Разработка основана на времяпролётной технологии.

Учеными из ФГБНУ ФНАЦ ВИМ разрабатывается цифровой двойник коровы, который формируется на основе данных, полученных с болюсов (оценка двигательной активности, *ph* рубца, температура тела), на основании чего автоматически определяются

время охоты, количество выпитой воды, интенсивность моциона, возможные заболевания ЖКТ и опорно-двигательной системы [32-33]. Цифровой двойник коровы дополняется данными, полученными с системы автоматической линейной оценки экстерьерера, где определяются балл упитанности, биометрические показатели вымени и сосков коровы, индексы тела коровы [34-35].

Греческая компания *BeeZon*¹² разработала цифровой двойник пасеки для слежения за климатическими изменениями, которые отрицательно сказываются на пчеловодстве. Система основывается на создании ЦД пчелиных систем, где отслеживаются болезни семей, инфекции вредителей, воздействие пестицидов и токсичность среди пчёл.

Компания из Словении *HarpHaSea* создала цифровой двойник урожая оливок с использованием оптической технологии. Разработка направлена на защиту оливок от оливковой мухи. Система отслеживает появление и движение оливковых мух¹³.

⁹ Стратегия и «дорожная карта» развития ИТ отрасли. [Электронный ресурс]. URL: <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/479> (дата обращения: 17.11.2022).

¹⁰ Российская стратегия развития суперкомпьютеров. [Электронный ресурс]. URL: https://www.cnews.ru/news/top/2021-10-26_vlasti_ozabotilis_razvitiem (дата обращения: 17.11.2022).

¹¹ Главная страница компании. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.delaval.com/ru-by/-/farm-management/delpro-precision-analytics/delaval-body-condition-scoring-bcs/> (дата обращения: 17.11.2022).

¹² Главная страница компании. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.beezon.gr/> (дата обращения: 17.11.2022).

¹³ Необходимость модернизации сельского хозяйства цифровыми двойниками. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.challenge.org/knowledgeitems/why-modern-farming-need-the-digital-twins/> (дата обращения: 17.11.2022).

Компания Aranca, являющаяся глобальной исследовательской и консультационной фирмой, работающей в США, Индии, Европе и Японии¹⁴, считает, что использование ЦД в сельском хозяйстве поможет повысить производительность и качество животноводческой продукции, и это позволит предотвратить дефицит продуктов питания. К 2020 г. Ирландский стартап Sainthus разработал с использованием технологии искусственного интеллекта и технического зрения систему для определения физиологического состояния животных.

Американская компания Cargill использует ЦД для оценки физиологического состояния крупного рогатого скота. Американский стартап Rex разработал крупнейшую базу данных о генетике, производительности и здоровье домашнего скота. Компании Connecterra и Quantified AG работают над созданием ЦД для мониторинга здоровья скота.

¹⁴ Зарубежный опыт внедрения цифровых двойников в сельское хозяйство. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.aranca.com/knowledge-library/articles/ip-research/use-cases-digital-twin-in-livestock-farming> (дата обращения: 17.11.2022).

Выводы

1. Разработанная концепция цифровых двойников сельскохозяйственных объектов и процессов на базе современных доступных технологий подразумевает взаимное общение в режиме реального времени ЦД и физического объекта с накоплением и передачей информации, прогнозированием цифровым двойником поведения физического объекта и изменением его параметров и режимов работы.

2. Разработанный метод учитывает взаимодействие ЦД с физическим объектом при лабораторных, натурных испытаниях и в течение жизни физического объекта, в котором физический объект оставляет цифровую тень, на основании чего ЦД принимает решения о дальнейшей работе физического объекта.

3. Концепция виртуального полигона, описанная на примере животноводческой фермы, дает возможность задавать адекватное количество параметров, воздействующих на объект, из внешней среды с целью испытания ЦД сельскохозяйственного объекта.

Список использованных источников / References

- Deraniyagala S. The impact of technology accumulation on technical efficiency: an analysis of the Sri Lankan clothing and agricultural machinery industries. *Oxford Development Studies*. 2001;29(1):101-114. <https://doi.org/10.1080/13600810125542>
- Reddy P.K., Ankaiah R. A framework of information technology-based agriculture information dissemination system to improve crop productivity. *Current Science*. 2005;88(12):1905-1913. <http://www.jstor.org/stable/24110616>.
- Yu F., Zhang Jf., Zhao Y., Zhao Jc., Tan C., Luan Rp. The research and application of virtual reality (VR) technology in agriculture science. *Computer and Computing Technologies in Agriculture III*. 2010;317. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12220-0_79
- Iqbal M., Ahmad M. Science & technology based agriculture vision of Pakistan and prospects of growth. *MPRA*. 2005. P. 57441. <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/id/eprint/57441>.
- Parihar S.S., Mishra B., Rai D.P. Sustainable models of information technology for agriculture and rural development. *Indian Research Journal of Extension Education*. 2010;10(1):20-23.
- Tso T.C. Agriculture of the future. *Nature*. 2004;428(6979):215-217. <https://doi.org/10.1038/428215a>
- Chen H., Yada R. Nanotechnologies in agriculture: new tools for sustainable development. *Trends in Food Science & Technology*. 2011;22(11):585-594. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.09.004>
- Luvisi A. Electronic identification technology for agriculture, plant and food. A review. *Agronomy for sustainable development*. 2016;36(1):1-14. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0352-3>
- Sarcheshmeh E.E., Bijani M., Sadighi H. Adoption behavior towards the use of nuclear technology in agriculture: A causal analysis. *Technology in Society*. 2018;55:175-182. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2018.08.001>
- Bermeo-Almeida O., Cardenas-Rodriguez M., Samaniego-Cobo T., Ferruzola-Gómez E., Cabezas-Cabezas R., Bazán-Vera W. Blockchain in agriculture: A systematic literature review. *International Conference on Technologies and Innovation*. Springer, Cham. 2018;44-56. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00940-3_4
- Pandey N. Role of information and communication technology in agriculture development: a study of Nabarangpur district. *Scholedge International Journal of Business Policy & Governance*. 2017;4(4):2394-3351. <http://dx.doi.org/10.19085/journal.sijbpg040401>
- Monteiro J., Barata J., Veloso M., Veloso L., Nunes J. Towards sustainable digital twins for vertical farming. *Thirteenth International Conference on Digital Information Management (ICDIM)*. 2018;234-239. <https://doi.org/10.1109/ICDIM.2018.8847169>
- Verdouw C.N., Kruize J.W. Digital twins in farm management: illustrations from the FIWARE accelerators SmartAgriFood and Fractals. *Paper presented at PA17 – The International Tri-Conference for Precision Agriculture in 2017*, Hamilton, New Zealand. <https://doi.org/10.5281/zenodo.893661>
- Verdouw C., Kruize J.W. Digital twins in farm management: illustrations from the FIWARE accelerators SmartAgriFood and Fractals. *PA17. The International Tri-Conference for Precision Agriculture in 2017*. Hamilton, New Zealand. <https://doi.org/10.5281/zenodo.893661>
- Yun S., Park J.H., Kim W.T. Data-centric middleware based digital twin platform for dependable cyber-physical systems. *Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*. IEEE. 2017;922-926. <https://doi.org/10.1109/ICUFN.2017.7993933>
- Никитин Е.А., Павкин Д.Ю., Шилин Д.В. Система управления роботизированным устройством для обслуживания кормового стола // Агроинженерия. 2021. № 4(104). С. 4-8. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-4-4-8>
- Nikitin E.A., Pavkin D.Yu., Shilin D.V. Control system of a robotic device used for servicing a feed table. *Agricultural Engineering*, 2021;4(104):4-8. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-4-4-8>
- Звягина Е.М. Исследование возможности внедрения VR/AR-технологий в аграрно-промышленном комплексе // Известия Международной академии аграрного образования. 2020. № 48. С. 57-61. EDN: NGZJBT.

Zvyagina E.M. Research of the possibility of VR/AR-technologies implementation in the agro-industrial sector. *Izvestiya mezhdunarodnoy akademii agrarnogo obrazovaniya*. 2020;48:57-61. (In Rus.)

18. Neethirajan S. The role of sensors, big data and machine learning in modern animal farming. *Sensing and Bio-Sensing Research*. 2020;29:100367. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2020.100367>

19. Huuskonen J., Oksanen T. Soil sampling with drones and augmented reality in precision agriculture. *Computers and electronics in agriculture*. 2018;154:25-35. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.039>

20. Klerkx L., Jakku E., Labarthe P. A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*. 2019;90-91:100315. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315>

21. Chaux J.D., Sanchez-Londono D., Barbieri G. A digital twin architecture to optimize productivity within controlled environment agriculture. *Applied Sciences*. 2021;11(19):8875. <https://doi.org/10.3390/app11198875>

22. González J.P., Sanchez-Londoño D., Barbieri G. A monitoring digital twin for services of controlled environment agriculture. *IFAC-PapersOnLine*. 2022;55(19):85-90. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.188>

23. Rogachev A.F., Skiter N.N., Ketko N.V., Simonov A.B., Makarevich I.V. Digital twins as a tool for systemic integration of innovative digital technologies in agriculture. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;1069(1):012042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1069/1/012042>

24. Torky M., Hassanein A.E. Integrating blockchain and the internet of things in precision agriculture: Analysis, opportunities and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020;178:105476. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105476>

25. Xiong H., Dalhaus T., Wang P., Huang J. Blockchain Technology for Agriculture: Applications and Rationale. *Front. Blockchain*. 2020;3:7. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2020.00007>

26. Lin W., Huang X., Fang H., Wang V., Hua Y., Wang J., Yin H., Yi D., Yau L. Blockchain technology in current agricultural systems: From Techniques to Applications. *IEEE Access*. 2020;8:143920-143937. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3014522>

27. Chen Y., Li Y., Li C. Electronic agriculture, blockchain and digital agricultural democratization: Origin, theory

and application. *Journal of Cleaner Production*. 2020;268(3):122071. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122071>

28. Demestichas K., Peppas N., Alexakis T., Adamopoulou E. Blockchain in agriculture traceability systems: a review. *Applied Sciences*. 2020;10:4113. <https://doi.org/10.3390/app10124113>

29. Risco-Martín J.L., Mittal S. Model management and execution in DEVS unified process. *Model Engineering for Simulation*. 2019;291-313. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813543-3.00014-7>

30. Beshears R., Bouma A. Engaging supportability analysis through model-based design. 2020 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). IEEE; 2020:1-5. <https://doi.org/10.1109/RAMS48030.2020.9153646>

31. Bajzek M., Fritz J., Hick H., Maletz M., Faustmann C., Stieglbauer G. Model based systems engineering concepts. *Systems Engineering for Automotive Powertrain Development (Powertrain)*. Springer, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68847-3_8-1

32. Pavkin D.Yu., Dorokhov A.S., Vladimirov F.E., Dovlatov I.M., Lyalin K.S. Algorithms for detecting cattle diseases at early stages and for making diagnoses and related recommendations. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021;11 (23):11148. <https://doi.org/10.3390/app112311148>

33. Dorokhov A.S., Ivanov Y.A., Kirsanov V.V., Pavkin D.Y., Vladimirov F.E. Diagnosing sub-acute rumen acidosis in cows in the post-calving period with digital technologies. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinaria e Zootecnia*. 2021;73(2):271-276. <https://doi.org/10.1590/1678-4162-12170>

34. Павкин Д.Ю., Юрочка С.С., Шилин Д.В., Рузин С.С. Бесконтактная оценка упитанности молочных коров с использованием TOF-технологии // *Агроинженерия*. 2021. № 2 (102). С. 39-44. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-39-44>

Pavkin D.Yu., Yurochka S.S., Shilin D.V., Ruzin S.S. Non-contact body condition score of dairy cows based on TOF-technology. *Agricultural Engineering*, 2021;2(102):39-44. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-39-44>

35. Юрочка С.С., Хакимов А.Р., Довлатов И.М., Владимиров Ф.Е., Павкин Д.Ю., Матвеев В.Ю. Применение метода определения биометрических параметров вымени лактирующих животных с использованием сверточной нейронной сети // *Вестник НГИЭИ*. 2022. № 9 (136). С. 30-40. EDN: XLPHLO.

Yurochka S.S., Khakimov A.R., Dovlatov I.M., Vladimirov F.E., Pavkin D.Y., Matveev V.Yu. Use of a convolutional neural network to determine the biometric parameters of the udder of lactating animals. *Bulletin NGIEI*. 2022;9:30-40.

Вклад авторов:

А.С. Дорохов – формирование сложностей внедрения цифровых двойников; формирование концепции цифровых двойников при разработке сельскохозяйственных машин, объектов, процессов; формирование направлений применения цифровых двойников;

Д.Ю. Павкин – формирование концепции цифровых двойников в сельском хозяйстве и этапов развития; предложил методы взаимодействия цифрового двойника и физического объекта, формирование ограничений внедрения технологии цифровых двойников в сельском хозяйстве;

С.С. Юрочка – проведение литературного обзора, формирование концепции виртуального полигона для виртуальных испытаний на животноводческих фермах.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 22.12.2022; поступила после рецензирования и доработки 03.07.2023; принята к публикации 03.07.2023

Contribution of the authors

A.S. Dorokhov – detecting the difficulties of introducing digital twins; the conceptualization of the use of digital twins in the design of agricultural machines, objects, processes; describing the uses of digital twins;

D.Y. Pavkin – the conceptualization of the use of digital twins in agriculture and their development stages; choosing methods of interaction between a digital twin and a physical object, the formation of restrictions on the introduction of the digital twin technology in agriculture;

S.S. Yurochka – conducting a literature review, forming the concept of a testing ground for virtual tests on livestock farms.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 22.12.2022; revised 03.07.2023; accepted 03.07.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.431

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-26-32



Развитие мобильной энергетики с учётом агротехнологических ограничений

Левшин Александр Григорьевич[✉], д-р техн. наук, профессор¹alevshin@rgau-msha.ru[✉]; <http://orcid.org/0000-0001-8010-4448>*Гаспарян Ирина Николаевна*, д-р с.-х. наук, доцент, главный научный сотрудник²irina150170@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7161-3654>*Голубев Иван Григорьевич*, д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом³golubev@rosinformagrotech.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3754-0380>¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49² Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Прянишникова, 31³ Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса; 141261, Российская Федерация, Московская область, р.п. Правдинский, ул. Лесная, 60

Аннотация. Проблема поиска оптимального соотношения массы, мощности и рабочей скорости была и остается актуальной задачей со времен формирования основ земледельческой механики. Концепция развития, направленная на повышение производительности и рабочих скоростей машинно-тракторных агрегатов, привела к росту единичной мощности и увеличению массы машин. Анализ тенденций развития тракторов и самоходных машин показал ежегодное увеличение средней мощности вновь созданных тракторов на 2...4 л.с. Реализация потенциала техники повышенной энергонасыщенности возможна за счет дополнительного роста массы машин, увеличивающего уплотнение почвы. Критические напряжения, достигающие значительной глубины, не способствуют процессу полной релаксации почвы. В необрабатываемом слое формируется почвенный горизонт от 25...30 до 100...120 см (с твердостью, соответствующей глиняной укатанной дороге), ограничивающий зону развития корневой системы растений и нарушающий фильтрацию почвы. Интенсивное использование энергонасыщенных агрегатов и самоходных машин привело к накопленному переуплотнению необрабатываемого слоя более 60% пахотных земель. Переуплотнение почвы по следу колес приводит к снижению урожайности зерновых культур на 10% и корнеклубнеплодов на 20%. При модернизации или создании новых образцов машин предлагаем в технико-экономическом обосновании учитывать негативные экологические последствия применения агрегатов и переработать нормативно-методические документы по оценке удельных давлений на почву движителей самоходных машин. Необходимо снижать машинную нагрузку на почву, применяя машины меньшей массы и реализуя мероприятия по разуплотнению подпочвенного горизонта. Следует обосновать параметры и создать линейку роботизированных энергетических систем, комплекс рабочего оборудования и систему управления на принципах мультиагентного управления ансамблями динамических объектов применительно к сельскохозяйственному производству.

Ключевые слова: уплотнение почвы, мощность двигателя, давление ходовых систем, масса машин, смещение грунта, буксование

Формат цитирования: Левшин А.Г., Гаспарян И.Н., Голубев И.Г. Развитие мобильной энергетики с учётом агротехнологических ограничений // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 26-32. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-26-32>.

© Левшин А.Г., Гаспарян И.Н., Голубев И.Г., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Development of mobile power production taking into account agrotechnological limitations**Aleksandr G. Levshin**[✉], DSc (Eng), Professor¹alevshin@rgau-msha.ru[✉]; <http://orcid.org/0000-0001-8010-4448>**Irina N. Gasparyan**, DSc (Agr), Associate Professor, Chief Researcher²irina150170@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7161-3654>**Ivan G. Golubev**, DSc (Eng), Professor, Head of Department³golubev@rosinformagrotech.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3754-0380>¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow 127434, Russian Federation² All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov; 31, Pryanishnikova Str., Moscow, 127434, Russian Federation³ Russian Research Institute of Information and Feasibility Studies for Engineering and Technical Support of the Agro-Industrial Sector; 60 Lesnaya Str., Pravdinsky Settlement, Moscow region, 141261, Russian Federation

Abstract. The problem of finding the optimal ratio of mass, power, and working speed has been and remains an urgent task since laying the groundwork of agricultural mechanics. The concept of development aimed at increasing the productivity and operating speeds of machine-tractor units, has led to an increase in unit power and the mass of machines. An analysis of the development trends of tractors and self-propelled machines showed an annual increase in the average power of newly designed tractors by 2 to 4 hp. Capacity implementation of equipment with increased energy saturation is possible due to an additional increase in the mass of machines, which results in increased soil compaction. Critical stresses reaching a significant depth do not contribute to the process of complete relaxation of the soil. In the uncultivated layer, a soil horizon is formed between 25 to 30 and 100 to 120 cm (with a hardness corresponding to a clay rolled road), limiting the development zone of the plant root system and disturbing soil filtration. The intensive use of energy-saturated units and self-propelled machines has led to the accumulated overconsolidation of the uncultivated layer of more than 60% of arable land. Soil overconsolidation along the wheel track leads to a decrease in the yield of grain crops by 10% and root crops by 20%. When modernizing or designing new models of machines, we suggest taking into account the negative environmental consequences of the use of units in the feasibility study and reworking the regulatory and methodological documents for assessing the specific pressures on the soil of the running gear parts of self-propelled machines. It is necessary to reduce the machine load on the soil by using smaller machines and by implementing measures to loosen the subsoil horizon. Equally important is to determine the parameters and design a line of robotic energy systems, a set of working equipment and a control system based on the principles of multi-agent control of sets of dynamic objects in relation to agricultural production.

Keywords: soil consolidation, engine power, undercarriage system pressure, machine weight, soil displacement, slipping

For citation: Levshin A.G., Gasparyan I.N., Golubev I.G. Development of mobile power production taking into account agrotechnological limitations. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(4):26-32. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-26-32>.

Введение. Для создания оптимальной структуры пахотного слоя на практике применялась многократная обработка почвы включая лемешную вспашку и 2-3-кратную культивацию и боронование. Вспашка на постоянную глубину привела к появлению «плужной подошвы» – уплотненного подпахотного горизонта.

Следует отметить, что собственные колебания машин способствуют увеличению уплотнения почвы. Несущая способность почвы существенно снижается при повышенной влажности. Изменение фактора структурности почвы увеличивается в слое 20...30 см

до 86,3...97,2% и остается постоянной до глубины 100 см [1]. При типовой технологии уплотняется от 87,5 до 95,3% всей поверхности поля, при минимальной обработке – около 72,8%, а при безотвальной – 55,7% [2]. По данным Евростата, наиболее распространенной является традиционная технология, включающая в себя вспашку 74%, 22% пахотных земель обрабатываются по минимальной технологии, и только 4% – по технологии no-till [3].

Деградация плодородного слоя является следствием применения техники, обладающей большой массой. Увеличению уплотнения способствует

и величина тяговой нагрузки, преодолеваемой трактором. Сформированный уплотненный слой почвы нарушает водно-воздушный режим в почве, препятствует проникновению корневой системы и ограничивает зону ее развития. По данным В.С. Kellera [3], в Дании по причине уплотнения почвы ходовыми системами к 2010 г. плотность почвы в подпахотном горизонте увеличилась по сравнению с 1960 г. на $0,2 \dots 0,3 \text{ Мг} \cdot \text{м}^{-3}$, скорость роста корней уменьшилась с 40 до 20 мм день⁻¹ (рис. 1) [3].

Современные теория и практика использования колесных и гусеничных машин сформировали систему агротехнических ограничений для снижения негативного воздействия на экосреду, учитывающую:

- удельное давление с учетом влажности почвы и сезона использования;
- величину буксования ходовых систем;
- диапазон рабочих скоростей;
- ширину колес, технологической колеи и агротехнической проходимости. Однако ввиду несовершенства методик, их обоснования и отсутствия государственного контроля за их соблюдением проблема переуплотнения почвы остается актуальной.

Ограничение негативного воздействия на экосреду удельного давления с учетом влажности, типа почвы и сезона использования определено ГОСТ 26955-86¹. По принятой методике определяют статическую нагрузку на колесо, площадь контакта на твердом основании и корректируют ее для почвенного фона

обобщенным коэффициентом, зависящим от диаметра колеса. При этом не учитывается динамическая догрузка колес, что в итоге дает заниженное значение удельного давления на почву. Методика оценки требует доработки.

При недостатке влаги и уменьшении глубины промерзания по причине потепления климата естественный процесс разуплотнения не позволяет восстановить структуру почвы. Повышенная твердость затрудняет проникновение корней культурных растений, ограничивает зону их развития, что исключает биологические процессы восстановления структуры почвы.

Технологии механизированных процессов разуплотнения почвы являются высокоэнергоемкими. Энергоемкость чизельной обработки почвы на глубину до 40...45 см требует в 1,2...1,5 раза больше энергии, чем вспашка на глубину пахотного слоя 25...30 см. Технологии и машины для большей глубины на рынке практически отсутствуют.

Несбалансированное увеличение единичной мощности трактора приводит к увеличению буксования. В процессе буксования происходит разрушение структуры почвы с образованием пылевидных частиц. В качестве допустимого принимают буксование при тяговом усилии, соответствующем максимуму тяговой мощности. В качестве ограничений рекомендуют буксование на уровне 16, 18 и 7% соответственно для тракторов типа 4×2, 4×4 и гусеничного трактора².

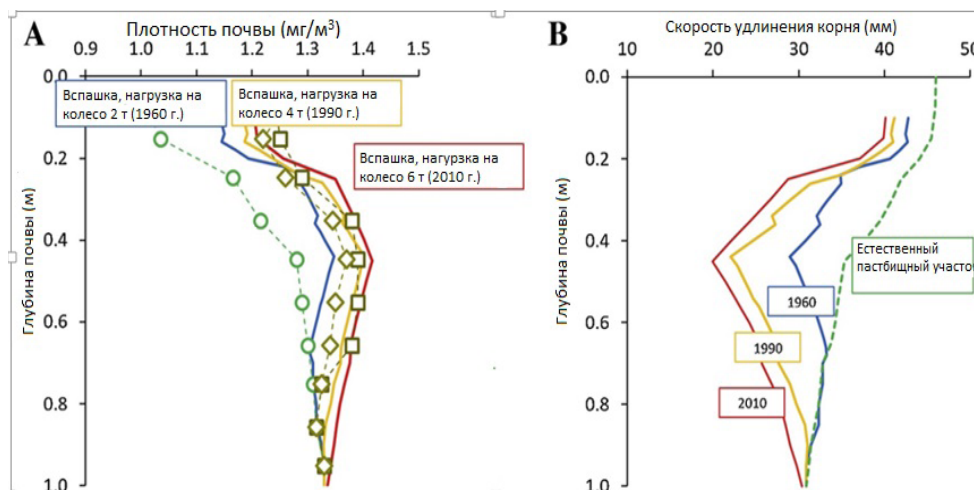


Рис. 1. Изменение насыпной плотности в пахотной почве, $\text{Мг} \cdot \text{м}^{-3}$ (А), скорость удлинения корней, $\text{мм} \cdot \text{день}^{-1}$ (В) при нагрузке на колесо:

— 2 Мг (с 1960 г.); — 4 Мг (с 1990 г.); — 6 Мг (с 2010 г.); — — — — начальные условия; $\diamond$ — 1967 г.; $\square$ — 1982 г.

Fig. 1. Change in bulk density of arable soil, $\text{Mg} \cdot \text{м}^{-3}$ (А); root elongation rate, $\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$ (В) under load on the wheel:

— 2 Mg (since 1960); — 4 Mg (since 1990), — 6 Mg (since 2010); — — — — initial conditions; $\diamond$ — 1967; $\square$ — 1982

¹ ГОСТ 26955-86. Техника сельскохозяйственная мобильная. Нормы воздействия движителей на почву (Agricultural mobile machinery. Rates of force produced by propelling agents on soil): Сборник ГОСТов. М.: Издательство стандартов, 1986.

² Скороходов А.Н., Левшин А.Г. Производственная эксплуатация машинно-тракторного парка. М.: БИБИКОМ; ТРАНСЛОГ, 2017. 478 с.

Однако уже при буксовании колесного трактора более 6...7% в 2 раза увеличивается количество частиц менее 0,5 мм [4]. Снижение буксования за счет балластирования приведет к увеличению уплотнения почвы.

Повышение производительности и снижение затрат труда требуют увеличения мощности энергетических средств. Однако при этом для реализации тягового потенциала трактора вынуждены увеличивать его массу или применять технические решения по увеличению сцепного веса за счет балластирования, гидравлического или позиционного догрузателя, что приводит к увеличению уплотнения почвы и ее дальнейшей деградации. Возникает противоречие между тенденцией развития техники и требованиями агротехники.

Помимо экологического ущерба, проблема имеет серьезный экономический ущерб, вызванный снижением урожайности порядка 30%. Об этом свидетельствуют данные исследований более чем в 40 странах мира. В Российской Федерации ежегодный недобор урожая зерновых культур³ составляет 13...15 млн т [5].

Цель исследований: анализ противоречий между тенденцией развития тракторов и самоходных машин и агротехнологическими требованиями к производственным процессам с учетом почвенных и производственных условий.

Материалы и методы. Материалами исследований направлений развития тракторов и самоходных машин послужили данные автоматизированной справочной системы «Сельхозтехника»⁴. Анализ современных технологий обработки почвы проведен согласно данным агротехнической оценки по ГОСТ 33736-2016 «Техника сельскохозяйственная. Машины для глубокой обработки почвы. Методы испытаний» и ГОСТ 33687-2015 «Машины и орудия для поверхностной обработки почвы. Методы испытаний». Определение энергетических показателей осуществлялось по ГОСТ Р 52777-2007 «Техника сельскохозяйственная. Методы энергетической оценки». Оценка условий испытаний осуществлялась по ГОСТ 20915-2011 «Испытания сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний».

³ Гостев А.В., Плотноков В.А., Нитченко Л.Б. Уплотнение почвы движителями мобильных сельскохозяйственных машин и меры по ее снижению: Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции «Экологизация земледелия и оптимизация агроландшафтов» (г. Курск, ФГБНУ ВНИИЗиЗПЭ, 10-12 сентября 2014 г.). Курск, 2014. С. 72-76.

⁴ Автоматизированная справочная система «Сельхозтехника». [Электронный ресурс]. URL: www.agrobase.ru (дата обращения: 12.03.2021).

Результаты и их обсуждение. С момента создания самоходных машин остается актуальным вопрос оптимальных соотношений мощности, массы и рабочей скорости [6]. Потенциальная производительность машинно-тракторного агрегата зависит от мощности двигателя. Мощность самого массового универсально-пропашного трактора класса 1,4 семейства «Беларус» увеличилась с 20,0 кВт (МТЗ-2, 1956 г.) до 59,6 кВт (МТЗ-920, 2000 г.) в 3 раза; масса МТЗ-920 достигла 4100 кг (с возможностью увеличения до 7000 кг). Энергонасыщенность увеличилась с 6,2 кВт·т⁻¹ (1956 г.) до 19,7 кВт·т⁻¹ (2000 г.).

Эксплуатационная масса колесных тракторов класса 8 достигает 29937 кг (Steiger 550), 24490 кг (New Holland N9040), и при этом грузоподъемность навесной системы⁴ достигает 8000...9000 кг. Кроме этого догрузка задних колес до 15% происходит и за счет тягового усилия. При общепринятой развесовке тракторов новой компоновки (передняя ось – 60% и задняя ось – 40%) происходит в процессе работы выравнивание нагрузки по осям. С учетом этого нагрузка на колесо у трактора Steiger 550 может достигать 64,22 кН. Распределение существующих (выборка 1341) моделей тракторов по массе приведены на рисунке 2. Средний вес составляет 5,325 тонн.

Уплотняющее воздействие тракторов класса 1,4 и 3 распространяется на глубину 45...50 см, класса 4 – до 50...70 см, а класса 5 – на глубину до 1...1,2 м. Для 4 и 5 классов плотность увеличивается до 1,35...1,45 г·см⁻³, пористость уменьшается на 23...25%, урожайность снижается с 20 до 40%³.

Мощность двигателя самоходных комбайнов за 30 лет увеличилась в 3,6 раза (СК-3, 1958 г., мощность 47,8 кВт, масса 6040 кг; Дон-1500, 1985 г., мощность 172,8 кВт, масса 13440 кг). Мощность современных зерноуборочных комбайнов⁴ увеличилась до 400...405 кВт (New Holland CX 9090, масса 16700 кг, объем бункера – 12,5 м³; John Deere S690, масса 21650 кг, объем бункера – 14,1 м³). Полная масса комбайна включает в себя массу комбайна с жаткой и массу зерна в заполненном бункере. Распределение полной массы зерноуборочных комбайнов существующих моделей (выборка 53 модели) представлена на рисунке 3. Среднее значение полной массы для равно 20,14 тонны.

Мощность двигателей кормоуборочных комбайнов достигает 720 кВт (Big X). Соответственно увеличилась и их масса. Распределение массы самоходных кормоуборочных комбайнов (выборка 48 моделей) приведена на рисунке 4. Средняя масса самоходных кормоуборочных комбайнов достигла 11,67 тонн.

В исследованиях, проведенных А. Траутнер в Шведском аграрном университете Упсала, представлены

данные по величине вертикальных напряжений в почве при качении колеса с вертикальной нагрузкой 7 Мг на глубине 0,3; 0,5; 0,7 м для 5 почвенных фонов. В самый напряженный период полевых работ на почвах, содержащих глину (400...543 г/кг) и ил (386...469 г/кг), напряжения на глубине 0,3 м составляли 610 кПа (август) и 1245 кПа (сентябрь); на глубине 0,5 м – соответственно 653 кПа и 550 кПа; на глубине 0,7 м – 582 кПа и 944 кПа⁵.

В осенний период при влажности 0,6...0,7 НВ допустимые нормальные напряжения по ГОСТ 26955-86 должны составлять не более 35 кПа, что в 15...18 раз меньше реальных значений.

В исследованиях⁷ рассмотрен процесс деформации почвы при движении колеса (рис. 5). Вертикальное сме-

ещение грунта показало некоторые типичные особенности при качении колеса под нагрузкой:

а) максимальное смещение грунта (пик) происходит в момент прохода колеса;

б) пиковое смещение грунта состоит из восстанавливаемой и невосстанавливаемой (остаточной) частей;

в) восстанавливаемое смещение было более или менее постоянным при каждом проходе колеса и превышало невосстанавливаемую деформацию;

г) остаточное смещение грунта увеличивалось с увеличением числа проходов;

д) каждый проход вызывал меньшую остаточную деформацию, чем предыдущий;

е) смещение грунта уменьшалось с увеличением глубины залегания грунта.

В исследованиях отмечается, что восстанавливаемое и остаточное вертикальное смещение грунта линейно является коррелированным ($R^2 = 0,56...0,703$).

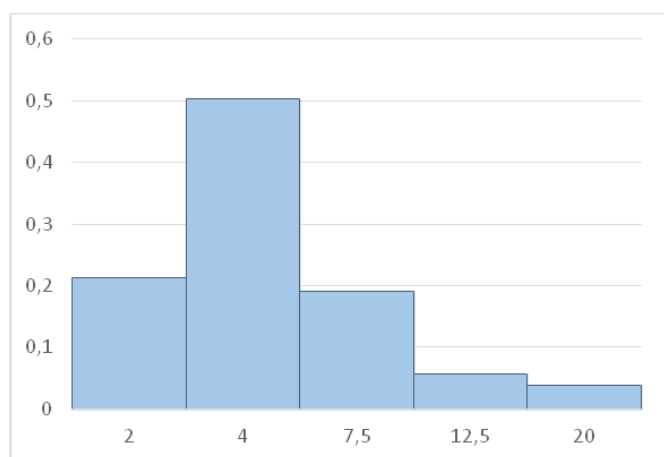


Рис. 2. Гистограмма распределения эксплуатационной массы (т) колесных тракторов

Fig. 2. Histogram of the operational weight distribution of wheeled tractors (t)

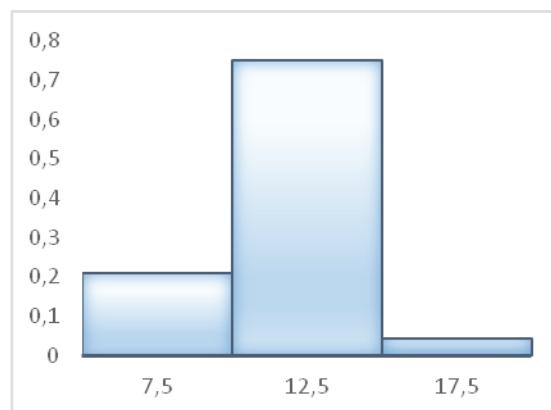


Рис. 4. Гистограмма распределения массы (т) кормоуборочных комбайнов

Fig. 4. Histogram of the weight distribution of forage harvesters (t)

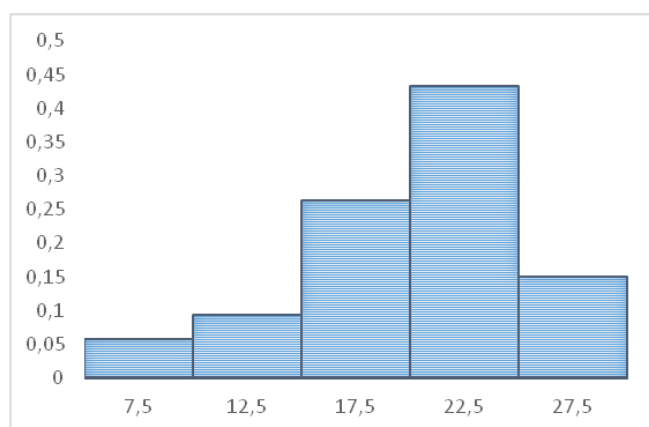


Рис. 3. Гистограмма распределения полной массы (т) зерноуборочных комбайнов

Fig. 3. Histogram of the total weight distribution of combine harvesters (t)

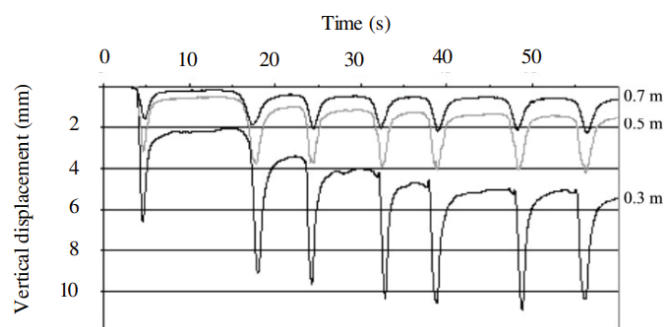


Рис. 5. Вертикальное смещение грунта, измеренное одновременно на трех глубинах в течение 7 проходов шиной с нагрузкой 7 Мг и давлением накачки 240 кПа (участок 1, 15 июля)

Fig. 5. Vertical ground displacement measured simultaneously at three depths during seven passes by a tire with a load of 7 Mg and an inflation pressure of 240 kPa (section 1, July 15)

⁵ Trautner A. On soil behavior during field traffic. Doctoral thesis Swedish University of Agricultural sciences. Uppsala, 2003. 55 с.

Уплотнение почвы в нижних горизонтах, интегральный показатель и использование новой высокопроизводительной и тяжелой самоходной техники продолжат и ускорят деградацию почвы. Кроме технологических машин, свою лепту вносят транспортные средства, и особенно грузовые автомобили общего назначения, не отвечающие требованиям ГОСТ 26955-86. Использование спаренных колес, резиноармированных гусениц, согласование ширины технологической колеи позволяют снизить удельное давление ходовых систем на почву и уменьшить площадь уплотнения, но перемещаемые большие массы как динамические системы останутся в качестве источников антропогенного негативного воздействия на почву. Естественные процессы разуплотнения протекают весьма медленно, а применение машин для глубокой обработки требует больших затрат энергии. По данным испытаний почвообрабатывающих машин на машиноиспытательных станциях Минсельхоза России, энергоёмкость плоскорезной обработки на глубину 26...27 см составляет 84...94 МДж·га⁻¹; вспашки на глубину 24,6...26 см – 123...136 МДж·га⁻¹, крошение – 75...76%; чизельной обработки на глубину 35,8 см – 133...149 МДж·га⁻¹, крошение – 95...96%; рыхления влагосберегающим РВН-2 на глубину 41,8 см – 102...106 МДж·га⁻¹, крошение – 53...55%⁶.

Методы оптимизации параметров и режимов работы машинно-тракторных агрегатов по минимальным эксплуатационным затратам² не учитывают затраты на устранение последствий деградации почвы и требуют доработки, но необходима методика оценки негативных экологических последствий при использовании мобильных машинно-тракторных агрегатов.

По результатам исследования А. Траутнер⁷ вертикальные напряжения в почве на глубине 0,5 м будут соответствовать требованиям ГОСТ при нагрузке на колесо не более 2 т для испытываемых фонов и времени по месяцам, кроме июня. Для всесезонного использования самоходных машин нагрузка на колесо не должна превышать 1...1,5 т. Соответственно полная масса агрегата с учётом динамических нагрузок не должна превышать 5...6 т. Производительность единичного машинно-тракторного агрегата в сравнении с тракторами класса 3 и класса 5 будет

⁶ Энергетические показатели сельскохозяйственных машин по данным МИС. Новокубанск, АИСТ. 246 с.

меньше соответственно в 2...2,5 и 3...3,5 раз. Компенсировать это снижение можно за счет применения мобильных роботизированных технологических беспилотных платформ⁷ или новых компоновочных решений: мобильных мостовых роботизированных систем⁸, работающих совместно с классическим машинно-тракторным агрегатом. Соблюдение агротехнических сроков обеспечивается необходимым количественным составом такого технологического комплекса. В связи с этим возникает необходимость разработки новых систем управления технологическим комплексом на принципах мультиагентного управления ансамблями (роями, swarms; стаями, flocks) динамических объектов [7, 8], выполняющих общую задачу применительно к сельскохозяйственному производству.

Выводы

1. Современные направления развития самоходной сельскохозяйственной техники противоречат агротехническим и экологическим требованиям. При модернизации или создании новых образцов машин необходимо в технико-экономическом обосновании учитывать негативные экологические последствия их применения.

2. Требуют переработки нормативно-методические документы по оценке удельных давлений на почву движителей самоходных машин.

3. Для устранения негативных последствий переуплотнения почв необходимо снизить механическую нагрузку на почву за счет применения машин меньшей массы и реализовывать мероприятия по разуплотнению подпочвенного горизонта.

4. Для снижения уплотнения почвы необходимо обосновать параметры и создать линейку роботизированных энергетических систем, комплекс рабочего оборудования и систему управления на принципах мультиагентного управления ансамблями (роями, swarms; стаями, flocks) динамических объектов применительно к сельскохозяйственному производству.

⁷ Лукин А. Системы комплексной автоматизации и беспилотного управления трактором // ГлавПахарь. 2021. 3 февраля. URL: <https://glavpahar.ru/articles/sistemy-kompleksnoy-avtomatizacii-i-bespilotnogo-upravleniya-traktorom> (дата обращения: 10.05.2023).

⁸ Скуратович А. Развитие способов снижения давления на почву // Докучаевские чтения. 2008. 53 с. URL: <http://www.trizminsk.org/e/20130105.pdf>.

Список использованных источников

1. Зинченко С.И., Зинченко В.С. Формирование плужной подшвы при различных приемах основной обработки серой лесной почвы // Владимирский земледелец. 2015. № 1 (71). С. 2-6. EDN: VHVYBF
2. Sarauskis E., Buragiene S., Romanekas K., Masilionyte L., Kriauciuniene Z., Sakalauskas A., Jasinskas A., Karayel D. Deep, shallow and no-tillage effects on soil compaction parameters. Engineering for Rural Development. 2014;13:31-36.
3. Kellera T., Sandina M., Colombia T., Hornd R., Or D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. Soil and Tillage Research. 2019;194:104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
4. Кузнецов Н.Г., Гапич Д.С., Ширяева Е.В. К вопросу об определении допустимого коэффициента буксования полноприводного колесного трактора // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2014. № 2 (34). С. 176-179. EDN: SFFKYR
5. Канделя М.В., Канделя Н.М., Земляк В.Л., Бумбар И.В. Переуплотнение почв – один из важнейших факторов её деградации // Дальневосточный аграрный вестник. 2019. № 3 (51). С. 105-115. <https://doi.org/10.24411/1999-6837-2019-13043>
6. Горин Г.С. Механические характеристики почвогрунтов при объёмном деформировании // Наука и техника. 2012 № 3. С. 56-63. EDN: TYNWFL
7. Ерофеева В.А., Иванский Ю.В., Кияев В.И. Управление роём динамических объектов на базе мультиагентного подхода // Компьютерные инструменты в образовании. 2015. № 6. С. 34-42. EDN: VTYVNV
8. Иванов Д.Я. Использование принципов роевого интеллекта для управления целенаправленным поведением массово применяемых микроботов в экстремальных условиях // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 9. С. 70-78. EDN: OJDQXT

Вклад авторов

А.Г. Левшин – концептуализация, методология, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование;
И.Г. Голубев – информационные ресурсы и аналитика;
И.Н. Гаспарян – актуальность проблемы, визуализация, создание черновика рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 30.05.2023, после рецензирования и доработки 19.06.2023, принята к публикации 22.06.2023

References

1. Zinchenko S.I., Zinchenko V.S. Formation of a plow pan at various methods of basic processing of gray forest soil. *Vladimirskiy zemledelets*. 2015;1(71):2-6. (In Rus.)
2. Sarauskis E., Buragiene S., Romanekas K., Masilionyte L., Kriauciuniene Z., Sakalauskas A., Jasinskas A., Karayel D. Deep, shallow and no-tillage effects on soil compaction parameters. *Engineering for Rural Development*. 2014;13:31-36.
3. Kellera T., Sandina M., Colombia T., Hornd R., Or D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*. 2019;194:104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
4. Kuznetsov N.G., Gapich D.S., Shiryayeva E.V. On the issue of determining the permissible coefficient of slipping of an all-wheel drive wheeled tractor. *Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2014;2(34):176-179. (In Rus.)
5. Kandelya M.V., Kandelya N.M., Zemlyak V.L., Bumbar I.V. Strong compaction of soil is one of the most important factors of its degradation. *Dalnevostochniy Agrarniy Vestnik*. 2019;3(51):105-115. <https://doi.org/10.24411/1999-6837-2019-13043> (In Rus.)
6. Gorin G.S. Mechanical soil characteristics at volume deformation. *Science and technique*. 2012;3:56-63. (In Rus.)
7. Erofeeva V.A., Ivansky Yu.V., Kiyaev V.I. Swarm control of dynamic objects based on multi-agent technologies. *Komp'yuternye instrumenty v obrazovanii*. 2015;6:34-42. (In Rus.)
8. Ivanov D.Ya. Use of swarm intelligence principles to control mass-applied microrobots in extreme conditions. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2011;9:70-78. (In Rus.)

Contribution of the authors

A.G. Levshin – conceptualisation, methodology, revision and editing of the final manuscript;
I.G. Golubev – information resources and analytics;
I.N. Gasparyan – problem relevance, visualisation, manuscript drafting.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 30.05.2023; revised 19.06.2023; accepted 22.06.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.171:004.65

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-33-42



Управление техническим обслуживанием сельскохозяйственной техники в условиях автоматизации и цифровизации производства

Никитченко Сергей Леонидович[✉], канд. техн. наук, доцент^{1,2}

binom_a@rambler.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-4480-9659>; Scopus Author ID: 57203408315

Лесник Наталья Александровна, канд. техн. наук, преподаватель³

nat-matvien@mail.ru

Смыков Сергей Владимирович, канд. техн. наук, ассистент⁴

sergl61rus@mail.ru

¹ Ростовский государственный университет путей сообщения; 344038, Российская Федерация, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

² Донской государственный технический университет; 344003, Российская Федерация, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

³ Зерноградский техникум агротехнологий; 347740, Российская Федерация, Ростовская область, Зерноградский район, г. Зерноград, ул. Мира, 2

⁴ Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Донского государственного аграрного университета; 347740, Российская Федерация, Ростовская область, Зерноградский район, г. Зерноград, ул. Ленина, 21

Аннотация. Техническое обслуживание отечественной сельскохозяйственной техники осуществляется преимущественно с помощью бумажного документооборота, что приводит к увеличению затрат времени на управленческие операции. Сельскохозяйственные предприятия остаются за гранью автоматизации и цифровизации управления техническим сервисом машин. Низкая адаптация существующих программных продуктов к специфике отечественного сельскохозяйственного производства не позволяет применять автоматизированные CMMS и EAM-системы, используемые в других отраслях для управления надёжностью эксплуатируемого оборудования. Авторами предложено программное обеспечение с набором функций, аналогичных функционалу известных CMMS-систем. Программное обеспечение включает в себя программу «Агрокомплекс «АСУТО»» в сочетании с ранее разработанными программами складского учёта «Агрокомплекс «Ресурсы»» и программой учёта работы и потребления топлива машинно-тракторным парком «Агрокомплекс «МТП»». Разработанная модель данных автоматизированной системы адаптирована под потребности инженерных работников, отвечающих за работоспособность сельскохозяйственной техники. Практическая проверка автоматизированной системы осуществлялась на сельскохозяйственном предприятии с парком 25 тракторов. Выявлено положительное влияние внедрённого в производство программного обеспечения на надёжность машин. Полученные результаты показали повышение эксплуатационной надёжности сельскохозяйственной техники и снижение трудоёмкости управления сервисными процессами при автоматизации инженерной деятельности. Применение автоматизированной системы позволило снизить затраты времени на управление техническим обслуживанием на 35...38% и вероятность пребывания тракторов в простое по техническим причинам на 26%, увеличив при этом вероятность пребывания техники в работоспособном состоянии на 1,81%. Исследования могут быть полезными для разработчиков EAM-систем управления техническим обслуживанием и ремонтом сельскохозяйственной техники.

Ключевые слова: сельскохозяйственная техника, надёжность, техническое обслуживание, автоматизация, цифровизация, CMMS-система, EAM-система

Формат цитирования: Никитченко С.Л., Лесник Н.А., Смыков С.В. Управление техническим обслуживанием сельскохозяйственной техники в условиях автоматизации и цифровизации производства // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 33-42. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-33-42>.

© Никитченко С.Л., Лесник Н.А., Смыков С.В., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Management of agricultural machinery maintenance under the automation and digitalization of production

Sergei L. Nikitchenko[✉], CSc (Eng), Lead Research Engineer, Associate Professor^{1,2}

binom_a@rambler.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-4480-9659>; Scopus Author ID: 57203408315

Natalia A. Lesnik, CSc (Eng), Lecturer³

nat-matvien@mail.ru

Sergey V. Smykov, CSc (Eng), Assistan Professor⁴

serg161rus@mail.ru

¹ Rostov State Transport University, 2 Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

² Don State Technical University, 1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation

³ Zernograd College of Agricultural Technologies, 2 Mira Str., Zernograd, Rostov region, 347740, Russian Federation

⁴ Azov-Black Sea Engineering Institute, Branch of Don State Agrarian University, 21 Lenina Str., Zernograd, Rostov region, 347740, Russian Federation

Abstract. When organizing maintenance activities for domestic agricultural machinery, paper workflow continues to dominate, which negatively affects the performance indicators and the level of operational reliability of machines. The engineering services of domestic agricultural enterprises remain beyond automation and digitalization in matters of managing the technical service of machines. The low adaptation of existing software products to the specifics of domestic agricultural production prevents the adoption of automated CMMS and EAM systems used in other sectors to manage the reliability of equipment in operation. The authors developed software with a set of functions similar to the functionality of well-known CMMS systems. The software includes Agrokompleks ASUTO in combination with the previously developed Agrokompleks Resursy warehouse management software and Agrokompleks MTP fuel management software. The automated system data model is adapted to the needs of engineering workers responsible for the performance of agricultural machinery. A practical test of the system was carried out at an agricultural enterprise with a fleet of 25 tractors. The results obtained confirm the hypothesis that the automation of engineering activities contributes to an increase in the operational reliability of agricultural machinery and a decrease in the labor intensity of managing service processes. The use of the automated system resulted in a decrease in the time spent on maintenance management by 35 to 38%, the probability of tractors having operational failure – by 26%. At the same time, the probability of tractors being in working condition increased by 1.8%. The research could be useful for the developers of EAM systems for the maintenance and repair management of agricultural machinery.

Keywords: agricultural machinery, reliability, maintenance, automation, digitalization, CMMS system, EAM system

For citation: Nikitchenko S.L., Lesnik N.A., Smykov S.V. Management of agricultural machinery maintenance under the automation and digitalization of production. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(4): 33-42. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-33-42>.

Введение. Современное ведение сельского хозяйства тесно связано с применением современных информационных технологий и инструментов цифровой экономики: интернет-вещей (IoT), облачных технологий, ГЛОНАСС/GPS, больших данных, методов искусственного интеллекта [1-6]. Однако в области управления технической эксплуатацией отечественной сельскохозяйственной техники перечисленные инструменты на практике используются весьма слабо. В мире все более активно исследуются и развиваются интеллектуальные системы технического обслуживания (ТО) оборудования, использующие цифровые инструменты для прогнозирования состояния технических объектов и реализации стратегии предиктивного ТО [7, 8]. Для сельскохозяйственной

техники разрабатываются методы дистанционной диагностики и удалённого мониторинга параметров надёжности [9-11]. В нашей стране это в основном пока экспериментальные проекты.

Во многих отраслях управление жизненным циклом основных фондов осуществляется с помощью EAM-систем (Enterprise Asset Management System) и их предшественников CMMS-систем (Computerized Maintenance Management System)¹ – систем компьютерного управления обслуживанием оборудо-

¹ Enterprise Asset Management. Системы управления основными фондами предприятия / TADVISER. Государство. Бизнес. Технологии: Деловой интернет-портал и аналитическое агентство. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/EAM> (дата обращения: 23.02.2023).

вания [12-14]. Данные инструменты представляют собой автоматизированные рабочие места (АРМ) инженерно-технического персонала, отвечающего за работоспособность оборудования на предприятии. Современные версии ЕАМ-систем включают в себя функционал CMMS и представляют собой облачные решения, а также имеют мобильный интерфейс пользователя. На мировом рынке подобных систем, ориентированных как на отечественного, так и на зарубежного потребителя, российские разработчики представлены достаточно широко¹ [12]. Данные программные продукты поддерживают методы процессного управления и позволяют выбирать стратегию технического обслуживания и ремонта (ТОР) оборудования для предприятия, составлять графики ТОР и контролировать их выполнение, вести историю и анализ отказов машин, резервировать запасные части и др. Среди известных отечественных систем можно выделить такие, как NERPA ЕАМ, Галактика ЕАМ 1С: ТОИР и др.

В последнее время наметились тенденции совершенствования ЕАМ-систем за счет применения инструментов цифровой экономики: анализа больших данных, предиктивного ТО, цифровых двойников (DT) обслуживаемых объектов, искусственного интеллекта² [7]. Многие российские разработчики ЕАМ-систем обеспечивают возможность работы с 3D-моделями узлов и агрегатов обслуживаемых машин, что стимулирует применение виртуальной реальности (VR) при создании симуляторов и анимации для описания процессов ТОР³ [15]. Это позволит более качественно готовить исполнителей и осуществлять информационную поддержку сервисных работ. Дальнейшее развитие ЕАМ-систем направлено на интеграцию с PDM-системами (Product Data Management) фирм изготовителей техники. Такой концепции придерживаются разработчики продукта 1С: PDM [16]. На базе автоматизированных платформ ЕАМ-систем формируются цифровые методы управления производством.

Отсутствие в реальном сельскохозяйственном производстве широкого применения автоматизированных и цифровых методов управления ТО отечественных машин препятствует максимальной реализации их технических возможностей и надёжности. Практика показывает, что переход на прогрессивную систему ТОР по состоянию возможен с помощью современных ЕАМ-приложений, которые обеспечивают правильную стратегию управления состоянием оборудования и её

практическую реализацию. В ближайшей перспективе эти задачи будут распределены между ЕАМ-системами и цифровыми двойниками физических объектов [3, 17].

Несмотря на продолжительный период существования, ЕАМ-системы почти не используются в сельскохозяйственном секторе экономики нашей страны [14]. Наши исследования, проведённые в сельскохозяйственных предприятиях Ростовской области, показывают, что консервативный стиль управления предприятиями, эксплуатирующими технику, до сих пор основан на бумажном документообороте. Сельские инженерно-технические работники (ИТР) недостаточно оснащены компьютерной техникой и специализированным программным обеспечением (ПО). Не уделяется внимание прогрессивным методам управления надёжностью машин со стороны руководства предприятий и в программах подготовки студентов профильных вузов. Но более объективная причина – это ориентированность большинства имеющих ЕАМ и CMMS-систем на отрасли, далёкие от сельского хозяйства, а чтобы адаптировать системы к специфике отечественного сельскохозяйственного производства, требуется решить следующие вопросы:

- определить функции информационной системы и механизмы ее внедрения на сельскохозяйственном предприятии;

- создать модель данных информационной системы и сформировать механизмы сбора первичной производственной информации;

- выявить влияние инструмента управления на надёжность обслуживаемых машин, трудоёмкость управления процессами ТО и стоимость управленческой инженерной деятельности с определением экономического эффекта для предприятия.

Имеющийся опыт использования CMMS/ЕАМ-систем в других отраслях позволяет выдвинуть гипотезу о том, что данные системы положительно повлияют на надёжность сельскохозяйственной техники и другие перечисленные показатели.

Цель исследований: автоматизация инженерных задач процессного управления мероприятиями ТО сельскохозяйственной техники с исследованием возможностей повышения показателей эксплуатационной надёжности обслуживаемых машин и снижения трудоёмкости управления сервисными процессами от применения предлагаемого ПО.

Материалы и методы. Применены методы теории надёжности, графов, марковских процессов для систем массового обслуживания; методология процессного управления; современные методы программирования и семантического моделирования информационных моделей данных, планирования

² Enterprise Asset Management. Системы управления основными фондами предприятия / TADVISER. Государство. Бизнес. Технологии: Деловой интернет-портал и аналитическое агентство. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/EAM> (дата обращения: 23.02.2023).

³ Там же.

экспериментальных исследований и обработки данных, методы технико-экономической оценки.

В качестве аналога CMMS-системы использовалась разработанная нами компьютерная программа «Агрокомплекс «АСУТО»» (свид. о гос. регистрации № 2020614673) в сочетании с ранее разработанными нами программой складского учёта «Агрокомплекс «Ресурсы»» (свид. о гос. регистрации № 2006611143) и программой учёта работы и потребления топлива машинно-тракторным парком «Агрокомплекс «МТП»» (свид. о гос. регистрации № 2006611144). Все программы являются Windows-приложениями. Обмен данными между программами возможен по локальной сети или с помощью флеш-носителей. В перспективе предполагается разработка облачного хранилища данных и web-интерфейсов перечисленных программ. Совокупность задач, решаемых тремя указанными программами, соответствует функционалу известных CMMS-систем. Рассматриваемая информационная система обладает следующими функциональными возможностями:

1. Поддержка процессного управления мероприятиями ТО МТП предприятия – планирование графиков ТО, контроль своевременности проведения и соответствия содержания ТО регламенту, учёт, документирование сервисных процессов по каждому техническому объекту. Возможность корректирования графиков ТО на основании данных диагностирования или по другим причинам.

2. Учёт наработки машин (в моточасах, кг израсходованного топлива) и простоев по техническим причинам, хранение истории отказов и мер по их устранению для каждого объекта.

3. Управление постановкой машин на ТО на основании наработки в принятых единицах измерения.

4. Информационное обеспечение технологий технического обслуживания (текстовое и графическое содержание регламента ТО, операционные карты).

5. Контроль надёжности эксплуатируемых машин и оценка применяемой стратегии ТО по показателю коэффициент технического использования $K_{\text{ТИ}}$.

6. Совместимость с системами ГЛОНАСС/GPS мониторинга (для автоматизации первичного учёта наработки по топливу).

7. Учёт расхода запасных частей каждой машиной, резервирование и составление заявок на запчасти.

Концептуальная модель данных рассматриваемой информационной системы приведена на схеме рисунка 1.

Модель центрируется относительно главной сущности «Машина», что позволяет реализовать принцип индивидуального подхода к каждой единице техники. Связи главной сущности с остальными сущностями

на схеме (рис. 1) отражают все основные потребности для поддержания жизненного цикла эксплуатируемого объекта. Модель также учитывает реальные информационные потребности инженерно-технических работников, участвующих в организации и проведении анализа процессов ТО машин, и ориентирована на обеспечение автоматизации оформления действующих инженерных документов. На основе концептуальной модели создана физическая модель базы данных с использованием СУБД Firebird.

Программа «АСУТО» устанавливалась на рабочий компьютер инженера и на ноутбук механика предприятия. На рисунке 2 показан графический интерфейс программы «АСУТО», который насыщен условными символами для облегчения восприятия информации оператором.

Справочный раздел базы данных программы настраивается на конкретное предприятие и содержит таблицы с информацией о парке тракторов и комбайнов предприятия, видах ТОР и об их регламенте содержания, а также о периодичности ТО машин (кг израсходованного топлива и моточасы). Программы «Ресурсы» и «МТП» используются техником склада запчастей и учётчиком полевой бригады соответственно для первичного учёта потребления машинами предприятия запчастей и топлива. Технически ввод первичной информации о наработке тракторов в программе «АСУТО» может осуществляться с помощью ручного ввода данных (моточасы или кг израсходованного топлива) пользователем программы; интеграции с базой данных программы «МТП» (кг топлива); интеграции с базой данных системы ГЛОНАСС/GPS мониторинга работы сельскохозяйственной техники (кг топлива).

Для сельскохозяйственных тракторов и комбайнов важным является соблюдение периодичности технического обслуживания, установленной заводом-изготовителем, поэтому концептуальная модель данных информационной системы и приложение «АСУТО» адаптированы для стратегии планово-предупредительного ТО. Но при необходимости приложение позволяет редактировать планы-графики ТО машин по результатам диагностирования или, например, если объекту при устранении отказа уже были выполнены некоторые операции очередного технического обслуживания.

Центрирование модели относительно сущности «Машина» позволяет в дальнейшем добавлять в модель новые блоки данных, ориентированные на развитие цифровых методов управления процессами, дистанционной диагностики, цифровых двойников составных частей машин, реализацию предиктивного ТО и др.

Исследована возможность сокращения затрат времени инженерно-технических работников на управление техническим обслуживанием ($T_{\text{ИТР}}$) с помощью

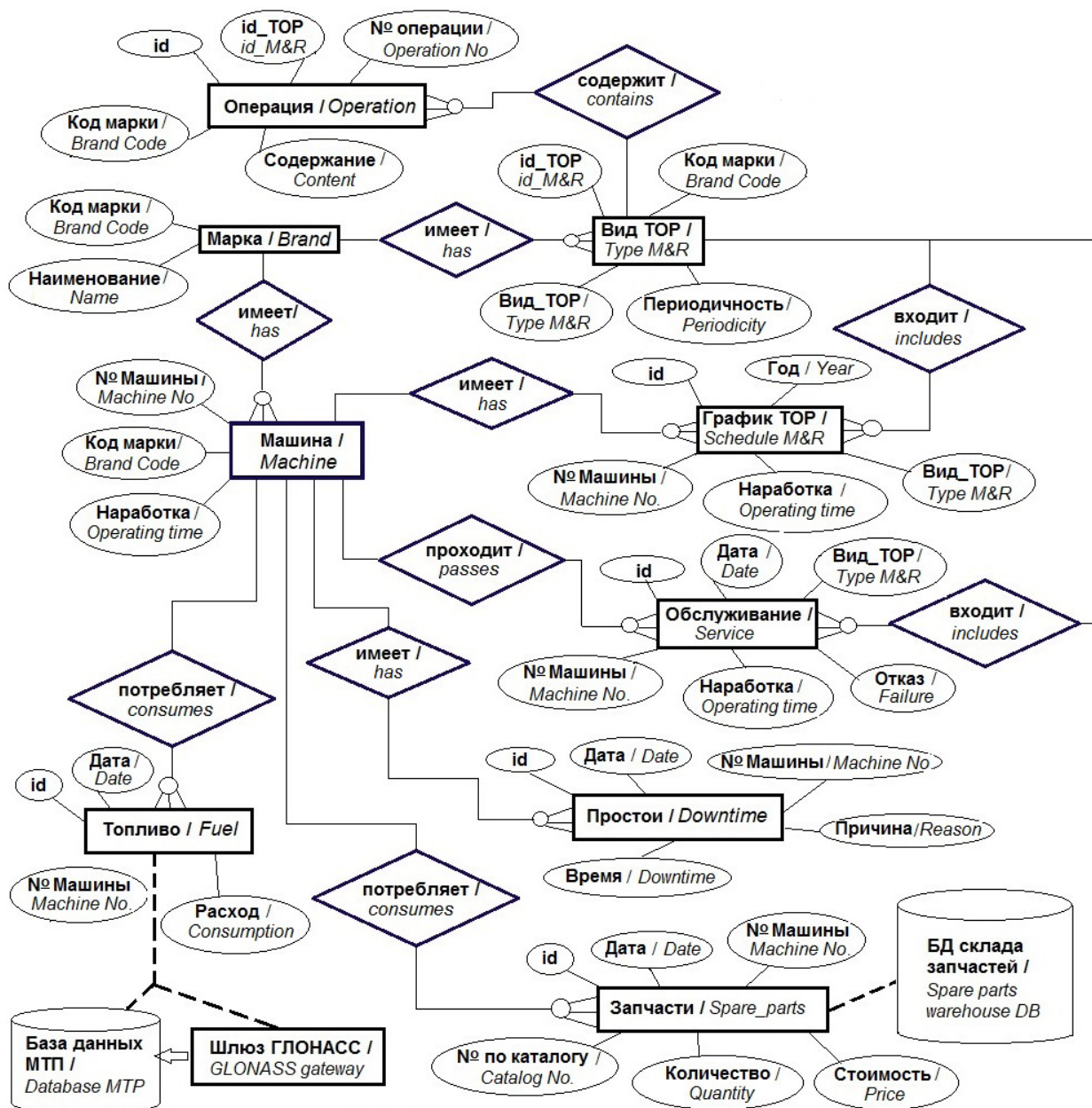


Рис. 1. Концептуальная модель данных информационной системы для управления техническим обслуживанием машин

Fig. 1. Conceptual model of information system data to manage the maintenance of machines

программы «АСУТО». Затраты времени можно представить в виде суммы:

$$T_{\text{ИТР}} = T_{\text{ГР}} + T_{\text{ПУН}} + T_{\text{АН}} + T_{\text{КТО}} + T_{\text{ДТО}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{ГР}}$ – время на планирование и разработку графиков ТО машин, ч; $T_{\text{ПУН}}$ – время на первичный учёт наработки машин, ч; $T_{\text{АН}}$ – время на анализ и расчёт остаточной наработки машины до технического обслуживания, ч; $T_{\text{КТО}}$ – время на проверку качества ТО, ч; $T_{\text{ДТО}}$ – время на оформление технических документов и журнала ТО по выполненному обслуживанию, ч.

Продолжительность каждой управленческой операции, рассматриваемой в формуле (1), измеряли по 50 раз в ручном и автоматизированном режиме

исполнения. Полученные результаты обрабатывали статистическими методами. Обычно операция составления графика ТО машины выполняется один раз в год, операции по управлению мероприятиями ТО повторяются многократно в течение года. Интенсивность использования машин в разных хозяйствах является различной, поэтому анализ затрат времени инженерно-технических работников на управление процессами ТО осуществлён для возможных парков отечественных машин при наработке каждой машины, соответствующей одному циклу ТО⁴ (табл. 1).

Оценка влияния специализированного ПО «АСУТО» на показатели надёжности обслуживаемых машин осуществлялась методом статистического

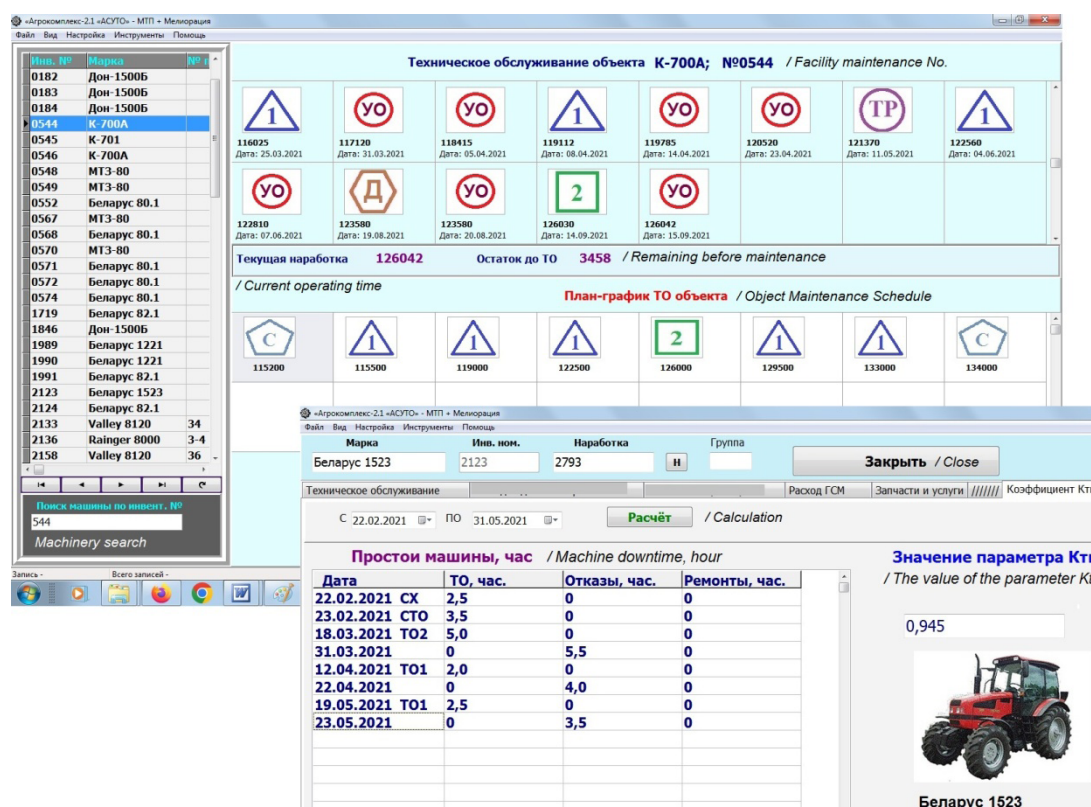


Рис. 2. Графический интерфейс программы «Агрокомплекс «АСУТО»»

Fig. 2. Graphical interface of the program “Agrokompleks ASUTO”

Таблица 1

Составы возможных парков используемых машин и общее количество обслуживаний за цикл ТО

Table 1

Composition of possible fleets of serviced machines and the total number of services per a maintenance cycle

Марка машин Make of machines	Количество машин (N_m , шт.), число ТО за цикл (N_{TO}) Number of machines N_m pcs., the number of maintenance N_{TO} per cycle					
	Вариант А / Option A		Вариант В / Option B		Вариант С / Option C	
	N_m	N_{TO}	N_m	N_{TO}	N_m	N_{TO}
Беларус 82.1 / Belarus 82.1	4	32	6	48	10	80
Беларус 1523 / Belarus 1523	3	24	4	32	5	40
К-744R2	3	24	3	24	5	40
ACROSS585	5	45	7	63	10	90
ИТОГО	15	125	20	167	30	250

исследования. В качестве оценочных показателей надёжности применялись коэффициент технического использования $K_{ТИ}$ по ГОСТ 27.002-2015, вероятность пребывания машин в работоспособном состоянии и параметр $MADT(t_1, t_2)$ – средняя накопленная продолжительность неработоспособного состояния за период времени $[t_1, t_2]$ по ГОСТ Р 27.010-2019.

На сельскохозяйственном предприятии Ростовской области, специализирующемся на выращивании зерновых и пропашных культур, картофеля и овощей, авторами

исследовалась группа из 25 тракторов: К-700А (2 шт.); К-744 (1 шт.); К-701 (1 шт.); Беларус 1221 (2 шт.); Беларус 1523 (4 шт.); Беларус 80/82 (15 шт.). В течение года тракторы выполняли операции по основной и поверхностной обработке почвы, внесению минеральных удобрений, посеву и посадке культур, по уходу за посевами, осуществляли транспортные и прочие работы. Показатели надёжности тракторов за 2018-2020 гг. (управление ТО вручную) сравнивались с показателями 2021 г. (после внедрения программы «АСУТО»).

⁴ Лесник Н.А. Совершенствование организации технического обслуживания сельскохозяйственной техники с применением специализированного программного обеспечения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Зерноград, 2022. 20 с.

Построение графиков ТО каждого трактора в программе «АСУТО» возможно при наличии плановой наработки трактора на предстоящий год в разрезе по кварталам или месяцам. Плановая наработка трактора получена авторами на основе анализа большого объёма данных о наработке по каждой единице техники за 16 лет применения на предприятии программы «МТП».

Процесс эксплуатации каждого трактора считали случайным. При этом в период полевых работ продолжительностью T с точки зрения надёжности трактор может пребывать в одном из четырёх состояний: S_1 – работоспособен; S_2 – находится на периодическом ТО; S_3 – неработоспособен и находится в состоянии эксплуатационного отказа, отказ устраняется оперативно; S_4 – неработоспособен и находится на внеплановом текущем ремонте. Переход из работоспособного состояния в любое другое характеризуется интенсивностью λ_{ij} , обратный переход – μ_{ji} . Для каждого состояния трактора определялась вероятность $P_i(t)$ в любой момент времени $t \in T$. Главным условием эффективности внедряемой системы управления ТО принято

$$P_1^{\text{ДО}}(t) < P_1^{\text{ПОСЛЕ}}(t), \quad (2)$$

где $P_1^{\text{ДО}}(t)$ и $P_1^{\text{ПОСЛЕ}}(t)$ – вероятности пребывания тракторов в работоспособном состоянии соответственно до внедрения программного обеспечения и после него.

Вероятности $P_i(t)$ определяли через систему дифференциальных уравнений Колмогорова для однородного непрерывного марковского процесса в стационарном режиме:

$$\begin{cases} P_1(t) = \frac{\mu_{21}P_2(t) + \mu_{31}P_3(t) + \mu_{41}P_4(t)}{(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14})}; \\ P_2(t) = \frac{\lambda_{12}P_1(t)}{\mu_{21}}; \\ P_3(t) = \frac{\lambda_{13}P_1(t)}{\mu_{31}}; \\ P_4(t) = \frac{\lambda_{14}P_1(t)}{\mu_{41}}; \\ P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Оценка средней накопленной продолжительности неработоспособного состояния для совокупности тракторов определялась по формуле:

$$MADT(t_1, t_2) = \frac{\sum_{i=1}^N H_{Ci}}{N}, \quad (4)$$

где H_{Ci} – общая продолжительность неработоспособного состояния i -го объекта за период времени t_1, t_2 .

Стоимостные расчёты выполнялись для функций информационной системы, связанных исключительно

с управлением ТО, поэтому учитывалась только стоимость внедрения программ «АСУТО» и «МТП». Функции информационной системы, связанные с резервированием запасных частей машин методом искусственного интеллекта с генетическим алгоритмом, описаны в работе [18].

Результаты и их обсуждение. Экспериментально определены статистические характеристики затрат времени ИТР, входящие в формулу (1). Среднее значение времени ТПУН на одну операцию до внедрения «АСУТО» составило 45,1 сек, после внедрения – 20,4 сек. Для времени ТДТО эти значения соответственно составляли 37,5 сек и 11,34 сек. Эксперименты показали, что затраты времени на составление графиков технического обслуживания ($T_{\text{тр}}$) в ручном исполнении могут составлять в среднем 0,5 часа на одну машину.

Автоматизация этой операции позволяет создавать годовой график ТО для одной машины за 1,5-2,0 мин. После внедрения «АСУТО» составляющая времени $T_{\text{ан}}$ исчезает из баланса, поскольку данная операция автоматизируется и расчёт выполняет программа.

Расчётное значение затрат времени ТИТР за цикл ТО для возможного парка машин А до внедрения АРМ «АСУТО» составляет 53,26 ч, после внедрения – 34,27 ч. Для парка В эти значения соответственно составили 66,52 и 40,93 ч, а для парка С – 99,65 и 61,68 ч. То есть затраты времени на управление процессами ТО после автоматизации снижаются на 35...38 %.

Абсолютные стоимостные затраты на управленческую инженерную деятельность в условиях возможных парков при внедрении только автоматизированных рабочих мест (АРМ) «АСУТО» увеличиваются по сравнению с ручным документооборотом на 16...65%, а при автоматизации первичного учёта наработки машин с использованием дополнительного АРМ «МТП» данные затраты увеличиваются на 100...153%. Если рассматривать сумму эксплуатационных затрат на управление процессами и на технологию проведения ТО, приведённых к наработке на цикл ТО, то в нашем случае для всех парков машин в структуре общих затрат затраты на управление с применением АРМ составили менее 2%.

Для группы из 25 наблюдаемых тракторов получены основные статистические характеристики затрат времени пребывания в различных состояниях S_i ; T_p , $T_{\text{ТО}}$, T_o , $T_{\text{рем}}$ – в течение периодов полевых работ до внедрения программы «АСУТО» и после него. В таблице 2 представлены данные характеристики в расчёте на один трактор. Здесь все случайные величины времени простоев тракторов описываются законом распределения Вейбулла.

После внедрения ПО увеличивается время пребывания машин на обслуживании ($T_{\text{ТО}}$), что объясняется

Основные статистические характеристики затрат времени пребывания тракторов в различных состояниях, ч

Таблица 2

Table 2

Main statistical characteristics of costs of time spent by tractors in various states, hour

Показатель Index	До внедрения «АСУТО» Before "ASUTO" software implementation				После внедрения «АСУТО» After "ASUTO" software implementation			
	T_p	T_{TO}	T_o	$T_{рем}$	T_p	T_{TO}	T_o	$T_{рем}$
Среднее / Average	1091,20	10,70	29,64	24,79	1155,48	16,68	13,86	19,72
Стандартное отклонение / Standard deviation	601,890	6,040	14,340	25,440	609,99	9,804	8,334	16,121
Дисперсия / Variance	362269,30	36,50	205,50	647,30	372091,50	96,12	69,45	259,88
Коэффициент вариации / Coefficient of variation	0,5516	0,5639	0,4837	1,0264	0,5279	0,5878	0,6013	0,8175

исключением пропусков отдельных регламентных операций и даже целых мероприятий ТО, для выполнения которых понадобилось время. Положительный эффект оказало снижение затрат времени пребывания тракторов в состоянии отказа (T_o) (рис. 3).

Параметр интенсивности λ_{13} перехода тракторов из работоспособного состояния S_1 в состояние отказа S_3 уменьшился на 37,86%. Средняя накопленная продолжительность неработоспособного состояния тракторов за период полевых работ до внедрения ПО составляла 65,5 ч, а после внедрения – 50,26 ч. Снижение данного параметра составляет 23%. Среднее значение коэффициента K_{TH} для парка тракторов после внедрения ПО увеличилось на 1,8%. Снижение времени T_o тракторов после внедрения новой методики управления ТО обусловлено уменьшением числа отказов их отдельных составных частей (данные получены с помощью складской программы «Ресурсы») (табл. 3).

Результаты расчёта вероятностей состояний тракторов по годам представлены в таблице 4.

Внедрение специализированного ПО привело к снижению суммарной вероятности пребывания тракторов

в простое по техническим причинам ($P_2 + P_3 + P_4$) с 0,062 до 0,046, то есть на 26%. В среднем вероятность P_i пребывания тракторов в работоспособном состоянии в период полевых работ увеличилась на 1,81%.

Дальнейшее развитие данной информационной технологии управления видим по следующим направлениям:

- обеспечение возможности автоматизированной разработки маршрутно-технологических графиков ТО машин [15];
- разработка Web-версии программного продукта «АСУТО» с облачной базой данных;
- интеграция с известными ГЛОНАСС/GPS-системами;
- развитие интеллектуальных методов RCM-анализа отказов и формирование оптимальных стратегий ТОР обслуживаемых объектов [19, 20];
- разработка типовых информационных моделей данных, охватывающих задачи управления техническим обслуживанием сельскохозяйственной техники.

Таблица 3

Снижение отказов агрегатов, узлов и деталей тракторов после внедрения ПО

Table 3

Reduction of failures of tractor units, assemblies and parts after software implementation

Наименование составной части Component name	Снижение числа отказов, % Failure rate reduction, %
Насосы НШ (все) Pumps NSh (all)	36,4
Компрессоры (все) Compressors (all)	40,0
Подшипники / Bearings	39,13
Ремни / Belts	26,2
Рукава РВД / Sleeves	32,14
Распылители форсунок Sprayers	44,0
Форсунки / Diesel injectors	37,83

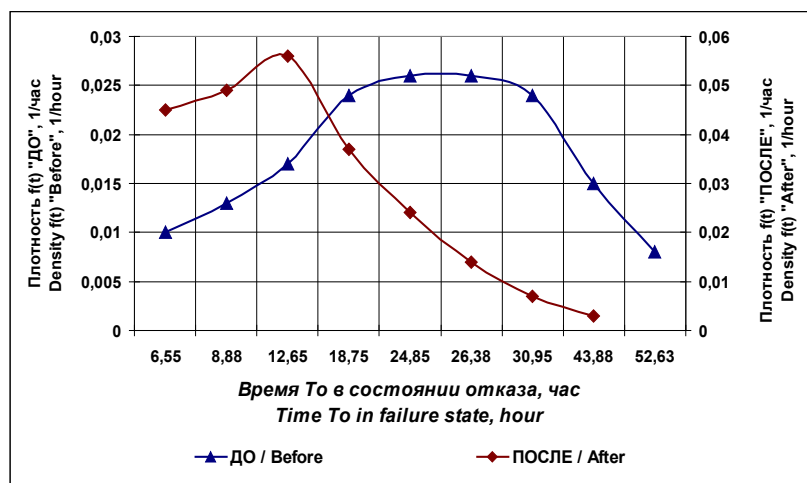


Рис. 3. Плотности распределения случайной величины T_o до внедрения ПО и после него

Fig. 3. Distribution densities of a random variable T_o before and after software implementation

Таблица 4

Значения вероятностей состояний группы тракторов

Table 4

Values of the states of probabilities for a group of tractors

Год / Year	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄
До внедрения ПО / Before software implementation				
2018	0,936	0,009	0,033	0,021
2019	0,933	0,010	0,031	0,024
2020	0,943	0,011	0,025	0,020
Среднее/Average	0,937	0,0102	0,030	0,022
После внедрения ПО / After software implementation				
2021	0,954	0,015	0,013	0,018

Представленные результаты исследований могут быть полезными для разработчиков ЕАМ-систем, ориентированных на управление ТОР сельскохозяйственной техники.

Выводы

Управление техническим обслуживанием сельскохозяйственной техники с помощью разработанного

программного обеспечения способствует повышению эксплуатационной надёжности сельскохозяйственной техники и снижению трудоёмкости управления процессами ТО. Снижение простоев машин в период эксплуатации обусловлено уменьшением числа отказов отдельных составных частей за счёт их предупреждения по результатам диагностирования и соблюдения периодичности и регламента ТО.

Список использованных источников

1. Brodny J., Tutak M. Assessing the level of digitalization and robotization in the enterprises of the European Union Member States. *PLoS ONE*. 2021;16(7): e0254993. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254993>
2. Крюкова А.А., Хисрава Я.Ш. Ключевые инструменты цифровой экономики и их влияние на деятельность современной компании // Азимут научных исследований: экономика и управление. 2019. Т. 8, № 3 (28). С. 214-216. EDN: QNPZQQ
3. Yang F., Gang Zh., Mingliang Zh., Fuzhen X. Digital Twin for Integration of Design-Manufacturing-Maintenance: An Overview. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2022;35:80. <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00760-x>
4. Водяников В.Т. Тенденции совершенствования технических средств и сменяемости технологических укладов производства // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 2. С. 76-80. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-2-76-80>
5. Зозуля Д.М. Цифровизация российской экономики и Индустрия 4.0: вызовы и перспективы // Вопросы инновационной экономики. 2018. Т. 8, № 1. С. 1-14. <https://doi.org/10.18334/vinec.8.1.38856>
6. Измайлов А.Ю., Хорошенко В.К., Лужнова Е.С. Управление сельскохозяйственными мобильными агрегатами с использованием навигационной системы ГЛОНАСС/GPS // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2015. № 3. С. 15-20. EDN: TTLVSB
7. Lee J., Ni J., Singh J., Jiang B., Azamfar M., Feng J. Intelligent Maintenance Systems and Predictive Manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2020;142(11):1-40. <https://doi.org/10.1115/1.4047856>
8. Власов А.И., Григорьев П.В., Кривошеин А.И. Модель предиктивного обслуживания оборудования с применением беспроводных сенсорных сетей // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 2 (22). С. 26-35. <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2018-2-4>
9. Костомахин Н.М., Воронов А.Н., Ковалев Л.И., Ковалев И.И. Контроль параметров надёжности сельскохозяйственной

References

1. Brodny J., Tutak M. Assessing the level of digitalization and robotization in the enterprises of the European Union Member States. *PLoS ONE*. 2021;16(7):e0254993. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254993>
2. Kryukova A.A., Khisravova Y.S. Key instruments of the digital economy and their impact on the activity of a modern company. *Azimuth of Scientific Research: Economics and Administration*. 2019;8(3):214-216. (In Rus.)
3. Yang F., Gang Zh., Mingliang Zh., Fuzhen X. Digital twin for integration of design-manufacturing-maintenance: an overview. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2022;35:80. <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00760-x>
4. Vodyannikov V.T. Trends in the improvement of technical means and the replaceability of technological modes of production. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(2):76-80. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-2-76-80>
5. Zozulya D.M. Digitalization of the Russian economy and industry 4.0: challenges and prospects. *Voprosy Innovatsionnoy Ekonomiki*. 2018;8(1):1-14. (In Rus.). <https://doi.org/10.18334/vinec.8.1.38856>
6. Izmaylov A.Yu., Khoroshenkov V.K., Luzhnova E.S. Control of agricultural mobile units with use of the GLONASS/GPS navigation system. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2015;(3):15-20. (In Rus.)
7. Lee J., Ni J., Singh J., Jiang B., Azamfar M., Feng J. Intelligent Maintenance Systems and Predictive Manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2020;142(11):1-40. <https://doi.org/10.1115/1.4047856>
8. Vlasov A.I., Grigoriev P.V., Krivoshein A.I. Model of predictive equipment maintenance with application of wireless touch networks. *Reliability & Quality of Complex Systems*. 2018;2(22):26-35. (In Rus.). <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2018-2-4>
9. Kostomakhin N.M., Voronov A.N., Kovalev L.I., Kovalev I.L. Control of reliability parameters of agricultural equipment with the use of GPS/GLONASS systems. *Trudy GOSNITI*. 2015;118:26-30. (In Rus.). EDN: TODEWR

техники с использованием систем GPS/ГЛОНАСС // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 118. С. 26-30. EDN: TODEWR

10. Бондаренко И.И. Определение и контроль оперативного мониторинга транспорта, диагностика режимов работы машинно-тракторного парка с помощью системы GPS мониторинга транспорта // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 4. С. 113-117. EDN: IRTIGX

11. Костомахин М.Н., Петрищев Н.А., Воронов А.Н., Саяпин А.С. Экспериментальная система дистанционного мониторинга технического состояния самоходных сельскохозяйственных машин // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2019. № 10. С. 48-57. EDN: BEHSQX

12. Измайлов М.К. Сравнительный анализ современных ЕАМ-систем, используемых в российской и зарубежной практике // BENEFICIUM. 2020. № 2 (35). С. 35-42. [http://doi.org/10.34680/BENEFICIUM.2020.2\(35\).35-42](http://doi.org/10.34680/BENEFICIUM.2020.2(35).35-42)

13. Wienker M., Henderson K., Volkerts J. The Computerized Maintenance Management System An essential Tool for World Class Maintenance. *Procedia Engineering*. 2016;138:413-420. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.02.100>

14. Кац Б.А., Антоненко И.Н., Молчанов А.Ю. Информационные системы управления производственными активами. История, состояние и перспективы. Ч. 1 // Трубопроводная арматура и оборудование. 2015. № 3 (78) С. 74-78. https://trim.ru/sites/default/files/files/pdf/information_systems_asset_management.pdf

15. Никитченко С.Л., Липкович И.Э., Мирошников А.М., Должиков В.В. Автоматизация проектирования маршрутных технологий технического обслуживания сельскохозяйственной техники // Вестник аграрной науки Дона. 2022. Т. 15, № 2 (58). С. 39-53. http://doi.org/10.55618/20756704_2022_15_2_39-53

16. Нужный А.М., Барабанов А.В., Гребенникова Н.И., Сафонов В.В. Организация обмена технологическими данными в системе 1С: PDM // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11, № 4. С. 26-29. EDN: UJKBHH

17. Дидманидзе О.Н., Пуляев Н.Н., Гузалов А.С. Формирование подхода к созданию цифрового двойника трактора сельскохозяйственного назначения // Известия Международной академии аграрного образования. 2022. № 61. С. 33-37. EDN: NBCUYG

18. Никитченко С.Л., Гринченков Д.В. Совершенствование методов резервирования запасных частей для сельскохозяйственной техники на основе генетических алгоритмов // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 25-31. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-25-31>

19. Sifonte J.R., Reyes-Picknell J.V. Reliability Centered Maintenance – Reengineered. Practical Optimization of the RCM Process with RCM-R. ProductivityPress, 2017. 367 p.

20. Антоненко И.Н. Методика приоритизации объектов обслуживания на основе оценки критичности отказов // В мире неразрушающего контроля. 2018. Т. 21, № 3. С. 68-72. https://doi.org/10.12737/article_5b8cf933596a37.05447226

Вклад авторов

С.Л. Никитченко – концептуализация, методология, программное обеспечение, руководство исследованием

Н.А. Лесник – методология, проведение исследования, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование

С.В. Смыков – ресурсы, визуализация, создание черновика рукописи

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 06.03.2023; поступила после рецензирования и доработки 18.04.2023; принята к публикации 17.05.2023

10. Bondarenko I.I. Determination and control of operational monitoring of transport, diagnostics of working modes of the machine-tractor fleet using the GPS system of transport monitoring. *Vestnik Belorusskoy Gosudarstvennoy Selskhozaystvennoy Akademii*. 2021;(4):113-117. (In Rus.)

11. Kostomahin M.N., Petrishchev N.A., Voronov A.N., Sayapin A.S. Experimental system of remote monitoring of technical condition of self-propelled agricultural machines. *Selskhozaystvennaya Tekhnika: Obsluzhivanie i Remont*. 2019;(10):48-57. (In Rus.) EDN: BEHSQX

12. Izmaylov M.K. Comparative analysis of modern EAM-systems used in Russian and foreign practice. *BENEFICIUM*. 2020;2(35):35-42. (In Rus.) [http://doi.org/10.34680/BENEFICIUM.2020.2\(35\).35-42](http://doi.org/10.34680/BENEFICIUM.2020.2(35).35-42)

13. Wienker M., Henderson K., Volkerts J. The Computerized Maintenance Management System An essential Tool for World Class Maintenance. *Procedia Engineering*. 2016;138:413-420. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.02.100>

14. Kats B.A., Antonenko I.N., Molchanov A.Yu. Information systems for managing production assets. History, state and prospects. Part 1. *Truboprovodnaya armatura i oborudovanie*. 2015;3(78):74-78. (In Rus.) https://trim.ru/sites/default/files/files/pdf/information_systems_asset_management.pdf

15. Nikitchenko S.L., Lipkovich I.E., Miroshnikov A.M., Dolzhikov V.V. Automation of the design of route technologies for the maintenance of agricultural machinery. *Vestnik agrarnoy nauki Dona = Don Agrarian Science Bulletin*. 2022;15-2(58):39-53. (In Rus.) http://doi.org/10.55618/20756704_2022_15_2_39-53

16. Nuzhnyi A.M., Barabanov A.V., Grebennikova N.I., Safronov V.V. Organizing the exchange technological data in the 1C: PDM. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2015;11(4):26-29. (In Rus.)

17. Didmanidze O.N., Pulyaev N.N., Guzalov A.S. Forming an approach to designing a digital twin of agricultural tractor. *Izvestiya Mezhdunarodnoy Akademii Agrarnogo Obrazovaniya*. 2022;(61):33-37. (In Rus.)

18. Nikitchenko S.L., Grinchenkov D.V. Improving the methods of reserving spare parts for agricultural machinery based on genetic algorithms. *Agricultural Engineering*. 2022;24(6):25-31. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-25-31>

19. Sifonte J.R., Reyes-Picknell J.V. Reliability Centered Maintenance – Reengineered. Practical Optimization of the RCM Process with RCM-R. ProductivityPress, 2017. 367 p.

20. Antonenko I.N. Risk-based prioritization technique of maintenance objects. *NDT World*. 2018;21(3):68-72. (In Rus.) https://doi.org/10.12737/article_5b8cf933596a37.05447226

Contribution of the authors

S.L. Nikitchenko – conceptualisation, methodology, software, research supervision

N.A. Lesnik – methodology, conducting the study, revision and editing of the final manuscript

S.V. Smykov – resources, visualisation, original manuscript drafting

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 06.03.2023; revised 18.04.2023; accepted 17.05.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.43: 629. 113

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-43-51

**Математическое моделирование детонации в двигателях с искровым зажиганием****Капустин Александр Васильевич**, канд. техн. наук, доцент¹

aleksandr.kapustin@novsu.ru

Чумаков Валерий Леонидович✉, канд. техн. наук, профессор²valery.chumakov@gmail.com✉; <https://orcid.org/0000-0002-1442-4416>**Девянин Сергей Николаевич**, д-р техн. наук, профессор²devta@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6776-0432>**Жоробеков Болотбек Астаевич**, канд. техн. наук, доцент³

bolot60@rambler.ru

¹ Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого; 173003, Российская Федерация, г. Великий Новгород, Большая Санкт-Петербургская ул., 41² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49³ Ошский технологический университет имени М. Адышева; 723503, Кыргызская Республика, г. Ош, ул. Исанова, 81

Аннотация. Математическое моделирование детонации, прогнозирующее самовоспламенение топливно-воздушной смеси, упрощает регулирование двигателей и позволяет находить эффективные методы улучшения антидетонационных свойств двигателей. Анализ расчётной модели термодинамического цикла поршневого двигателя с искровым зажиганием, приближенной к действительному циклу, позволяет с достаточной точностью определять во времени изменения текущего давления цикла и температуры несгоревшей части заряда. Модель учитывает теплообмен между зонами горения заряда и стенками камеры сгорания. Начало детонации связано с моментом самовоспламенения несгоревшей части заряда и определено в зависимости от термодинамических параметров несгоревшей части заряда и кинетического механизма предпламенных химических процессов в топливно-воздушной смеси. Показано, что математическое моделирование механизма развития самовоспламенения несгоревшей части заряда в поршневых двигателях внутреннего сгорания с искровым зажиганием можно выполнять так же, как и моделирование механизма развития самовоспламенения топливно-воздушной смеси в условиях продолжающегося сжатия в установках со свободно летящим поршнем. Точность расчёта самовоспламенения по модели цикла проверена экспериментально путём индизирования на различных скоростных режимах при различных коэффициентах избытка воздуха и наполнения, различных температурах смеси во впускном трубопроводе. Результаты моделирования проверены экспериментально на изоктане и октановой смеси (60% изоктана), и на товарных бензинах. Установлено, что при невысокой степени сжатия (до 5-7) преобладает низкотемпературный механизм самовоспламенения, при больших степенях – высокотемпературный механизм. Граница возникновения детонации в ДВС может быть определена по моменту самовоспламенения (взрыва) в несгоревшей части заряда при остаточной цикловой доле несгоревшего топлива не менее 10%.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием, детонация, математическое моделирование детонации, задержки самовоспламенения, расчёт момента самовоспламенения

Формат цитирования: Капустин А.В., Чумаков В.Л., Девянин С.Н., Жоробеков Б.А. Математическое моделирование детонации в двигателях с искровым зажиганием // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 43-51. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-43-51>.

© Капустин А.В., Чумаков В.Л., Девянин С.Н., Жоробеков Б.А., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Mathematical modeling of engine detonation in spark ignition engines**Aleksandr V. Kapustin**, CSc (Eng), Associate Professor¹

aleksandr.kapustin@novsu.ru

Valery L. Chumakov✉, CSc (Eng), Professor²valery.chumakov@gmail.com✉; <https://orcid.org/0000-0002-1442-4416>

Sergey N. Devyanin, DSc (Eng), Professor²

devta@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6776-0432>

Bolotbek A. Zhorobekov, PhD (Eng), Associate Professor³

bolot60@rambler.ru

¹ Novgorod State University named after Yaroslav the Wise; 173003, Russian Federation, Veliky Novgorod, Bolshaya St. Petersburg st., 41

² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127550, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya st., 49

³ Osh Technological University named after M. Adyshev; 723503, Kyrgyz Republic, Osh, Isanov st. 81

Abstract. Adjusting engines with a high compression ratio operating on traditional gasoline grades is simplified by the application of mathematical models of the operating cycle that predict the self-ignition of the fuel-air mixture. Mathematical simulation of detonation based on the analysis of a computational model of the thermodynamic cycle of a spark-ignited piston engine, which is close to the actual cycle, can be used to determine with sufficient accuracy in time the change in the current cycle pressure and the temperature of the unburned part of the charge. The model takes into account the heat exchange between the combustion zones of the charge and the walls of the combustion chamber. The onset of detonation is associated with the point of self-ignition of the unburned part of the charge and is determined depending on the thermodynamic parameters of the unburned part of the charge and the kinetic mechanism of pre-ignition chemical processes in the fuel-air mixture. It is shown that mathematical modeling of the self-ignition of the unburned part of the charge in a spark-ignition piston-type internal combustion engine can be performed in the same way as the modeling of self-ignition of the fuel-air mixture under continuing compression in units with a free-sliding piston. The accuracy of the self-ignition calculation using the cycle model has been experimentally verified by indicating it at different speeds and at different excess air and charge volume ratios, as well as different mixture temperatures in the intake manifold. The simulation results were verified experimentally on isooctane and octane blends (60% isooctane) and on commercial gasoline. It was found that at low compression ratios (up to 5 to 7), the low-temperature mechanism of self-ignition prevails, while at higher compression ratios, the high-temperature mechanism prevails. The detonation limit of an internal combustion engine can be determined by the point of self-ignition (explosion) in the unburned part of the charge at a residual cycle fraction of unburned fuel of at least 10%.

Key words: internal combustion engine with spark ignition, engine detonation, mathematical modeling of detonation, self-ignition delays, calculation of the point of self-ignition.

For citation: Kapustin A.V., Chumakov V.L., Devyanin S.N., Zhorobekov B.A. Mathematical modeling of engine detonation in spark ignition engines. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(4):43-51. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-43-51>.

Введение. Несмотря на новые тенденции в развитии автотракторного двигателестроения, двигатели с искровым зажиганием широко используются не только на легковых автомобилях, но и в средствах малой механизации, позволяя существенно увеличить производительность ручного труда. В целях повышения мощности и топливной экономичности развитие современных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с искровым зажиганием направлено на повышение степени сжатия. Рост степени сжатия при создании двигателей ограничен октановыми числами применяемых традиционных бензинов и возможными нарушениями процесса сгорания в виде детонации. Тем не менее современный двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием (Хонда, Тойота) может обеспечивать достижение степени сжатия до 14...16 ед.

В связи с расширением использования природного газа или биогаза в качестве топлива для автотракторных двигателей возросла актуальность исследований детонационных свойств двигателей. Высокие детонационные свойства этого топлива позволяют

использовать на двигателе высокую степень сжатия и наддув [1-3]. Экспериментальная доводка таких двигателей и поиск их оптимального регулирования даже в условиях цифрового компьютерного регулирования представляют сложную задачу. Особые условия процессов воспламенения и сгорания требуют своего решения и в двухтопливных газодизельных двигателях, особой проблемой которых может быть детонация обеднённой газозооушной смеси в условиях высокой степени сжатия [4-5]. Поиск оптимального регулирования двигателей с высокой степенью сжатия, использующих традиционные сорта бензина, может быть существенно упрощён при разработке и использовании математических моделей рабочего цикла, прогнозирующих самовоспламенение топливо-воздушной смеси.

Цель исследований: проанализировать существующие теоретические и экспериментальные данные по оценке задержек самовоспламенения топливно-воздушных смесей различного состава, уточнить механизм самовоспламенения и последующей детонации. Разработать математическую модель рабочего

цикла с учётом моделирования механизма детонации заряда в цилиндре двигателя.

Материалы и методы. Под детонацией в поршневом двигателе с искровым зажиганием понимается детонационная волна скачка давления, представляющая собой ударную волну, которая поддерживается энергией от сгорания остаточной дозы топлива. Этой энергии достаточно для поддержания волны во времени и многократного отражения ее от стенок.

Для математического моделирования детонации нужно знать механизм зарождения ударной волны и необходимое минимальное остаточное количество топлива, энергии которого достаточно как для зарождения ударной волны, так и для поддержания ее во времени.

В настоящее время нет единого мнения о механизме зарождения ударных волн в двигателе с искровым зажиганием. Сторонники одной точки зрения считают, что ударная волна зарождается в результате аккумуляции элементарных волн давления, возникающих от движущегося с ускорением фронта пламени по аналогии с зарождением ударной волны при сгорания горючих газовых смесей в трубах. В этом случае нужно иметь математический аппарат аккумуляции (наложения и суммирования) элементарных волн повышения давления от фронта пламени с учётом механизмов предпламенных экзотермических химических реакций в этих волнах. Но это достаточно сложная задача, которая требует дополнительных экспериментальных исследований.

Согласно другой точке зрения детонация зарождается в результате самовоспламенения порций заряда, до которого фронт горения доходит в последнюю очередь. Такого взгляда придерживаются большинство исследователей, и в данной работе математическое моделирование детонации основано на теории самовоспламенения последних порций заряда. В этом случае волновыми возмущениями от фронта пламени пренебрегают и определяют момент самовоспламенения в зависимости от термодинамических параметров несгоревшей части заряда и кинетического механизма предпламенных химических процессов в топливно-воздушной смеси.

Момент самовоспламенения определяется на основе выражения

$$y = \int_0^{\tau} w \cdot d\tau \geq y_{кр}, \quad (1)$$

где y – текущая концентрация активных частиц (радикалов) в ходе предпламенных химических реакций; $y_{кр}$ – некоторая критическая концентрация этих частиц (константа), при которой возникает самовоспламенение (взрыв); w – формально-кинетическое выражение скорости брутто-реакции предпламенных процессов, которая в момент взрыва достигает критического значения $w_{кр}$; τ – время.

Формально-кинетическое выражение скорости брутто-реакции в общем случае имеет вид:

$$w = A \cdot p^m \cdot e^{-E/(R \cdot T)}, \quad (2)$$

где $A = \text{const}$ – предэкспонентный множитель; m – эмпирический показатель, характеризующий условный порядок брутто-реакции; p , T – термодинамические давление и температура газовой смеси; $E = \text{const}$ – величина, условно характеризующая энергию активации; R – универсальная газовая постоянная.

Подставив (2) в (1), разделив обе части на $y_{кр}$ и обозначив $y / y_{кр} = J$; $\frac{A}{y_{кр}} = A'$, получим:

$$J = A' \cdot \int_0^{\tau} p^m \cdot e^{-E/(R \cdot T)} \cdot d\tau \geq 1. \quad (3)$$

Выражение (3) показывает, что как только текущее значение интеграла J превысит значение 1, происходит самовоспламенение (взрыв) горючей смеси.

Условные кинетические константы (A' , m , E) определяются экспериментальным путем или непосредственно в условиях поршневых двигателей внутреннего сгорания (ПДВС), или в специальных установках по исследованию самовоспламенения горючих газовых смесей.

Для условий поршневых ДВС хорошо зарекомендовало себя кинетическое выражение Дауда и Ейза, полученное для эталонных изоктано-гептановых смесей [6]:

$$\frac{1}{19,75} \cdot \left(\frac{ON}{100} \right)^{-3,4107} \cdot \int_0^{\tau} (10,2 \cdot p)^{1,7} \cdot e^{-3800/T_n} \cdot d\tau \geq 1, \quad (4)$$

где ON – октановое число топлива (процентная объемная доля изоктан в смеси с нормальным гептаном); p – текущее термодинамическое давление цикла; T_n – текущая термодинамическая температура несгоревшей части заряда; τ – время.

Результаты и их обсуждение. Исследования в специальных установках показали, что условия самовоспламенения несгоревшего заряда в двигателях наиболее приближены в поршневых установках адиабатического (импульсного) сжатия. Исследовать самовоспламенение можно двумя способами: в условиях постоянного объема в установках со стопорением поршня и в условиях продолжающегося сжатия в установках со свободно летящим поршнем. В первом случае изучают длительность задержек самовоспламенения, а в случае продолжающегося сжатия со свободно летящим поршнем – термодинамические давление и температуру, при которых происходит самовоспламенение (взрыв) газовой смеси.

Исследование самовоспламенения при постоянном объеме происходит в строго контролируемых условиях и позволяет точнее и глубже изучить механизм самовоспламенения. В работе А.Н. Воинова и Д.И. Скороделова¹ выполнены исследования самовоспламенения

двух эталонных топлив: изооктана (ОЧ100) и топливной эталонной смеси, состоящей из 60% по объёму изооктана и 40% нормального гептана (ОЧ60). Изучались горючие смеси стехиометрического состава при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$. Показано, что изооктан и изооктано-гептановые смеси имеют двухстадийный механизм самовоспламенения. Суммарная задержка самовоспламенения определяется суммой задержек: низкотемпературной (холоднопламенной) стадии (z_{HT}) и высокотемпературной стадий (z_{BT}):

$$z = z_{\text{HT}} + z_{\text{BT}}. \quad (5)$$

Задержку холоднопламенной стадии авторы подразделяют на две составляющие:

$$z_{\text{HT}} = z_1 + z_2. \quad (6)$$

Каждая из задержек z_j (z_1, z_2, z_{BT}) описывается кинетическим выражением в форме закона Аррениуса:

$$z_j = 10^{A_j} \cdot (10,2 \cdot p)^{n_j} \cdot e^{B_j/T}, \quad (7)$$

где p, T – термодинамические давление и температура в конце сжатия; A_j, n_j, B_j – эмпирические показатели топлива.

В работе¹ определены значения A_j, n_j, B_j , которые представлены в таблице.

Сравнение экспериментальных и расчётных задержек самовоспламенения по приведенным формулам показало достаточно высокую точность расчета (рис. 1).

Условия самовоспламенения в продолжающемся сжатии отличаются от условий самовоспламенения при постоянном объёме. В некоторых работах^{2,3} встречаются возражения по поводу возможности

Таблица

Значения эмпирических показателей A_j, n_j, B_j

Values of empirical indicators A_j, n_j, B_j

Table

Обозначение задержки Delay indication		Показатели Indicator	Изооктан (ОЧ100) Isooctane (O.N.)	Смесь 60 об.% изооктана, 40% нормального гептана (ОЧ60) Blend: 60% v/v isooctane and 40% normal heptane (O.N. 60)
z_{HT}	z_1	A_1	-7,06	-6,73
		n_1	0,367	0,325
		B_1	14000	13000
	z_2	A_2	8,07	$10,77 - 85 \cdot 10,2 \cdot p / T - 780 / T$
		n_2	1,89	$5,21 - 1900 / T$
		B_2	-7730	$189,8 \cdot 10,2 \cdot p - 10648$
z_{BT}		A_{BT}	-4,0	-6,01
		n_{BT}	1,38	0,925
		B_{BT}	14500	16900

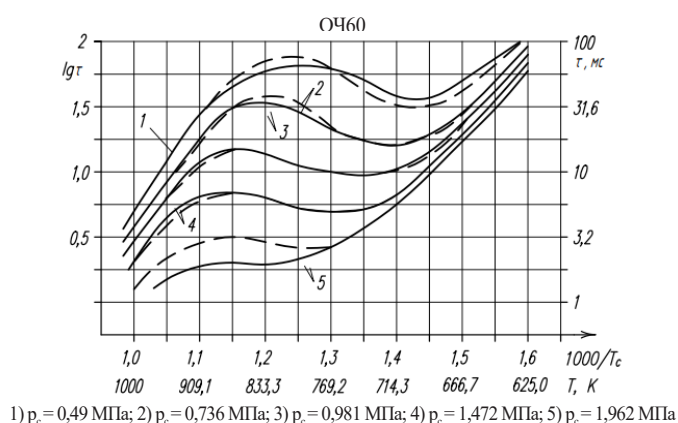
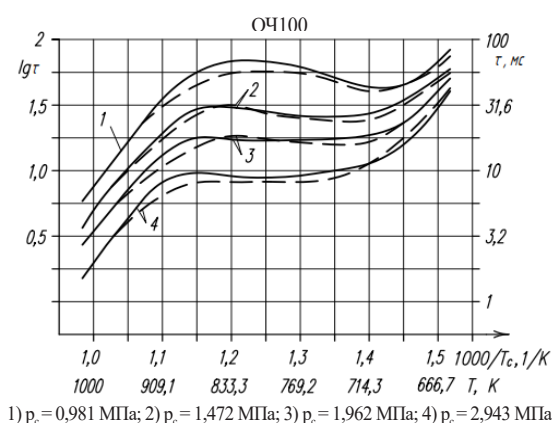


Рис. 1. Сравнение расчётных и экспериментальных задержек самовоспламенения в условиях постоянного объёма (коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,0$):

— эксперимент; --- расчёт¹

Fig. 1. Self-ignition delays under constant volume conditions at the air-fuel ratio $\alpha = 1.0$:

— experiment; --- calculation¹

¹ Воинов А.Н., Скороделов Д.И. Анализ макрокинетических зависимостей при низко- и высокотемпературном самовоспламенении углеводородоздушных смесей // Труды МАДИ. Двигатели внутреннего сгорания. 1972. Вып. 49. С. 82-90.

использования формально-кинетических выражений, полученных в условиях постоянного объёма, для расчёта момента самовоспламенения (взрыва) в процессе продолжающегося сжатия. Так, А.Н. Воинов отмечает, что при самовоспламенении в процессе продолжающегося сжатия задержки «...подчиняются существенно иным зависимостям, чем при самовоспламенении в условиях постоянного объёма»¹. В исследованиях эти утверждения проверены. Для этого использованы данные работы [7] экспериментальных исследований самовоспламенения топливно-воздушных смесей стехиометрического состава тех же эталонных топлив (ОЧ100 и ОЧ60) в установке импульсного сжатия со свободно летящим поршнем. В работе [7] измерялось давление самовоспламенения (взрыва) в условиях продолжающегося сжатия при разных скоростях поршня.

Момент самовоспламенения в продолжающемся сжатии можно определить интегрированием по формуле:

$$J = \int_0^{\tau} (1/z) \cdot d\tau \geq 1, \quad (8)$$

где z – эмпирическое выражение задержки самовоспламенения, полученного в условиях постоянного объёма; τ – время.

Выражение (8) получается из (1) и (3) с учётом того, что задержка самовоспламенения z обратно пропорциональна скорости брутто-реакции w , то есть $z \sim 1/w$. Когда значение $J = \int_0^{\tau} (1/z) \cdot d\tau = 1$, скорость брутто-реакции или концентрация активных частиц достигают критического значения и происходит взрыв.

Интегрирование по (8) выполнялось численным методом трапеций по специально разработанной для этого программе. Текущие термодинамические давление и температура сжатия определялись по формулам:

$$P = \left(\frac{440}{440 - S} \right)^k \cdot P_0;$$

$$T = \left(\frac{440}{440 - S} \right)^{k-1} \cdot T_0, \quad (9)$$

где P_0 и T_0 – термодинамические давление и температура в начале сжатия [7]; 440 – максимальный ход поршня используемой установки импульсного сжатия, мм; S – текущее положение поршня; k – показатель адиабаты (отношение истинных изобарной и изохорной теплоёмкостей).

Интегрирование выполнялось с шагом по времени:

$$\Delta\tau = \Delta S / C_n, \quad (10)$$

где ΔS – шаг перемещения поршня (принято $\Delta S = 0,2$ мм); C_n – средняя скорость поршня [7].

² Воинов А.Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. М.: Машиностроение, 1977. 277 с.

³ Броне Д. Сгорание в поршневых двигателях. М.: Машиностроение, 1969. 248 с.

В работе [7] представлены графические зависимости давлений самовоспламенения от скорости нарастания давления в момент появления холодного пламени (начало низкотемпературной стадии). Поэтому в программе определялась скорость нарастания давления $\Delta p / \Delta \tau = (p_i - p_{i-1}) / \Delta \tau$.

Пример расчёта одной точки самовоспламенения изоктана при средней скорости поршня $C_n = 10$ м/с представлен на рисунке 2. Давление, при котором появлялось холодное пламя для изоктана в опытах [7], равнялось $p_{xn} = 7,4$ МПа вне зависимости от скорости поршня. Поэтому в расчётах по программе скорость нарастания давления $\Delta p / \Delta \tau$ определялась также при давлении 7,4 МПа, как показано на рисунке 2. По аналогии определялись все расчётные точки как для изоктана (ОЧ100), так и для ОЧ60. На рисунке 3 представлены построенные графики, где также показаны экспериментальные точки [7].

Из рисунка 3 следует, что расчёты момента самовоспламенения в продолжающемся сжатии по формулам

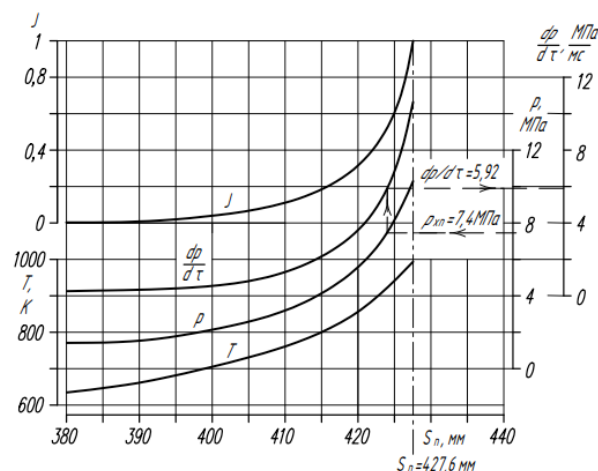


Рис. 2. Пример расчёта момента самовоспламенения изоктана

Fig. 2. Example of isooctane self-ignition calculation

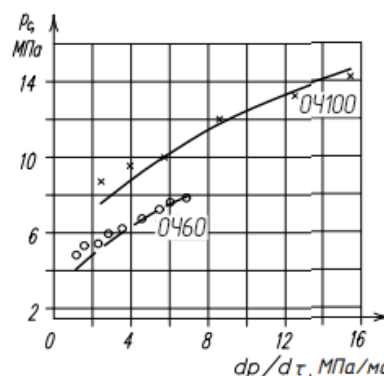


Рис. 3. Сравнение расчётных давлений самовоспламенения с экспериментальными: — расчёт; ×, ° – эксперимент [7]

Fig. 3. Comparison of calculated and experimental self-ignition pressures: — calculated; ×, ° – experiment [7]

задержек самовоспламенения, полученных при постоянном объёме, дают вполне приемлемую точность расчётов. Наблюдаемое небольшое отклонение расчётов от экспериментальных точек в области низких скоростей поршня можно объяснить утечками газа через неплотности, отклонением процесса сжатия от адиабатного ввиду теплоотдачи в стенки, доля которых растёт по мере снижения скорости поршня.

Для математического моделирования детонации в двигателе нужно определять моменты самовоспламенения топлива с различной антидетонационной стойкостью. Возникает вопрос о том, можно ли с помощью имеющихся формально-кинетических выражений самовоспламенения двух топлив (низкооктанового и высокооктанового) выполнять расчёты момента самовоспламенения смеси этих топлив.

Допустим, что предпламенные химические реакции каждого топлива, входящего в топливную смесь, протекают независимо друг от друга, а общая скорость brutto-реакции пропорциональна их мольным долям:

$$w_{\text{см}} = r_{100} \cdot w_{100} + r_{60} \cdot w_{60}, \quad (11)$$

где r_{100} , r_{60} – мольные доли соответственно ОЧ100 и ОЧ60; w_{100} и w_{60} – скорости предпламенных химических реакций ОЧ100 и ОЧ60.

Соответственно задержка самовоспламенения смеси этих топлив –

$$\frac{1}{z_{\text{см}}} = \frac{r_{100}}{z_{100}} + \frac{r_{60}}{z_{60}}, \quad (12)$$

где z_{100} , z_{60} – задержки самовоспламенения ОЧ100 и ОЧ60; $z_{\text{см}}$ – задержка самовоспламенения топливной смеси, состоящей из изоктана, 60 об.% изоктана и 40% нормального гептана.

Учитывая, что молярные массы и плотности топлив ОЧ100 и ОЧ60 незначительно отличаются по величине, можно допустить, что мольные доли равны их объёмным долям в жидкой фазе. В этом случае октановое число смеси топлив ОЧ100 и ОЧ60 можно определить по формуле:

$$\text{ОЧ}_{\text{см}} = r_{100} \cdot 100 + r_{60} \cdot 60. \quad (13)$$

Например, если объёмная доля ОЧ100 (в жидкой фазе) равна $r_{100} = 0,3$, а объёмная доля ОЧ60 равна $r_{60} = 0,7$, то октановое число топливной смеси $\text{ОЧ}_{\text{см}} = 0,3 \cdot 100 + 0,7 \cdot 60 = 72$ ед.

В работе [7] даны графические зависимости задержек самовоспламенения для эталонной смеси с октановым числом ОЧ = 78 ед. (78 об.% изоктана и 22% н. гептана), полученные экспериментальным путем при тех же условиях, что и для задержек самовоспламенения ОЧ100 и ОЧ60.

Из двух эталонных топлив ОЧ100 и ОЧ60 изоктано-гептановая смесь с ОЧ = 78 получается, если объёмные доли этих топлив равны $r_{100} = 0,45$ и $r_{60} = 0,55$.

Задержки самовоспламенения эталонной смеси с ОЧ = 78 ед., рассчитанные по формуле (12), сопоставлены с экспериментальными данными таблицы [7]. Результаты анализа показали достаточно хорошую точность расчёта (рис. 4).

Если величину $1/z = z^{-1}$ назвать обратной задержкой, то выражение (12) можно интерпретировать так: обратная задержка смеси двух топлив равна сумме произведений объёмных долей этих топлив на их обратные задержки.

Это правило требует дополнительных подтверждений, но для углеводородов одной группы (в рассмотренном случае это алканы) в сравнительно небольшом диапазоне антидетонационной стойкости двух топлив (низкооктанового и высокооктанового) может быть вполне приемлемым.

Для математического моделирования детонации в двигателе подойдёт любая математическая модель термодинамического цикла поршневого двигателя с искровым зажиганием, приближенная к действительному циклу, которая с приемлемой точностью определяет во времени текущее давление цикла и температуру несгоревшей части заряда. В исследованиях была использована математическая модель цикла, разработанная группой авторов⁴ [8] и дополненная расчётом теплообмена А.В. Капустиным⁵. Основные особенности данной математической модели цикла изложены в учебнике⁶. Отметим, что в модели теплоотдача в стенки рассчитывается как от сгоревших зон, так и от несгоревшей части, а передача теплоты от сгоревшей к несгоревшей части заряда не учитывается, потому что турбулентная

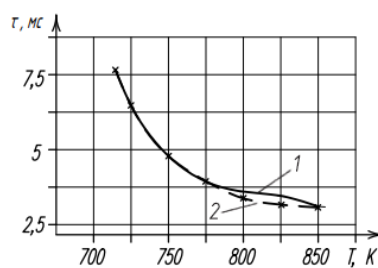


Рис. 4. Задержки самовоспламенения для эталонной смеси с ОЧ = 78 в условиях постоянного объёма:

1 – эксперимент; 2 – расчёт

Fig. 4. Self-ignition delays for a reference mixture with O.N. = 78:

1 – experiment; 2 – calculation

⁴ Максимов А.Л., Черняк Б.Я. Расчётная модель действительного цикла двигателя внутреннего сгорания // Сборник научных трудов. М.: МАДИ, 1976. С. 74-81.

⁵ Капустин А.В. Расчёт цикла ДВС при многозонной модели с учётом теплопотерь в стенки. Рабочие процессы автотракторных двигателей и их агрегатов // Сборник научных трудов. М.: МАДИ, 1983. С. 75-83.

⁶ Двигатели внутреннего сгорания: Учебник для вузов. Кн. 3. Компьютерный практикум. Моделирование процессов в ДВС / Под ред. В.Н. Луканина, М.Г. Шатрова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2005. 414 с.

скорость горения больше скорости переноса теплоты теплопроводностью.

Расчёт момента самовоспламенения в несгоревшей части заряда выполняется как по формулам (5-7) в первом варианте (в условиях постоянного объёма), так и по формуле (4) во втором варианте (в условиях продолжающегося сжатия).

Точность расчёта самовоспламенения по модели цикла проверена экспериментально путём индицирования на различных скоростных режимах при различных коэффициентах избытка воздуха (α) и наполнения (η_v), различных температурах смеси во впускном трубопроводе ($t_{см}$). Более тщательно она проверена на изоктане и 60-октановой смеси, выборочно на отдельных режимах проверялась на эталонных смесях с ОЧ от 60 до 100 ед. и на товарных бензинах. Точность расчёта оценивалась по разности углов начала детонации (расчётного φ_p и экспериментального φ_o), то есть $\Delta\varphi_p = \varphi_p - \varphi_o$, наблюдающейся в ходе сгорания, после – в виде резкого повышения давления после верхней мёртвой точки ВМТ (схематично показано на рисунке 5).

Результаты проверки модели представлены на рисунках 6, 7.

Можно отметить, что математическая модель показывает неплохую точность расчёта момента самовоспламенения по обоим вариантам и с качественной стороны правильно прослеживает самовоспламенение при изменении параметров и режима работы двигателя.

При экспериментальной проверке модели рассчитывалась доля сгоревшего топлива к моменту самовоспламенения при различной интенсивности детонации. Интенсивность детонации оценивалась инструментально по начальному скачку давления Δp (рис. 5). Технические возможности не позволяют измерить абсолютное значение давлений в детонационной волне, но косвенно величина Δp может характеризовать интенсивность детонации.

На рисунке 8 показана связь между долей горевшего топлива X и величиной скачка давления Δp . При любой интенсивности детонации доля сгоревшего топлива к началу детонации не превышает $X = 0,9$, что согласуется с данными источника [9].

Поэтому за границу разделения нормального горения от детонационного можно принять условие: $J = \int_0^{\tau} (1/z) \cdot d\tau \geq 1$ при $X \leq 0,9$.

При этих граничных условиях возникновения детонации проводились последующие расчёты требуемого октанового числа топлива в зависимости от степени сжатия, угла опережения зажигания и др. По двум вариантам расхождение в оценке октанового числа составляло не более 5%. Но расчёт момента

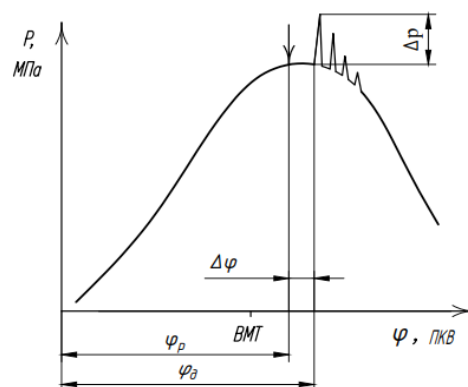


Рис. 5. Схема оценки расчётного φ_p и экспериментального φ_o начала детонации
Fig. 5. Diagram for estimating the calculated φ_p and experimental φ_o detonation onset

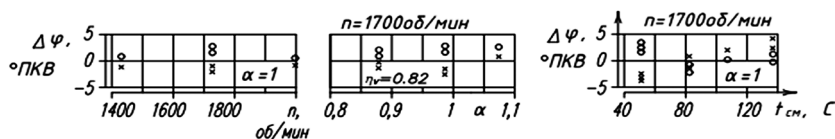


Рис. 6. Оценка точности расчёта момента самовоспламенения изоктана (ОЧ100):

○ – в условиях постоянного объёма; × – в условиях продолжающегося сжатия

Fig. 6. Evaluation of calculation accuracy of isooctane self-ignition (O.N. 100):

○ – under conditions of constant volume;

× – under conditions of continuing compression

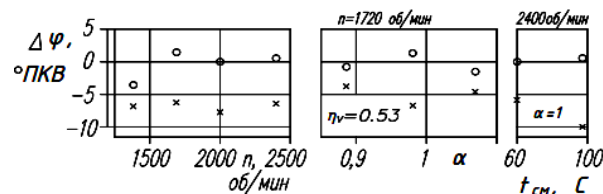


Рис. 7. Оценка точности расчёта эталонной смеси ОЧ60:

○ – в условиях постоянного объёма;

× – в условиях продолжающегося сжатия

Fig. 7. Evaluation of the calculation accuracy of reference mixture O.N.60:

○ – under conditions of constant volume;

× – under conditions of continuing compression

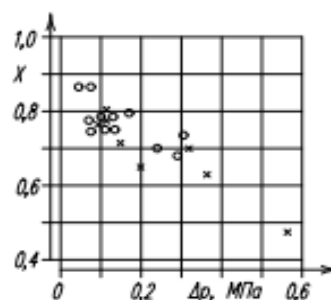


Рис. 8. Связь между интенсивностью детонации и долей сгоревшего топлива к началу детонации:
○ – ОЧ100; × – ОЧ60

Fig. 8. Relationship between the detonation intensity and the proportion of burnt fuel by the detonation onset:
○ – O.N.100; × – O.N.60

самовоспламенения по второму варианту, то есть по выражениям для задержек самовоспламенения топлива с двухстадийным механизмом, позволяет оценить вклад холоднопламенной и высокотемпературной стадий в общий механизм самовоспламенения.

Выражение (8) с учетом (5) можно преобразовать следующим образом:

$$J = \int_0^{\tau} \left(\frac{1}{z} \right) \cdot d\tau = \int_0^{\tau} \left(\frac{1}{z_{нт}} + \frac{1}{z_{вт}} \right) \cdot d\tau = \int_0^{\tau} \left(\frac{1}{z_{нт}} \right) \cdot d\tau + \int_0^{\tau} \left(\frac{1}{z_{вт}} \right) \cdot d\tau = J_{нт} + J_{вт}, \quad (14)$$

где $J_{нт}$ – величина, характеризующая влияние низкотемпературной (холоднопламенной) стадии; $J_{вт}$ – величина, характеризующая влияние высокотемпературной стадии самовоспламенения.

Такой подход дает возможность оценить то, как велико влияние низкотемпературной аномальной (задержка самовоспламенения не меняется или растёт с ростом температуры) стадии самовоспламенения в общий процесс самовоспламенения топливно-воздушной смеси. Пример такого анализа для топлив ОЧ100 и ОЧ60 приведен на рисунке 9.

Расчёт циклов выполнен при одинаковых параметрах режима работы: частота вращения $n = 2000$ об/мин; коэффициент наполнения $\eta_v = 0,84$; длительность

тепловыделения – 50° поворота коленчатого вала; температура в начале сжатия – 350 К; коэффициент остаточных газов – $0,06$; давление окружающей среды – $0,098$ МПа; углы зажигания – оптимальные. При этих параметрах определена допустимая по условию детонации степень сжатия: $\varepsilon = 8$ для ОЧ100, $\varepsilon = 4,9$ для ОЧ60.

На рисунке 9 представлены кривые изменения давления циклов (p), температуры несгоревшей части заряда (T_n) и доли сгоревшего топлива (X) на участке цикла от начала тепловыделения до момента начала детонации ($J \geq 1$ при $X \leq 0,9$), а также показано нарастание интегралов $J_{нт}$, характеризующих вклад низкотемпературной стадии в общий процесс развития самовоспламенения.

Из данных рисунка следует, что для изооктана величина интеграла $J_{нт} = 0,15$, в то время как для топлива ОЧ60 $J_{нт} = 0,96$. Таким образом, при невысоких степенях сжатия преобладает низкотемпературный механизм самовоспламенения, а при высоких преобладает высокотемпературный механизм. Возможно, по этой причине хорошо известные способы борьбы с детонацией, изученные еще Г.Р. Рикардо⁷ при степенях сжатия около 5, при повышении степеней сжатия снижали свою эффективность или вообще не оказывали на детонацию никакого влияния.

Выводы

1. Формально-кинетические выражения для задержек самовоспламенения топлив, полученные на основе экспериментальных исследований самовоспламенения на безмоторных установках как в условиях сгорания при постоянном объёме, так и в условиях поджата смеси при сгорании, могут быть использованы для оценки возникновения детонации в ДВС с искровым воспламенением при расчётно-аналитическом моделировании рабочего цикла двигателя.

2. Полученные экспериментально на безмоторных установках формально-кинетические выражения задержек самовоспламенения двух топлив (низкооктанового и высокооктанового) позволяют определить задержку самовоспламенения их смеси. Обратная задержка самовоспламенения смеси из двух топлив равна сумме произведений их объёмных долей на обратные задержки самовоспламенения этих топлив.

3. Математическое моделирование механизма развития самовоспламенения несгоревшей части заряда в поршневых двигателях внутреннего сгорания с искровым зажиганием можно выполнять так же, как и моделирование механизма развития самовоспламенения топливно-воздушной смеси в условиях продолжающегося сжатия в экспериментальных установках со свободно летящим поршнем.

⁷ Рикардо Г.Р. Быстроходные двигатели внутреннего сгорания. М.: Машгиз, 1960. 412 с.

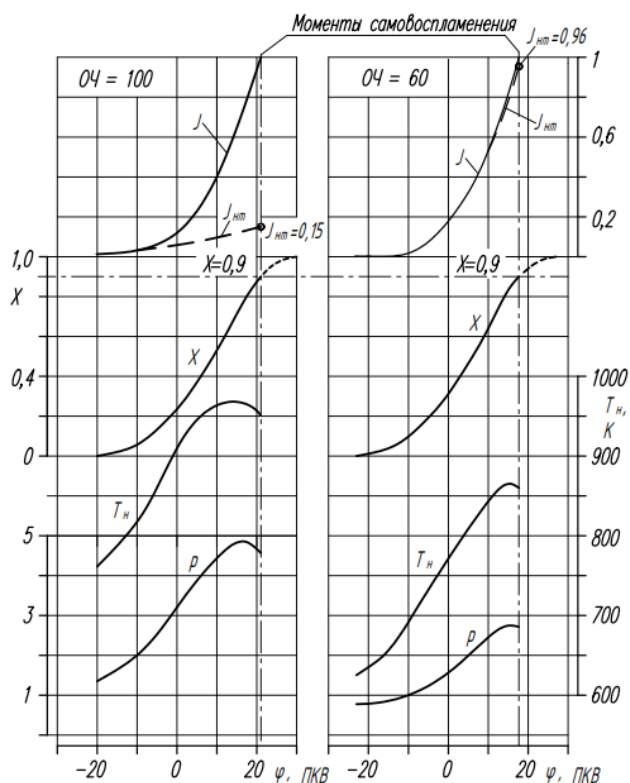


Рис. 9. Пример расчёта момента возникновения детонации ($J \geq 1$, $X \leq 0,9$) для топлив ОЧ100 и ОЧ60

Fig. 9. Example of calculating the detonation onset ($J \geq 1$, $X \leq 0,9$) for fuels O.N.100 and O.N.60

4. Граница возникновения детонации в ДВС может быть определена по моменту самовоспламенения (взрыва) в несгоревшей части заряда при остаточной цикловой доле несгоревшего топлива не менее 10%.

5. Расширение экспериментальных исследований самовоспламенения углеводородов различных групп, входящих в состав моторных топлив и имеющих

разные механизмы самовоспламенения (одностадийный или двухстадийный), в установках импульсного сжатия со стопорением поршня позволит глубже понять природу появления детонации в двигателях, проводить математическое моделирование детонации и быстрее находить эффективные методы улучшения антидетонационных свойств двигателей и повышения граничных условий их бездетонационной работы.

Список использованных источников

1. Хакимов Р.Т., Огнев О.Г. Использование природного газа в качестве моторного топлива для автотракторной техники: электронный // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта: Сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции (Екатеринбург, 3 декабря 2021 г.). Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2022. С. 39-41. EDN: OVNWUP.
2. Димогло А.В., Козлов В.Г. Исследование энергетических характеристик использования природного метана в газодизельном процессе ДВС // АгроЭкоИнфо. 2022. № 3 (51). С. 21. <https://doi.org/10.51419/202123317>
3. Девянин С.Н., Чумаков В.Л., Марков В.А., Ефанов А.А. Использование биогаза в качестве топлива для дизелей // Грузовик. 2011. № 11. С. 32-43. EDN: OJYTTJ.
4. Chumakov V.L., Devyanin S.N., Bijaev A.V. Nitrogen oxide formation with nonuniform fuel distribution in diesel engine. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1679(5):52089. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/5/052089>
5. Чумаков В.Л., Девянин С.Н. Снижение выбросов оксидов при управлении процессом сгорания в дизельном двигателе // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15, № 1. С. 48-56. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-1-48-56>
6. Dauaud A.M., Eyzat P. Four – Octane – Number Method for Predicting the Anti-Knock Behavior of fuels and Engines. *SAE Transactions*. 1978:780080. <https://doi.org/10.4271/780080>
7. Saidaminov S.S. The effects of fuel structure on the autoignition of fuel-air mixtures. *SAE*. 1980. 800046. <https://doi.org/10.4271/800046>
8. Капустин А.В., Смирнов С.В., Чумаков В.Л. Математическая модель рабочего цикла двигателя с искровым зажиганием // Чтения академика В.Н. Болтинского. 2021. С. 86-95. EDN: FQYTNB.
9. By A., Kempinski B., Rife J.M. Knock in Spark ignition Engines. *SAE Techn. Pap.* 1981:810147. <https://doi.org/10.4271/810147>

Вклад авторов

А.В. Капустин – формулирование основной концепции исследования, разработка математической модели, табличное и графическое представление результатов, формирование выводов исследования. В.Л. Чумаков – разработка математической модели рабочего цикла, анализ литературы, подготовка начального варианта текста, описание результатов, формирование выводов. С.Н. Девянин – разработка методологии исследования, анализ и описание результатов, формирование выводов исследования, анализ литературы. Б.А. Жоробеков – обработка результатов опытов, описание результатов и формирование выводов исследования, анализ литературы.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 22.06.2023; поступила после рецензирования и доработки 15.07.2023; принята к публикации 16.07.2023

References

1. Khakimov R.T., Ognev O.G. Use of natural gas as motor fuel for automotive equipment. *Innovative development of land transport equipment and technologies: Collection of articles of the Third All-Russian Scientific and Practical Conference* (Yekaterinburg, December 3, 2021). Yekaterinburg: Ural University Press, 2022:39-41. (In Rus.)
2. Dimoglo A.V., Kozlov V.G. Study of the energy characteristics of the use of natural methane in the gas-diesel process of an internal combustion engine. *Agroecoinfo*. 2022;3(51):21. (In Rus.) <https://doi.org/10.51419/202123317>
3. Devyanin S.N., Chumakov V.L., Markov V.A., Efanov A.A. Using biogas as a fuel for diesel engines. *Gruzovik*. 2011;11:32-43. (In Rus.) EDN: OJYTTJ
4. Chumakov V.L., Devyanin S.N., Bijaev A.V. Nitrogen oxide formation with nonuniform fuel distribution in diesel engine. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1679(5):52089. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/5/052089>
5. Chumakov V.L., Devyanin S.N. Oxide emissions reduction from combustion control in a diesel engine. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(1):48-56. (In Rus.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-1-48-56>
6. Dauaud A.M., Eyzat P. Four – Octane – Number Method for Predicting the Anti-Knock Behavior of fuels and Engines. *SAE Transactions*. 1978:780080. <https://doi.org/10.4271/780080>
7. Saidaminov S.S. The effects of fuel structure on the autoignition of fuel-air mixtures. *SAE*. 1980:800046. <https://doi.org/10.4271/800046>
8. Kapustin A.V., Smirnov S.V., Chumakov V.L. Mathematical model of spark-ignition engine working cycle. *In: Readings devoted to the memory of Academician V.N. Boltinsky*. 2021:86-95. (In Rus.)
9. By A., Kempinski B., Rife J.M. Knock in Spark ignition Engines. *SAE Techn. Pap.* 1981:810147. <https://doi.org/10.4271/810147>

Contribution of the authors

A.V. Kapustin – conceptualization; development of the mathematical model; tabular and graphical visualization of the results; review and conclusions. V.L. Chumakov – development of the mathematical model of the working cycle; literature review; writing – original draft preparation; description of the results; review and conclusions. S.N. Devyanin – research methodology; analysis and description of the results; conclusions; literature review. B.A. Zhorobekov – processing and describing the experimental results; conclusions; literature review.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 22.06.2023; revised 15.07.2023; accepted 16.07.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.372;62-791.4

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-52-59



Применение цифровых технологий при диагностировании двигателей энергонасыщенной сельскохозяйственной техники

Катаев Юрий Владимирович , канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник

ykataev@mail.ru ; <https://orcid.org/0000-0003-0832-3608>

Тишанинов Игорь Александрович, младший научный сотрудник

tishaninov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7858-6561>

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Аннотация. Разработка цифровых технологий, позволяющих совершенствовать процесс диагностирования, повышать достоверность определения функциональных характеристик сельскохозяйственной техники в режиме реального времени, является важной и актуальной при техническом сопровождении энергонасыщенных машин. С целью разработки интеллектуальной системы удаленного диагностирования двигателей энергонасыщенной сельскохозяйственной техники применялся конструктор нейросетей с возможностью использования до 10 входных и выходных параметров. Разработаны алгоритм цифровой системы удаленной диагностики, схема модели прогнозирования отказов при онлайн-мониторинге и цифровая платформа по диагностированию энергонасыщенной сельскохозяйственной техники. Разработанная платформа позволяет получать диагностические параметры ДВС (расход топлива, температуру двигателя и частоту вращения вала двигателя), которые в виде зашифрованных данных удаленно передаются на сервер с помощью GPS-модема и оцифровываются в банке данных, где происходит структурирование и анализ полученных данных при помощи разработанной модели искусственной нейронной сети. Расшифрованные диагностические параметры ДВС направляются оператору, который видит графики параметров технического состояния сельскохозяйственной техники и отчеты по прогнозированию возможных отказов деталей ДВС. Представлен способ сбора и хранения диагностической информации, полученной в результате мониторинга технического состояния сельскохозяйственной техники, и с помощью математической модели нейронной сети проведена обработка этих данных. Применение цифровых технологий при диагностировании техники с помощью искусственного интеллекта позволяет значительно сократить трудоёмкость выполняемых операций, оценить эффективность работы машины в целом и прогнозировать наступление отказов её механизмов, производить своевременное техническое обслуживание и ремонт машин и сократить незапланированные простои энергонасыщенной сельскохозяйственной техники.

Ключевые слова: применение цифровых технологий, конструктор нейросетей, диагностические параметры ДВС, наступление отказов, техническое обслуживание и ремонт машин

Формат цитирования: Катаев Ю.В., Тишанинов И.А. Применение цифровых технологий при диагностировании двигателей энергонасыщенной сельскохозяйственной техники // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 52-59. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-52-59>.

© Катаев Ю.В., Тишанинов И.А., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Use of digital technologies in diagnosing engines of energy-saturated agricultural machinery

Yuri V. Kataev , CSc (Eng), Associate Professor, Lead Research Engineer

ykataev@mail.ru ; <https://orcid.org/0000-0003-0832-3608>

Igor A. Tishaninov, Junior Research Engineer

tishaninov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7858-6561>

Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5, 1st Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract. The development of digital technologies aimed at improving the diagnostic process, increasing the reliability of determining the functional characteristics of agricultural machinery in real time is important and relevant in the technical support of energy-saturated machines. To develop an intelligent system for remote diagnostics

of the engines of energy-saturated agricultural machinery, the authors tested a neural network constructor with the ability to use up to ten input and output parameters. An algorithm for a digital system for remote diagnostics, a scheme for predicting failures in online monitoring, and a digital platform for diagnosing energy-saturated agricultural machinery have been developed. The developed platform makes it possible to obtain ICE diagnostic parameters (fuel consumption, engine temperature, and engine shaft speed), which are remotely transmitted in the form of encrypted data to the server using a GPS modem and digitized in the data bank. Then the received data are structured and analyzed using the developed artificial neural network models. The decrypted diagnostic parameters of the internal combustion engine are sent to the operator, who sees graphs of the parameters of the technical condition of agricultural machinery and reports on predicting possible failures of internal combustion engine parts. The article presents a method for collecting and storing diagnostic information obtained as a result of monitoring the technical condition of agricultural machinery. These data are processed using a mathematical model of a neural network. The use of digital technologies in diagnosing equipment with the help of artificial intelligence can significantly reduce the complexity of the operations performed, evaluate the efficiency of the machine as a whole and predict the onset of failures of its mechanisms, perform timely maintenance and repair of machines, and reduce unplanned downtime of energy-saturated agricultural machinery.

Keywords: application of digital technologies, neural network designer, ICE diagnostic parameters, failure occurrence, maintenance and repair of machines

For citation: Kataev Yu.V., Tishaninov I.A. Use of digital technologies in diagnosing engines of energy-saturated agricultural machinery. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(4):52-59. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-52-59>.

Введение. Цифровизация процессов диагностирования парка сельскохозяйственной техники (СХТ) с использованием интеллектуальных систем направлена на совершенствование эксплуатационных характеристик и эффективности использования машинно-тракторного парка (МТП) в агропромышленном комплексе.

По статистическим данным Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, около 40% парка сельскохозяйственной техники содержат в своих конструкциях интеллектуальные решения, в том числе в виде электронных блоков управления как всей машины в целом, так и отдельно по двигателю, трансмиссии и другим агрегатам.

Основными показателями работы двигателя являются мощность, крутящий момент, экономичность и коэффициент полезного действия, контроль которых позволяет характеризовать техническое состояние его систем при эксплуатации.

Разработка инновационного способа удаленного диагностирования, адаптированного к цифровым технологиям, позволит в режиме реального времени получать информацию о работе двигателя (расход топлива, мощность, давление масла, температура, вибрации и т.д.), осуществлять обработку его снимаемых параметров стандартными языками программирования с применением массива обучаемой нейронной сети для прогнозирования технического состояния энергонасыщенной СХТ. Разработка новых инновационных методов и систем на основе цифровых технологий контроля технического состояния техники в целом и ее отдельных агрегатов является актуальной задачей совершенствования инженерной службы АПК.

Использование цифровых технологий при сервисном сопровождении энергонасыщенной сельскохозяйственной техники позволит снизить эксплуатационные и экономические затраты при ее эксплуатации, повысить коэффициент её технической готовности.

Цель исследований: разработка удаленного диагностирования двигателей энергонасыщенной сельскохозяйственной техники с применением цифровых технологий и нейронной сети.

Материалы и методы. Развитие цифровых технологий при диагностировании сельскохозяйственных тракторов и прогнозирование возникновения неисправностей или наступления отказов позволяют поддерживать сельскохозяйственную технику в работоспособном состоянии.

Анализ цифровых методов мониторинга сельскохозяйственной техники проводился на основе изученных материалов дилерских служб по ведущим производителям техники, онлайн-платформ, нормативно-правовых документов по проведению удаленного диагностирования, а также научных трудов в этой области.

В зависимости от характера поставленных задач использовались графический метод исследований, методы математического анализа с применением программного обеспечения, методы системного и статистического анализа с использованием пакетов Python, Microsoft Office Excel 2020 и др.

Созданная цифровая платформа по диагностированию энергонасыщенной сельскохозяйственной техники способна анализировать полученную информацию в онлайн-режиме и обрабатывать её с помощью обучаемой нейронной сети.

Результаты и их обсуждение. В результате онлайн-мониторинга сельскохозяйственной техники с помощью диагностического устройства рассмотрено взаимодействие входного и выходного нейронов в нейронной сети при использовании большого массива данных, полученного при диагностировании. Этот метод позволяет определить причину возникновения неисправностей тракторов и прогнозировать отказы, а также оценить эффективность исследуемого объекта в целом¹ [1-4].

На рисунке 1 представлен алгоритм определения возможного отказа деталей и узлов систем двигателя.

Разработка алгоритма удалённого контроля необходима для последующего внедрения его в виде программы, базирующейся на нейросетевом моделировании, в систему цифрового мониторинга технического состояния сельскохозяйственной техники и прогнозирования отказов. Для этого необходимо сформировать банк данных о технических неисправностях двигателя, составляющих основу системы мониторинга техники по выявлению неисправностей и прогнозирования отказов. Если в процессе контроля эксплуатационные условия работы элементов двигателя тождественны эталонным, то рабочие условия не фиксируются в банке данных. В противном случае учитываются условия, используемые для диагностических параметров (электрические, тепловые, экологические и т.д.), рекомендуемые заводом-изготовителем. Поэтому для получения более достоверного прогнозирования отказа требуется

использование алгоритма машинного обучения в виде нейронной модели, внедрённой в базу данных сервера по показателям неисправностей [5]. ПО Python по обработке данных, получаемых в онлайн-режиме от систем ДВС, с использованием нейронной сети позволяет выявить неисправности и прогнозировать наступление отказов при эксплуатации двигателя, определять его остаточный ресурс по техническому состоянию деталей и узлов его систем.

Вероятность обнаружения неисправностей и наступления отказов в двигателях энергонасыщенной СХТ при эксплуатации можно определять по функции:

$$\lambda_i = f(\lambda'_0, \text{priority}(i)), \quad (1)$$

где λ_0 – интенсивность получения параметров, определяемая как величина, равная 1/10 мин; $\text{priority}(i)$ – приоритет контролируемого (диагностического) i -го параметра.

Мониторинг ДВС, предусматривающий постоянный контроль параметров двигателя, представляет собой систему упорядоченного сбора информации, когда порядок сбора определяется приоритетом. Модуль реагирования оповещает о неисправностях и даёт оценку о техническом состоянии объекта в целом.

Блок-схема по прогнозированию отказов при онлайн-мониторинге представлена на рисунке 2.

Разработанная платформа цифрового диагностирования энергонасыщенной сельскохозяйственной техники, представленная в позиции 1 рисунка 3,

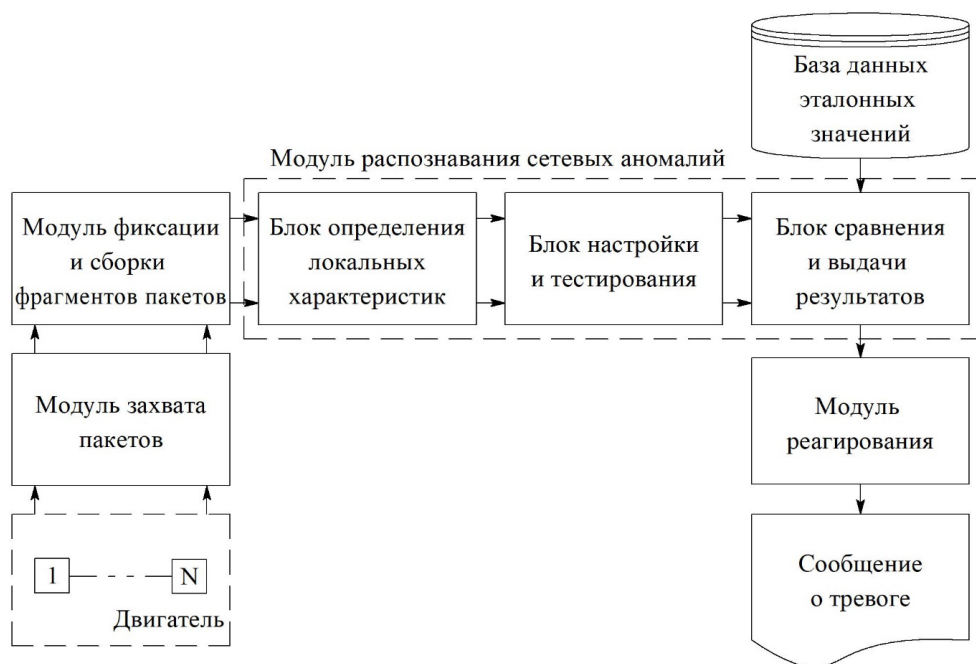


Рис. 1. Алгоритм цифровой системы удалённой диагностики

Fig. 1. Algorithm of the digital remote diagnostic system

¹ Голубев И.Г., Мишуров Н.П., Федоренко В.Ф. и др. Цифровые решения при техническом сервисе сельскохозяйственной техники: Аналитический обзор. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. 76 с.

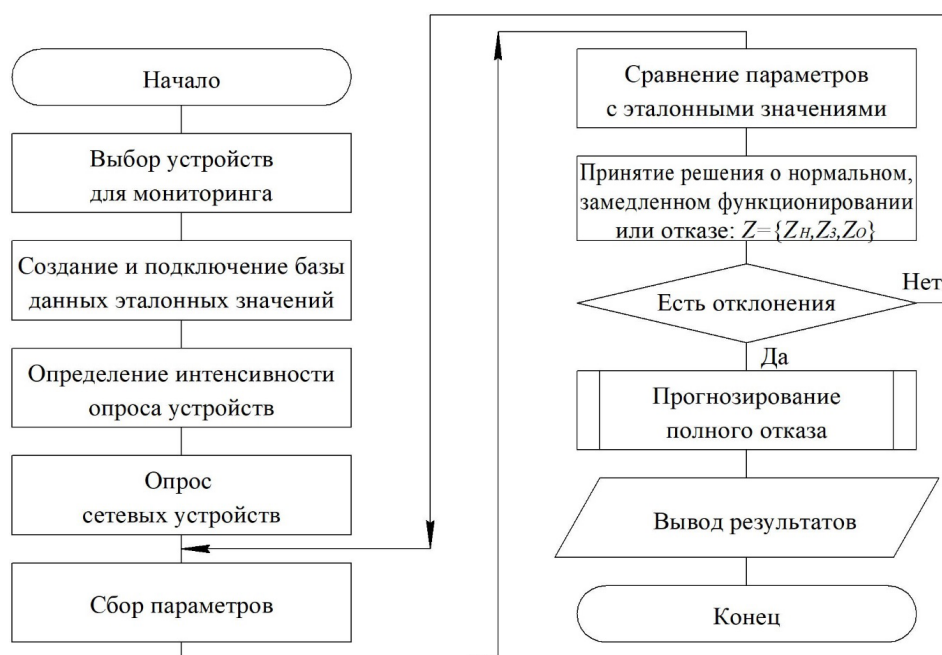


Рис. 2. Блок-схема модели прогнозирования отказов при онлайн-мониторинге

Fig. 2. Block diagram of the online monitoring failure prediction model

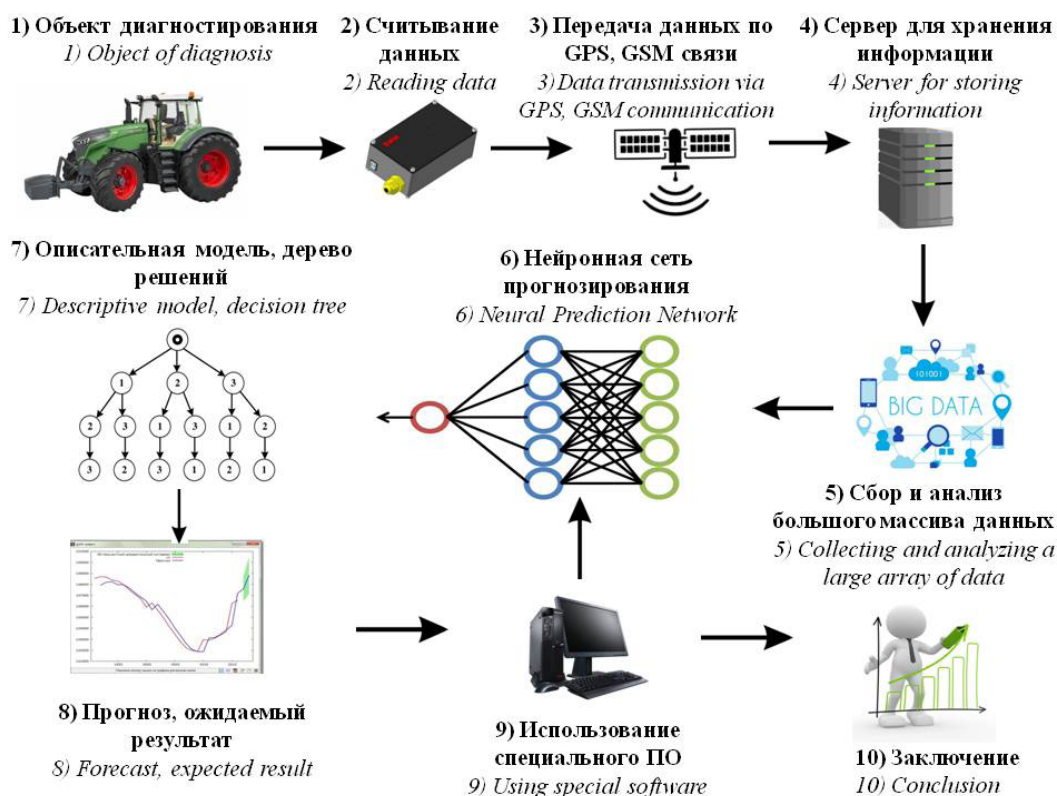


Рис. 3. Цифровая платформа по диагностированию энергонасыщенной сельскохозяйственной техники

Fig. 3. Digital platform for diagnosing energy-saturated agricultural machinery

позволяет использовать специальное устройство для сбора и передачи информации через CAN интерфейс 2, получать данные диагностических параметров ДВС с помощью специального адаптера через OBD-разъем.

Фрагмент получаемой зашифрованной информации представлен на рисунке 4.

Полученная информация в виде зашифрованных данных удаленно с помощью связи GPS/GSM 3 передается на сервер 4 и оцифровывается в банке данных 5, где происходят структурирование и анализ полученных данных при помощи разработанной модели искусственной нейронной сети 6, 7.

1.1.4 Engine Hours, Revolutions: HOURS

F004					
65,253					
1000 ms					
Data Byte 1		Data Byte 2		Data Byte 3	
8	7	6	5	4	3
Engine total hours of Operation	Engine total hours of Operation	Engine total hours of Operation	Engine total hours of Operation	Engine total hours of Operation	Engine total hours of Operation
0.05 h / Bit gain	0.05 h / Bit gain	0.05 h / Bit gain	0.05 h / Bit gain	0.05 h / Bit gain	0.05 h / Bit gain
0 h offset	0 h offset	0 h offset	0 h offset	0 h offset	0 h offset
SPN 247	SPN 247	SPN 247	SPN 247	SPN 247	SPN 247

Рис. 4. Фрагмент получаемой зашифрованной информации по CAN-протоколу

Fig. 4. Fragment of the received encrypted information via the CAN protocol

Расшифрованные данные направляются с помощью GPS/GSM-связи на персональный компьютер оператора или мобильный телефон^{2,3} [6-9].

Оператор видит информацию в виде структурированных графиков 8 параметров технического состояния энергонасыщенной СХТ, которую при необходимости можно отправить на повторный анализ через нейронную сеть с персонального компьютера с помощью специального программного обеспечения 9, или же можно получить отчеты по прогнозированию 10 возможных отказов деталей ДВС.

Для оптимизации и структурирования диагностической информации, полученной в результате мониторинга, применялся конструктор нейросетей⁴ с возможностью использования до 10 входных и выходных параметров (рис. 5).

Действия многослойной сети (персептрона) представлены в формулах:

$$g_j = f\left(\sum_{i=1}^n v_{ij} x_i + Q_j\right); \quad (2)$$

$$y_k = f\left(\sum_{j=1}^h w_{jk} g_j + T_k\right), \quad (3)$$

где n, h – входные слои; v, w – абсолютные величины случайных значений; Q, T – весовой коэффициент.

Каждая нейронная связь имеет свой вес, определяющий доминанцию определенных нейронов в общем массиве искусственной нейронной сети [10-12].

² Дидманидзе О.Н., Митягин Г.Е., Измайлов А.Ю. и др. Технологические процессы диагностирования и технического обслуживания двигателей транспортных и транспортно-технологических машин. М.: ООО «УМЦ «Трида», 2015. 109 с.

³ Кадури А.А., Николенко С.И., Архангельская Е.В. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. СПб.: Питер, 2018. 480 с.

⁴ Конструктор нейросетей. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/post/351922/> (дата обращения: 06.03.2023).

В результате получено незначительное изменение весов первых слоев, и поэтому потребовалось значительное количество эпох обучения для обеспечения коррекции веса нейронной связи.

Задачей обучения многослойных нейронных сетей является оптимизация, в связи с чем использовался метод многомерных функций.

С использованием диагностического устройства осуществляются сбор диагностической информации об отказах и неисправностях работы двигателя и формирование базы данных. На этом этапе на основе экспериментальных значений и других достоверных источников информации окончательно формируется банк данных. Этот набор обучающих выборок, описывающих признаки и проявления дефектов, подается на вход нейронной сети. Созданная база данных имеет практическое значение для обучения нейронных сетей при обнаружении ошибок. В такой базе необходимо иметь не менее 3...5 эталонных диагностических параметров, а в оптимальном варианте для полного описания технического состояния диагностируемого объекта – несколько сотен. В экспериментальных исследованиях при различных режимах работы двигателя в качестве контролируемых параметров использовались расход топлива, температура двигателя и частота вращения вала двигателя. Основной причиной этого решения являются технические возможности разработанного устройства по сбору диагностической информации. В настоящее время проводится активная работа по расширению диапазона возможностей устройства с точки зрения увеличения контролируемых параметров. Например, на основании экспериментальных данных, полученных в результате онлайн-мониторинга (табл.), для нейронной сети сформированы две зависимости, характеризующие нормальную работу двигателя при эксплуатации (рис. 6, 7).

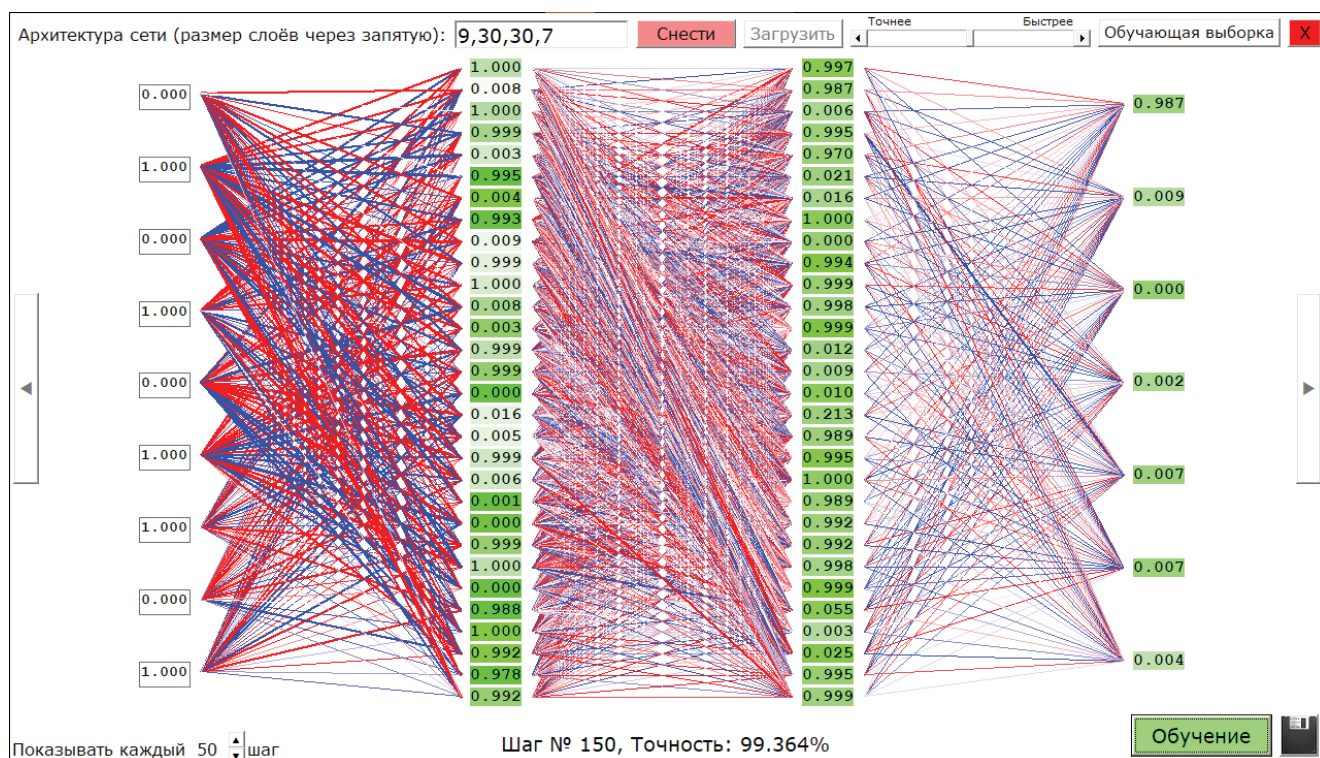


Рис. 5. Общий вид конструктора нейросети

Fig. 5. General view of the neural network constructor

Диагностические параметры ДВС для нейронной сети, полученные в результате онлайн-мониторинга сельскохозяйственной техники

Таблица

ICE diagnostic parameters for a neural network obtained as a result of the online monitoring of agricultural machinery

Table

№ п/п	Расход топлива <i>Fuel consumption level</i>	Температура охлаждающей жидкости <i>Coolant temperature</i>	Частота вращения вала двигателя <i>Engine speed, rpm</i>
1	66,8	76	902,25
2	66,8	76	897,75
3	66,8	76	897,00
4	66,8	76	897,75
5	66,8	76	895,75
6	66,8	76	1675,00
7	68,0	76	1645,00
8	68,0	76	1904,00
9	68,0	76	1952,00
10	66,8	77	1994,50
11	66,8	78	1960,25
12	68,0	79	1987,75
13	68,0	79	2009,50
14	70,0	81	1960,00
15	68,8	82	1933,75
16	70,0	82	1968,25
17	68,8	82	1986,75
18	68,8	81	1980,25
19	68,8	81	2007,00
20	66,8	80	1959,00
21	62,8	80	1980,75
22	62,8	81	1961,25

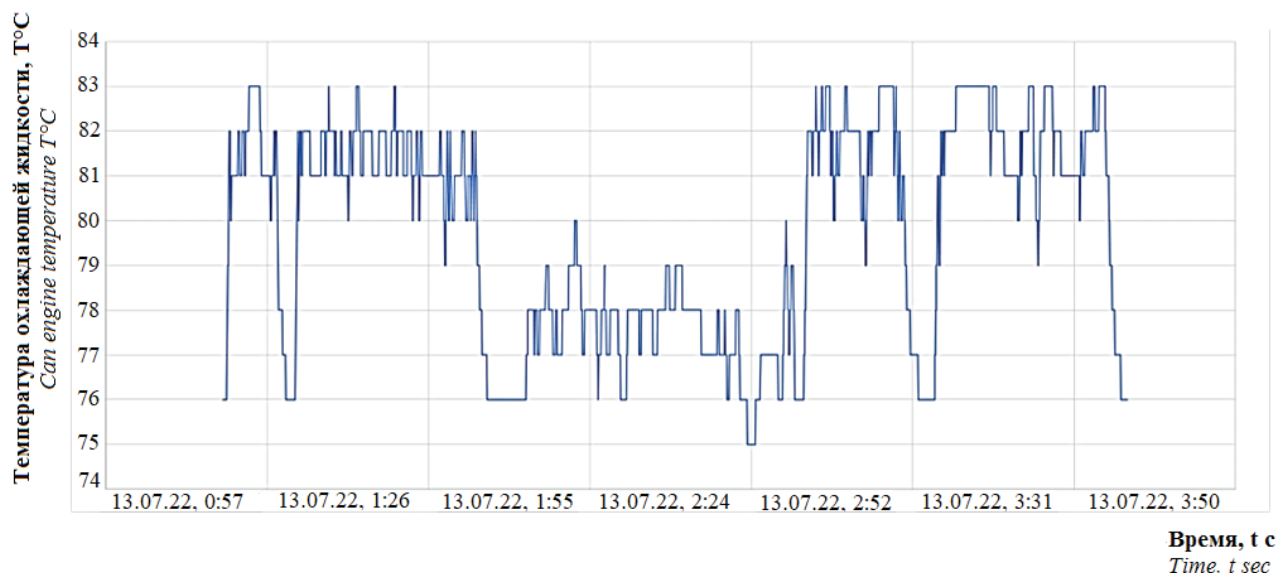


Рис. 6. Температура охлаждающей жидкости двигателя в разрезе 4 ч работы

Fig. 6. Engine temperature monitoring over four 4 hours of operation

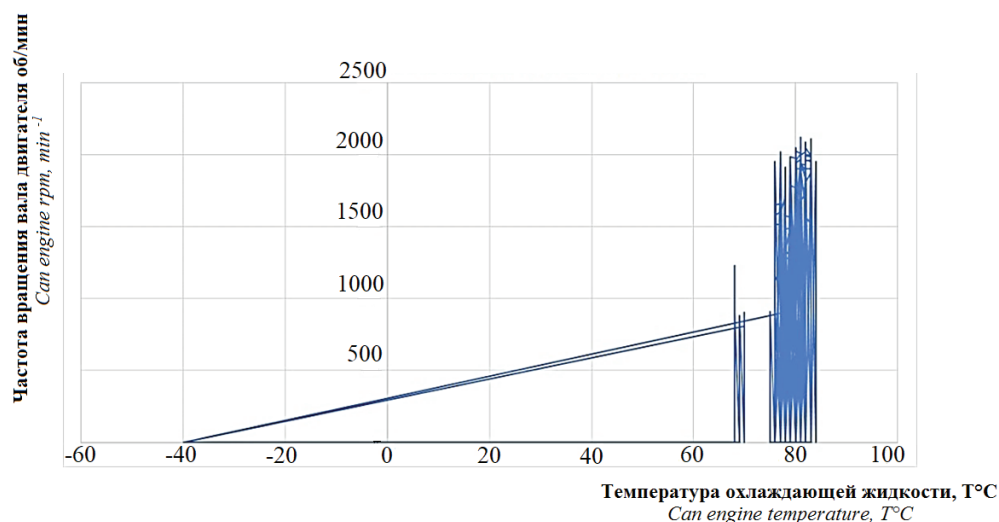


Рис. 7. Значения температуры и частоты вращения коленчатого вала двигателя при онлайн-мониторинге

Fig. 7. Values of the temperature and the engine crankshaft speed during online monitoring

Выводы

Разработанная цифровая платформа с нейросетевым моделированием диагностирования энергонасыщенной сельскохозяйственной техники позволяет

заранее обнаруживать возникшие неисправности и прогнозировать наступление отказов, своевременно на всех уровнях производить техническое обслуживание и ремонт машин.

Список использованных источников

1. Катаев Ю.В., Загоруйко М.Г., Тишанинов И.А., Градов Е.А. Прогнозирование отказов в двигателях сельскохозяйственной техники с применением цифровых технологий // Аграрный научный журнал. 2022. № 2. С. 79-82. <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i2pp79-82>
2. Петрищев Н.А., Костомахин М.Н., Саяпин А.С., Ивлева И.Б. Совершенствование мониторинга системы «Человек-Машина-Среда» и правил эксплуатации для повышения эксплуатационной надёжности тракторов // Технический сервис машин. 2020. № 3 (140). С. 12-20. EDN: XFGLUF.
3. Интеллектуальный программный комплекс диагностирования и прогнозирования технического состояния

References

1. Kataev Yu.V., Zagoruiko M.G., Tishaninov I.A., Gradov E.A. Prediction of failures in agricultural machinery engines using digital technologies. *The Agrarian Scientific Journal*. 2022;2:79-82. <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i2pp79-82> (In Rus.)
2. Petrishchev N.A., Kostomakhin M.N., Sayapin A.S., Ivleva I.B. Improving the human-machine-environment monitoring system and operation rules for increasing operational tractor reliability. *Machinery Technical Service*. 2020;3(140):12-20. (In Rus.)
3. Dorokhov A.S., Kataev Yu.V., Kostomakhin M.N. Intelligent software package for diagnosing and predicting the technical condition of agricultural machinery: Certificate of state registration of the computer program RU2021681505; No. 2021668436; 2021. (In Rus.)

сельскохозяйственной техники: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU2021681505 / А.С. Дорохов, Ю.В. Катаев, М.Н. Костомыхин [и др.]; № 2021668436; заявл. 19.11.2021; опубл. 23.12.2021. EDN: FDJNZR.

4. Семейкин В.А., Дорохов А.С. Теоретические предпосылки организации процесса входного контроля качества машиностроительной продукции // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2007. № 2 (22). С. 92-94. EDN: VYGHJB.

5. Пестряков Е.В. Программное обеспечение для диагностики и прогнозирования технического состояния сельскохозяйственных машин // Техника и оборудование для села. 2021. № 12 (294). С. 37-41. EDN: NUTMPU.

6. Костомыхин М.Н., Воронов А.Н., Ковалев Л.И., Ковалев И.Л. Контроль параметров надежности сельскохозяйственной техники с использованием систем GPS/ГЛОНАСС // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 118. С. 26-30. EDN: TODEWR.

7. Манжула В.Г., Федяшов Д.С. Нейронные сети Кохонена и нечёткие нейронные сети в интеллектуальном анализе данных // Фундаментальные исследования. 2011. № 4. С. 108-114. EDN: NDGTWB.

8. Ерохин М.Н., Дорохов А.С., Катаев Ю.В. Интеллектуальная система диагностирования параметров технического состояния сельскохозяйственной техники // Агроинженерия. 2021. № 2 (102). С. 45-50. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-45-50>

9. Erokhin M.N., Leonov O.A., Shkaruba N.Z., Kataev Yu.V., Vergazova Yu.G. Assessing the relative interchangeability in joints with preload. *Russian Engineering Research*. 2020;40(6):469-472. <https://doi.org/10.3103/S1068798X2006009X>

10. Отказоустойчивая нейронная сеть, способ обнаружения отказов нейронной сети, способ обеспечения отказоустойчивости нейронной сети: Патент RU2760636 C2, МПК G06F 11/20, G06N3/02 / Н.В. Суханова, С.А. Шептунов; № 2018145179; заявл. 19.12.2018; опубл. 29.11.2021. EDN: HMNCEQ

11. Посягин А.И., Южаков А.А. Разработка двухслойной нейронной сети для самомаршрутизирующегося аналого-цифрового преобразователя на основе нейронной сети // Электротехника. 2013. № 11. С. 10-13. EDN: RERAAL.

12. Pestryakov E.V., Sayapin A.S., Kostomakhin M.N., Petrishchev N.A. Analysis of the technical condition of agricultural machinery using neural networks. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2022;121:92-101. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97057-4_9

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 01.03.2023; поступила после рецензирования и доработки 12.04.2023; принята к публикации 17.04.2023

4. Semeikin V.A., Dorokhov A.S. Theoretical grounds for the organization of the process of input quality control of machine-building products. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2007;2(22):92-94. (In Rus.)

5. Pestryakov E.V. Software for diagnosing and predicting the technical condition of agricultural machines. *Machinery and equipment for rural area*. 2021;12(294):37-41. (In Rus.)

6. Kostomakhin M.N., Voronov A.N., Kovalev L.I., Kovalev I.L. Control of reliability parameters of agricultural machinery using GPS/GLONASS systems. *Trudy GOSNITI*. 2015;118:26-30. (In Rus.)

7. Manzhu V.G., Fedyašov D.S. Kohonen neural networks and fuzzy neural networks in data mining. *Fundamental Research*. 2011;4:108-114. (In Rus.)

8. Erokhin M.N., Dorokhov A.S., Kataev Yu.V. Intelligent system for diagnosing the parameters of the technical condition of tractors. *Agricultural Engineering*. 2021;2(102):45-50. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-45-50> (In Rus.)

9. Erokhin M.N., Leonov O.A., Shkaruba N.Z., Kataev Yu.V., Vergazova Yu.G. Assessing the relative interchangeability in joints with preload. *Russian Engineering Research*. 2020;40(6):469-472.

10. Sukhanova N.V., Sheptunov S.A. Fault-tolerant neural network, method for detecting neural network faults, method for ensuring fault tolerance of neural network: Patent RU2760636 C2, IPC G06F 11/20, G06N3/02. No. 2018145179, 2021. (In Rus.)

11. Posyagin A.I., Yuzhakov A.A. Development of a two-layer neural network for a self-routing analog-to-digital converter based on a neural network. *Elektrotehnika*. 2013;11:10-13. (In Rus.)

12. Pestryakov E.V., Sayapin A.S., Kostomakhin M.N., Petrishchev N.A. Analysis of the Technical Condition of Agricultural Machinery Using Neural Networks. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2022 Vol. 121. P. 92-101. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97057-4_9 (In Rus.)

Contribution of the authors

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper and are responsible for plagiarism.

Received 01.03.2023; revised 12.04.2023; accepted 17.04.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК: 635.21:664.8.047

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-60-64

**Влияние сублимационной сушки на качественные показатели клубней картофеля****Старовойтов Виктор Иванович**, д-р техн. наук, профессор¹agronir1@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9365-7631>**Жевора Сергей Валентинович**, д-р с.-х. наук, профессор¹zhevoraserg@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7833-1331>**Старовойтова Оксана Анатольевна**, д-р с.-х. наук¹agronir2@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8293-6579>**Семенов Геннадий Вячеславович**, д-р техн. наук, профессор²sgv47@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2320-9985>**Манохина Александра Анатольевна**[✉], д-р с.-х. наук, доцент³alexman80@list.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-9785-1164>¹ Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха; 140051, Российская Федерация, Московская область, Люберецкий район, п. Красково, ул. Лорха, 23, литер В² Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ); 125080, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское шоссе, 11³ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. Снижение массы сублимированного картофеля в 4 раза, увеличение срока хранения в десятки раз и устойчивость сублимированного продукта к перепадам температур обуславливает развитие производства сублимированных овощей. С целью изучения качественных показателей клубней картофеля до сублимационной сушки и после нее с помощью стандартных методик проведены исследования отечественных и зарубежных сортов включая сорта с пигментированной мякотью и кожурой. Сублимационная сушка клубней картофеля проводилась в вакуум-сублимационной установке УСС-5 в два этапа: быстрое замораживание пластинок образцов толщиной 2...3 см до -30°C в течение 4 ч и нагрев до $+50^{\circ}\text{C}$ в течение 2,5 ч. Клубни сырого картофеля и сублимированные образцы исследовались на содержание антиоксидантов, фенолов и флавоноидов с использованием стандартных методик. Результаты биохимического анализа показали суммарное содержание спирторастворимых флавоноидов в свежей мякоти картофеля в пересчете на кверцетин 0,08...1,13 мг/г сырой массы, в сублимированных образцах – 0,22...1,46 мг/г сухой массы; суммарное содержание низкомолекулярных антиоксидантов в свежей мякоти от 0,12 до 1,92 мг/г сырой массы, фенольных соединений в сублимированных образцах от 0,55 до 4,63 мг/г сухой массы в эквивалентах галловой кислоты. Исследован уровень поглощения влаги сублимированными ломтиками клубней картофеля. Насыщение влагой пластинок сублимированного картофеля при погружении в воду комнатной температуры наступило в течение 60 мин. Сублимационная сушка не повлияла на содержание антиоксидантов в клубнях картофеля, что позволяет использовать этот метод для создания продуктов здорового питания.

Ключевые слова: картофель, сублимационная сушка клубней картофеля, клубни, содержание антиоксидантов, содержание растворимых фенольных соединений, содержание флавоноидов

Формат цитирования: Старовойтов В.И., Жевора С.В., Старовойтова О.А., Семенов Г.В., Манохина А.А. Влияние сублимационной сушки на качественные показатели клубней картофеля // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 60-64. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-60-64>.

© Старовойтов В.И., Жевора С.В., Старовойтова О.А., Семенов Г.В., Манохина А.А., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Freeze-drying of potato tubers: a study of the qualitative indicators**Viktor I. Starovoitov**, DSc (Eng)¹agronir1@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9365-7631>**Sergey V. Zhevara**, DSc (Ag)¹zhevoraserg@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7833-1331>

Oksana A. Starovoitova, DSc (Ag)¹

agronir2@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8293-6579>

Gennadiy V. Semenov, DSc (Eng)²

sgv47@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2320-9985>

Aleksandra A. Manokhina[✉], DSc (Ag)³

alexman80@list.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-9785-1164>

¹ Russian Potato Research Centre (RPRC), Lorkh Str., 23, liter B, Kraskovo, Lyubertsy district, Moscow region, 140051, Russian Federation

² Russian Biotechnological University (RUSBIOTECH), 11, Volokolamskoe Ave., Moscow, 125080,

³ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya Str., 49, Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract. Freeze-dried vegetable production is intensively developing due to its advantages – a four-time decrease in the weight of supplied freeze-dried potatoes, increased shelf life by dozens of times, and the resistance of freeze-dried products to temperature fluctuations. To study the quality indicators of potato tubers before freeze-drying and after it using standard techniques, the authors analyzed domestic and foreign varieties including those with pigmented flesh and peel. Freeze-drying of potato tubers was carried out in the vacuum-sublimation machine USS-5 in two stages: rapid freezing of 2 to 3 cm thick sample plates to –30°C during 4 h and heating to +50°C during 2.5 h. Raw potato tubers and freeze-dried samples were tested for antioxidant, phenolic and flavonoid content using standard methods. The results of biochemical analysis showed the total content of alcohol-soluble flavonoids in fresh potato pulp in recalculation on quercetin 0.08 to 1.13 mg/g raw weight, in freeze-dried samples – 0.22 to 1.46 mg/g dry weight; total content of low-molecular antioxidants in fresh pulp from 0.12 to 1.92 mg/g raw weight, phenolic compounds in freeze-dried samples from 0.55 to 4.63 mg/g dry weight in gallic acid equivalents. The study also focused on the determination of the moisture absorption level of freeze-dried potato tuber slices. Moisture saturation of freeze-dried potato slices when immersed in room temperature water occurred within 60 min. Freeze drying had no effect on the antioxidant content of the potato tubers. Therefore, this method can be used to produce healthy foods.

Keywords: potatoes, freeze-drying of potato tubers, tubers, antioxidant content, soluble phenolic content, flavonoid content

For citation: Starovoitov V.I., Zhevor S.V., Starovoitova O.A., Semenov G.V., Manokhina A.A. Freeze-drying of potato tubers: a study of the qualitative indicators. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(4):60-64. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-60-64>.

Введение. Перед сельскохозяйственными предприятиями поставлена задача повышения конкурентоспособности отечественных производственных технологий за счет перехода к высокопродуктивному, экологически чистому агропроизводству и использованию биологического потенциала растений для создания безопасных, качественных, в том числе функциональных, продуктов питания из картофеля [1].

В питании человека большое значение имеют антиоксиданты, полифенолы и флавоноиды, содержащиеся в клубнях картофеля, поэтому актуальны исследования, направленные на увеличение качественных показателей [2-5].

Сохранению полезных свойств клубней в процессе их пищевой подготовки способствует сублимационная сушка [2, 6].

В 2021 г. произведено 602,9 т сублимированных продуктов овощей, грибов, ягод и фруктов¹ [7]. По данным американской компании «Mordor Intelligence», мировой рынок сухих сублимированных пищевых продуктов каж-

дый год в среднем возрастает на 7,4%. Овощи составляют 39% мирового рынка сублимированных продуктов².

Сублимационная сушка продуктов уменьшает вес готового продукта на 80% и увеличивает срок годности, по некоторым данным, до 30 лет³ [7, 8]. Вкус, запах и содержание различных питательных веществ сохраняются [3, 4]. Удаление воды сублимацией приводит к созданию высокопористой структуры сублимированных продуктов, которые легко транспортируются на большие расстояния.

Выполненное отечественными специалистами сравнение затрат энергии на хранение и транспортировку сублимированных продуктов показывает, что при продолжительном хранении (несколько месяцев) и перевозке на расстояние более 1000 км сублимированные продукты являются более предпочтительными³.

Антоцианы (пигменты, отвечающие за синий, красный и фиолетовый цвета растений) обладают

¹ Аналитический отчет DISCOVERY RESEARCH GROUP. Анализ рынка сублимированных продуктов в России. URL: <https://drgroup.ru/2321-analiz-rynka-sublimerovannyh-produktov-v-rossii.html> (дата обращения: 26.01.2023).

² Представление различий между сушкой и сублимационной сушкой. URL: <https://eft-rus.ru/novosti/70-predstavlenie-razlichij-mezhdu-sushkoj-i-sublimerovannoj-sushkoj> (дата обращения: 25.01.2023).

³ Семенов Г.В., Краснова И.С. Сублимационная сушка: Монография. М.: Издательство «ДеЛи», 2021. 326 с. EDN: NVTUIX.

свойствами антиоксидантов^{3,4} [9]. Содержание антоцианов, как правило, коррелирует с их антиоксидантной активностью.

В сортах картофеля диапазон концентрации флавоноидов составляет от 0 до 191 мкг/г сырой массы для рутина, в то время как клубни видов группы Phureja содержат до 3000 мкг/г сухой массы. В передовых селекционных линиях содержится более 430 мкг/г сухой массы флавоноидов. Содержание флавонолов увеличивается в клубнях до 140 мкг/г сырой массы. Это позволяет предположить, что использование определенных методов обработки может быть способом увеличения флавонолов в клубнях [5, 10].

В России происходит активное освоение Арктики и северных регионов, а поставка сублимированных овощей и картофеля поможет решить проблему снабжения отдаленных регионов продовольствием. Это направление необходимо развивать, учитывая большую потребность в картофеле (по нормам питания выше других овощей), снижение веса сублимированного картофеля в 4 раза, увеличение срока хранения в десятки раз и устойчивость сублимированного продукта к морозам.

Цель исследований: изучить качественные показатели свежих клубней картофеля отечественных и зарубежных сортов, включая сорта с пигментированной мякотью и кожурой, и подвергшихся сублимационной сушке.

Материалы и методы. Объектами исследований служили клубни картофеля, имеющие разную пигментированность как кожуры, так и мякоти. Содержание углеводов определялось спектрофотометрическим методом согласно ГОСТ 31669-2012 в лаборатории ФГБНУ «ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха» с помощью стандартных методик. Сублимационная сушка картофеля проводилась на вакуум-сублимационной установке УСС-5 в Российском биотехнологическом университете (РОСБИОТЕХ).

Сорта подбирали по цвету кожуры (белая, бежевая, желтая, синяя, красная) и по цвету мякоти (белая, желтая, синяя, фиолетовая).

Исследовали образцы сырых клубней 13 сортов картофеля. Цвет кожуры у сортов Сирень, Василек и Фиолетовый – синий (фиолетовый); у сортов Юбилей Жукова, Колобок, Удача, Невский, Синеглазка и Велокс – белый (бежевый); у сортов Жигулевский ранний, Колетте и Гала – желтый; у сорта Ред Скарлетт – красный. В свою очередь, у сортов Сирень, Юбилей Жукова, Василек, Удача, Невский, Велокс и Синеглазка мякоть белого цвета; у сортов Жигулевский ранний, Колетте, Колобок, Гала и Ред Скарлетт мякоть желтого цвета (светло-желтая); у сорта Фиолетовый мякоть

клубней – фиолетовая. В исследованиях по сублимации клубней картофеля использовались образцы 3 сортов: Гала, Синеглазка и Фиолетовый.

Методика сублимации проб картофеля включает в себя следующие этапы.

1. Отбор неповрежденных здоровых сортовых клубней картофеля: с белой и цветной кожурой; белой и пигментированной мякотью. Помытые и порезанные на пластинки толщиной 2...3 см образцы клубней картофеля укладывали в лотки лабораторной сублимационной сушилки и устанавливали режим работы.

2. Процесс замораживания включает в себя быстрое замораживание (шоковая заморозка до -30°C) с целью максимального сохранения исходных свойств картофеля. Длительность замораживания составила 4 ч. При температуре -25°C происходит фазовый переход «Лёд-пар».

3. Устанавливали температуру нагрева картофеля $+50^{\circ}\text{C}$. Длительность периода удаления связанной влаги (досушивания) составляла 2,5 ч.

4. Сублимированные образцы укладывали в ёмкость и герметично закрывали во избежание воздействия воздуха, света, влаги и появления посторонних запахов.

Измерение антиоксидантов, фенолов и флавоноидов выполняли в лабораториях «ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха» с использованием стандартных методик ГОСТ Р 54037-2010, ГОСТ 34798-202. Определение содержания флавоноидов производилось по измерению оптической плотности раствора с помощью спектрофотомера (длина волны – 430 нм) в пересчете на кверцетин. Суммарное содержание антиоксидантов в разных сортах картофеля определяли амперометрическим методом на жидкостном хроматографе ЦветЯуза 01-АА, разработанным для определения суммарного содержания антиоксидантов в пищевых продуктах, алкогольных и безалкогольных напитках, биологически активных добавках (БАД), лекарственных препаратах, экстрактах лекарственных трав [9]. Использовались порции сырья весом по 5 г.

Анализ данных по восстановлению картофеля после сублимации проводили по Незговорову и Соловьёву³. Для этого пластинки сублимированного картофеля сорта Синеглазка погружали в воду комнатной температуры, периодически вынимали и взвешивали через 5, 20, 60, 600, 1000 мин.

Результаты и их обсуждение. Нашими предыдущими исследованиями установлено, что суммарное содержание антиоксидантов в картофеле изменяется в зависимости от сорта в диапазоне 16...192 мг/100 г (стандарт – галловая кислота) [2].

По результатам измерений содержания антиоксидантов были отобраны наиболее контрастные по содержанию антиоксидантов образцы (Гала, Синеглазка, Фиолетовый), проведена их сублимационная

⁴ Сублимационная сушка продуктов питания. САП-проекты. URL: <https://vsap.ru/freeze-drying-food/?nowprocket=1> (дата обращения: 26.01.2023).

сушка (табл. 1). Образцы сублимированного картофеля сохранили форму высушиваемого объекта.

Анализ результатов биохимических исследований антиоксидантной активности сортов картофеля показал суммарное содержание спирторастворимых флавоноидов в пересчете на кверцетин в свежих клубнях: 0,08...1,13 мг/г сырой массы, в сублимированных образцах – 0,22...2,46 мг/г сухой массы. Содержание низкомолекулярных антиоксидантов в свежей мякоти картофеля составило от 0,12 до 1,92 мг/г сырой массы, суммарное содержание фенольных соединений в сублимированных образцах – от 0,55 до 4,63 мг/г сухой массы в эквивалентах галловой кислоты, что соответствует данным зарубежных исследователей [5, 10].

Анализ экспериментальных данных показывает, что содержание фенольных соединений и флавоноидов в сублимированных образцах остается на том же

уровне, что и в свежих образцах картофеля. Преимуществом сублимированных образцов является меньший вес, что позволяет при транспортировке на большие расстояния доставлять в 4 раза больше полезного груза.

Исследование уровня поглощения влаги сублимированными ломтиками клубней картофеля проводилось на сорте Синеглазка. Насыщение влагой пластинок сублимированного картофеля при погружении в воду комнатной температуры произошло в течение 60 мин. Средняя масса образцов сублимированных клубней картофеля составляла $35,40 \pm 0,2$ г (табл. 2).

Развитая капиллярно-пористая структура сухих сублимированных ломтиков клубней картофеля обеспечивает их быструю и достаточно высокую степень регидратации, о чем свидетельствуют данные таблицы 2. Сублимированные клубни после восстановления становятся как изначальные сырые клубни.

Таблица 1

Суммарное содержание растворимых фенольных соединений и флавоноидов в сублимированных (лиофильных) и свежих образцах картофеля

Table 1

Total content of soluble phenolic compounds and flavonoids in sublimated (lyophilized) and fresh potato samples

Сорт, образец <i>Variety, sample</i>	Суммарное содержание растворимых фенольных соединений, мг/г в пересчете на галловую кислоту <i>Total content of soluble phenolic compounds, mg/g in terms of gallic acid</i>	Суммарное содержание флавоноидов, мг/г в пересчете на кверцетин <i>Total content of flavonoids, mg/g in terms of quercetin</i>
Картофель Синеглазка, сублимированный, мг/г сухой массы <i>Sineglazka potatoes, sublimated, mg/g dry weight</i>	0,60±0,18	0,22±0,09
Картофель Синеглазка, свежие клубни, мг/г сырой массы <i>Sineglazka potatoes, fresh tubers, mg/g wet weight</i>	0,16±0,12	0,08±0,02
Картофель Гала, сублимированный, мг/г сухой массы <i>Gala potatoes, sublimated, mg/g dry weight</i>	0,55±0,11	0,48±0,11
Картофель Гала, свежие клубни, мг/г сырой массы <i>Gala potatoes, fresh tubers, mg/g wet weight</i>	0,12±0,02	0,11±0,02
Картофель Фиолетовый, сублимированный, мг/г сухой массы <i>Fioletoviy (Purple) potatoes, sublimated, mg/g dry weight</i>	4,63±0,18	2,46±0,12
Картофель Фиолетовый, свежие клубни, мг/г сырой массы <i>Fioletoviy (Purple) potatoes, fresh tubers, mg/g wet weight</i>	1,92±0,31	1,13±0,12

Таблица 2

Уровень поглощения влаги сублимированными ломтиками клубней картофеля сорта Синеглазка

Table 2

Moisture absorption level of sublimated slices of Sineglazka potato tubers

Время экспозиции, мин <i>Exposure time, min</i>	Средняя масса восстановленных образцов, г <i>Average weight of recovered samples, g</i>	Масса поглощенной влаги, г <i>Mass of absorbed moisture, g</i>	Доля поглощенной влаги, % к общей массе <i>Proportion of absorbed moisture, % of the total mass</i>
0	35,40±0,2	0	0
5	75,2±0,2	39,80±0,2	52,9
20	81,1±0,2	45,7±0,2	56,5
60	82,5±0,2	47,1±0,2	57,1
600	82,6±0,2	47,2±0,2	57,1
1000	82,6±0,2	47,2±0,2	57,1

В настоящее время действует завод А.Н. Мазурина в г. Боровске, а также строятся новые предприятия в Крыму и Краснодарском крае, ориентированные на сублимационную сушку растительного сырья включая картофель и свеклу⁵.

Выводы

1. Сублимированный картофель сохраняет максимум антиоксидантов и не меняет свойства и структуру продукта. После восстановления сублимированный картофель сохраняет свойства исходного продукта. Время восстановления сублимированного картофеля составляет 60 мин.

⁵ Семенов Г.В., Краснова И.С. Сублимационная сушка: Монография. М.: Издательство «ДелИ», 2021. 326 с. EDN: NVTUIX.

Список использованных источников/ References

1. Старовойтов В.И., Манохина А.А., Старовойтова О.А., Воронов Н.В., Воронова Г.С. Аминокислоты и полифруктаны топинамбура – источник для создания функциональных продуктов питания // Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург – Пушкин, 25-27 мая 2022 г. Санкт-Петербург: СПГА, 2022. С. 231-234. EDN: WSUWLE

Starovoitov V.I., Manokhina A.A., Starovoitova O.A., Voronov N.V., Voronova G.S. Amino acids and polyfructans of Jerusalem artichoke as a source of functional foods. Nauchnoye obespechenie razvitiya APK v usloviyakh importozameshcheniya (*Scientific support for the development of the agro-industrial sector in the context of import substitution*): Collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference St. Petersburg-Pushkin, May 25-27, 2022. St. Petersburg, SPGA, 2022:231-234. (In Rus.)

2. Le S.H., Oh S.H. et al. Antioxidant contents and antioxidant activity of white and colored potatoes (*Solanum tuberosum* L.). *Prevent. Nutr. Food Sci.* 2016;21(2):110-116. <http://dx.doi.org/10.3746/pnf.2016.21.2.110>

3. Wang Q., Chen Q., He M., Mir P., Su J., Yang Q. Inhibitory effect of antioxidant extracts from various potatoes on the proliferation of human colon and liver cancer cells. *Nutrition and Cancer*. 2011;63(7):1044-1052. <http://dx.doi.org/10.1080/01635581.2011.597538>

4. Lewis C.E., Walker J.R.L., Lancaster J.E., Sutton K.H. Determination of anthocyanins, flavonoids and phenolic acid in potatoes. *Colored cultivars of Solanum tuberosum L.J. Sci Food Agric.* 1998;77(1):45-57. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199805\)77:1%3C45::AID-JSFA1%3E3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199805)77:1%3C45::AID-JSFA1%3E3.0.CO;2-S).

Вклад авторов:

В.И. Старовойтов – концептуализация, методология, верификация данных, формальный анализ, проведение исследования, ресурсы, администрирование данных, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование, визуализация; С.В. Жевора – концептуализация, методология, ресурсы, руководство исследованием, создание черновика рукописи; О.А. Старовойтова – программное обеспечение, формальный анализ, проведение исследования, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование, визуализация; Г.В. Семенов – проведение исследования, ресурсы; А.А. Манохина – формальный анализ, проведение исследования, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 06.03.2023; поступила после рецензирования и доработки 02.05.2023; принята к публикации 12.05.2023

2. Результаты биохимического анализа показали суммарное содержание спирторастворимых флавоноидов: в пересчете на кверцетин в свежих клубнях 0,08...1,13 мг/г сырой массы, в сублимированных образцах – 0,22...2,46 мг/г сухой массы. Содержание низкомолекулярных антиоксидантов в свежей мякоти картофеля составило от 0,12 до 1,92 мг/г сырой массы, суммарное содержание фенольных соединений в сублимированных образцах – от 0,55 до 4,63 мг/г сухой массы в эквивалентах галловой кислоты.

3. Сублимационная сушка клубней картофеля может решить проблему снабжения отдаленных регионов продовольствием.

5. Furrer A.N., Chegeni M., Ferruzzi M.G. Impact of potato processing on nutrients, phytochemical and human health. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2018;58(1):146-168. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1139542>

6. Albishi T., John J.A., Al-Khalifa A.S., Shahidi F. Phenolic content and antioxidant activities of selected potato varieties and their processing by-products. *J. Funct. Foods.* 2013;5(2):590-600. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jff.2012.11.019>

7. Andre C.M., Ghislain M., Bertin P., Oufir M., Herrera M.D.R., Hoffmann L., Hausman J. – F., Larondelle Y., Evers D. Andean potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.) as a source of antioxidant and mineral micronutrients. *J. Agricultural and Food Chemistry.* 2007;55(2):366-378. <https://doi.org/10.1021/jf062740i>

8. Lovat C., Nassar A.M.K., Kubow S. et al. Metabolic biosynthesis of potato (*Solanum tuberosum* L.) antioxidants and implications for human health. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2016;56(14):2278-2303. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.830208>

9. Яшин А.Я., Яшин Я.И. Прибор для определения антиоксидантной активности растительных лекарственных экстрактов и напитков // Международная информационная система по резонансным технологиям. 2004. № 34-2-1. С. 10-14. URL: <https://www.ikar.udm.ru/sb/sb34-2-1.htm>

Yashin A.Ya., Yashin Ya.I. Device for determining the antioxidant activity of herbal medicinal extracts and drinks. *International Resonance Technology Information System.* 2004;34-2-1:10-14. URL: <https://www.ikar.udm.ru/sb/sb34-2-1.htm> (In Rus.)

10. Grudzinska M., Czerko Z., Zarzynska K., Borowska-Komenda M. Bioactive compounds in potato tubers: effects of farming system, cooking method and flesh color. *Plos One.* 2016;11(5):e0153980. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153980>

Contribution of the authors

V.I. Starovoitov – conceptualisation, methodology, data verification, formal analysis, study conduct, resources, data administration, manuscript drafting, revision and editing of the final manuscript, visualisation; S.V. Zhevora – conceptualisation, methodology, resources, research supervision, manuscript drafting; O.A. Starovoitova – software, formal analysis, conducting research, original manuscript drafting, revision and editing of the final manuscript, visualization; G.V. Semenov – research, resources; A.A. Manokhina – formal analysis, conducting research, revision and editing of the final manuscript.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 06.03.2023; revised 02.05.2023; accepted 12.05.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.31

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-65-69



Совершенствование технологии производства кукурузы на зерно в условиях Приамурья

Мазур Владимир Валерьевич , научный сотрудникmavv@vniisoi.ru ; <https://orcid.org/0000-0001-9544-2140>*Никульчев Константин Анатольевич*, канд. с.-х. наукnka@vniisoi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5153-8076>

Всероссийский научно-исследовательский институт сои; 675027, Российская Федерация, г. Благовещенск, ул. Игнатьевское шоссе, 19

Аннотация. Урожайность зерна кукурузы зависит от приёмов обработки почвы в технологии ухода за ширококрядными посевами. С целью комплексной оценки применения различных комбинаций рабочих органов культиватора проведены двухлетние исследования по совершенствованию технологии возделывания кукурузы на зерно путём оптимизации системы механизированного ухода за ширококрядными посевами. Суть оптимизации заключается в изменении комбинации рабочих органов в комбинированном почвообрабатывающем агрегате с изменением ширины их расстановки по ширине междурядья и глубины обработки профиля почвы. Комплексная разноглубинная обработка почвы способствует уничтожению сорняков с большей площади междурядья и создает оптимальные условия роста и развития растений кукурузы. Применение в 2021 г. почвообрабатывающего агрегата с комбинацией рабочих органов: двух односторонних плоскорежущих лап (бритв) с перекрытием кромки рабочего органа, стрелчатой лапы по центру междурядья – позволило достичь урожайности кукурузы 3,62 т/га. По сравнению с другими видами обработки прибавка составила от 0,61 до 1,10 т/га. В этот год по сравнению с 2022 г. в ранние фазы роста и развития растений кукурузы и закладки генеративных органов в период с апреля по май наблюдалось избыточное увлажнение, а в июне, июле – недостаток влаги. В 2022 г. применение двух универсальных стрелчатых лап с перекрытием кромки рабочего органа, игольчатых дисков по центру междурядья обеспечило урожайность 9,15 т/га. По сравнению с другими видами обработки прибавка составила от 0,33 до 1,99 т/га. Формированию высокого уровня урожайности в 2022 г. способствовали избыточное увлажнение в период с апреля по июнь и накопление влаги в почве. Выбор комбинации рабочих органов должен определяться погодными условиями.

Ключевые слова: культиватор, лапа, игольчатые диски, кукуруза на зерно

Формат цитирования: Мазур В.В., Никульчев К.А. Совершенствование технологии производства кукурузы на зерно в условиях Приамурья // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25, № 4. С. 65-69. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-65-69>.

© Мазур В.В., Никульчев К.А., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Improving the technology of grain corn production in the conditions of the Amur region

Vladimir V. Mazur , Junior Research Engineermavv@vniisoi.ru ; <https://orcid.org/0000-0001-9544-2140>*Konstantin A. Nikulchev*, CSc (Ag)nka@vniisoi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5153-8076>

All-Russian Research Institute of Soybeans; 19, Ignatievskoe Ave., Blagoveshchensk, 675027, Russian Federation

Abstract. The yield of corn grain depends on the tillage methods used in the cultivation technology of wide-row crops. To make comprehensive assessment of the use of various combinations of the cultivator's working tools, the authors carried out a two-year study to improve the technology of growing corn for grain by optimizing the system of mechanized cultivation of wide-row crops. The essence of optimization is to change the combination of working tools in a combined tillage unit and change the width of their arrangement along the row spacing width and the depth of soil cultivation. Integrated deep tillage contributes to the destruction of weeds from a larger area between the rows and provides optimal conditions for the growth and development of corn. In 2021, use was made of a tillage unit with a combination of working tools – two one-side flat cutting shares (edges) with overlapping of the working

tool edge and a V-shaped share in the center of the inter-row spacing. This combination resulted in a corn yield of 3.62 t/ha. Compared to other types of tillage, the increase was from 0.61 to 1.10 t/ha. This year, in comparison with 2022, in the early phases of the growth of corn and the development of its reproductive parts from April to May, excessive moisture was observed, while in June and July the moisture level was insufficient. In 2022, the use of two universal V-shaped shares with overlapping the working tool edge, inserting wheel spiders in the center of inter-row spacing ensured a yield of 9.15 t/ha. Compared to other types of tillage, the increase was from 0.33 to 1.99 t/ha. The provision of a high yield level in 2022 was facilitated by excessive moisture in the period from April to June and the accumulation of moisture in the soil. The choice of a combination of working tools should be determined by weather conditions.

Keywords: cultivator, V-shaped shares, wheel spiders, grain corn

For citation: Mazur V.V., Nikulchev K.A. Improving the technology of grain corn production in the conditions of the Amur region. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(4):65-69. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-65-69>.

Введение. Рост урожайности зерна кукурузы от 0,5 до 2,6 т/га зависит от отдельных приёмов обработки почвы, применения микро- и макроэлементов [1-5]. Кукуруза, как и любая пропашная культура, предъявляет высокие требования к обработке почвы. Для улучшения водно-воздушного режима почвы, повышения её аэрации с целью стимулирования ростовых процессов корневой системы, уничтожения сорняков в период активного роста и развития растений в ширококорежных посевах кукурузы применяют пропашные культиваторы.

По общепринятой системе технологий и машин для возделывания кукурузы на зерно в Амурской области предпочтение отдают системе ухода, основанной на использовании химических средств защиты растений (СЗР), которые высокоэффективны только при комплексном применении их с агротехническими приёмами. Применение только химических СЗР не обеспечивает оптимальных условий для развития корневой системы, а агротехническая обработка

междурядий сама по себе не обеспечивает высокого качества ввиду недоступности уничтожения сорняков, расположенных вблизи культурных растений (в рядке).

Эффективность агротехнических приёмов во многом зависит от стадии развития сорняков, обрабатываемой площади и глубины обработки почвы в междурядьях [6]. Совершенствование технологии кукурузы на зерно является актуальным и требует дополнительного изучения.

Цель исследований: дать комплексную оценку применения различных комбинаций рабочих органов культиватора в технологии ухода за ширококорежными посевами кукурузы, возделываемой на зерно.

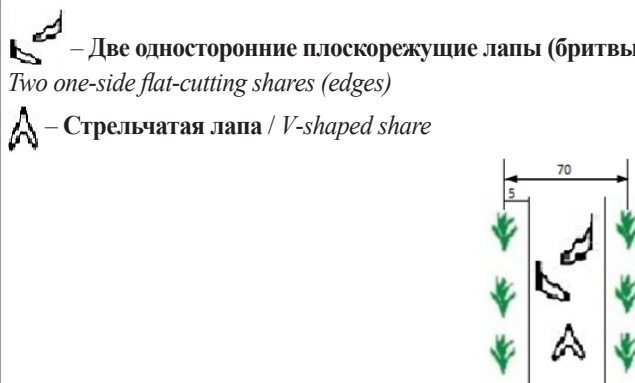
Материалы и методы. В 2021-2022 гг. на опытном поле ФГБНУ ФНЦ ВНИИ сои в селе Садовое Тамбовского района Амурской области исследовалось влияние применения различных комбинаций рабочих органов культиватора при уходе за ширококорежными посевами кукурузы при возделывании на зерно. Схема опыта представлена в таблице 1.

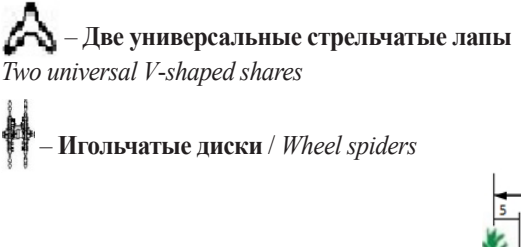
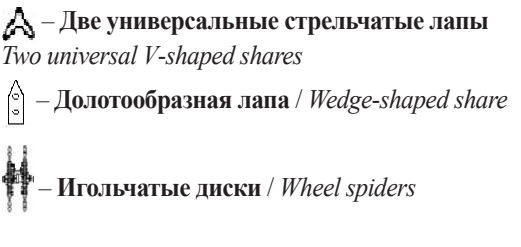
Таблица 1

Схема опыта по оценке способов ухода за ширококорежными посевами кукурузы при возделывании на зерно

Table 1

Experiment scheme to assess the cultivation methods of wide-row grain corn crops

№ п/п	Вариант / Variant	Исследуемые приемы возделывания / Studied tillage methods
1	КОНТРОЛЬ / Control  – Две односторонние плоскорежущие лапы (бритвы) Two one-side flat-cutting shares (edges) – Стрельчатая лапа / V-shaped share	Подрезание сорняков и рыхление почвы в междурядьях на глубину до 6 см Сплошная обработка междурядий на глубину до 14 см Ширина междурядья – 70 см Первая обработка: защитная зона – 5 см Вторая обработка: защитная зона – 10 см Undercutting weeds and loosening the soil in the inter-row spacing to a depth of up to 6 cm. Overall tillage of the inter-row spacing to a depth of up to 14 cm. Width of the inter-row spacing is 70 cm. Protection zone is 5 cm. Second treatment: protection zone 10 cm

№ п/п	Вариант / Variant	Изучаемые приемы возделывания / Studied tillage methods
2	 – Две односторонние плоскорежущие лапы (бритвы) Two one-side flat-cutting shares (edges) – Долотообразная лапа / Wedge-shaped share – Игольчатые диски / Wheel spiders	Подрезание сорняков и рыхление почвы в междурядьях на глубину до 6 см Рыхление почвы на глубину до 15 см Разрушение почвенной корки и уничтожение сорняков Ширина междурядья – 70 см Первая обработка: защитная зона – 5 см Вторая обработка: защитная зона – 10 см Undercutting weeds and loosening the soil in the inter-row spacing to a depth of up to 6 cm. Overall tillage of the inter-row spacing to a depth of up to 15 cm. Width of the inter-row spacing is 70 cm. Protection zone is 5 cm. Second treatment: protection zone 10 cm
3	 – Две универсальные стрелчатые лапы Two universal V-shaped shares – Игольчатые диски / Wheel spiders	Сплошная обработка междурядий на глубину до 14 см Разрушение почвенной корки и уничтожение сорняков Ширина междурядья – 70 см Первая обработка: защитная зона – 5 см Вторая обработка: защитная зона – 10 см Overall tillage of the inter-row spacing to a depth of up to 15 cm. Destruction of the soil crust and removal of weeds Width of the inter-row spacing is 70 cm. Protection zone is 5 cm. Second treatment: protection zone 10 cm
4	 – Две универсальные стрелчатые лапы Two universal V-shaped shares – Долотообразная лапа / Wedge-shaped share – Игольчатые диски / Wheel spiders	Сплошная обработка междурядий на глубину до 14 см Рыхление почвы на глубину до 15 см Разрушение почвенной корки и уничтожение сорняков Ширина междурядья – 70 см Первая обработка: защитная зона – 5 см Вторая обработка: защитная зона – 10 см Overall tillage of the inter-row spacing to a depth of up to 15 cm. Loosening the soil to a depth of 15 cm. Destruction of the soil crust and removal of weeds Width of the inter-row spacing is 70 cm. Protection zone is 5 cm. Second treatment: protection zone 10 cm

За контроль (вариант 1) принята комбинация рабочих органов, включающая в себя две односторонние плоскорежущие лапы (бритвы) и стрелчатую лапу по центру как наиболее распространённую при проведении междурядных обработок пропашных культур. Количество обработок – две. Первую междурядную обработку проводили при раскрытии на растениях кукурузы 2-3 листьев, вторую – при 5-6 листьях. Повторность в опыте трехкратная, площадь делянки – 200 м², учётная площадь – 50 м².

Математическую обработку опыта проводили методом дисперсионного анализа по методике Б.А. Доспехова¹. Учёт урожая зерна кукурузы в опытах проводили согласно методике ГСИ².

¹ Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

² Юрина А.В. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Екатеринбург: Уральский ГАУ, 1985. 110 с.

Опытный посев среднеспелого гибрида кукурузы Фалькон осуществлялся после сои сеялкой Берегиня 25 мая при ширине междурядий 70 см. Норма высева составляла 80 тыс. всхожих семян на 1 га с глубиной заделки 4...6 см. Междурядная обработка проводилась несколькими рабочими органами: односторонними плоскорежущими лапами (бритвами) с глубиной рыхления 6...8 см, универсальными стрелчатыми лапами на глубину 10...12 см, долотообразной лапой на глубину 15...20 см, игольчатыми дисками с глубиной рыхления 8...10 см. Защитная зона составляла при первой обработке до 5 см, при второй – до 10 см [7, 8].

Результаты и их обсуждение. В результате проведённых исследований наблюдали прибавку урожайности зерна кукурузы при использовании различных вариантов набора рабочих органов (табл. 2).

Разница по урожайности объясняется различием в обеспеченности посевов кукурузы влагой по годам (табл. 2). В 2021 г. отмечено избыточное увлажнение в период с апреля по май, а в июне-июле отмечен недостаток влаги в ранние фазы роста и развития растений кукурузы и закладки генеративных органов, что отрицательно сказалось на урожайности семян. Таким образом, в этот год можно выделить контрольный вариант опыта (две односторонние плоскорежущие лапы (бритвы) с перекрытием кромки рабочего органа, стрелчатая лапа по центру междурядья) с урожайностью 3,62 т/га. При этом необходимо отметить,

что в условиях недостаточного увлажнения 2021 г. именно углубление обрабатываемого слоя позволило корневой системе кукурузы лучше развиваться и обеспечить растения влагой.

В 2022 г. отмечен недостаток влаги в июле, который компенсировался избыточным увлажнением в период с апреля по июнь, что способствовало накоплению влаги в почве и формированию высокого уровня урожайности в третьем варианте опыта (две универсальные стрелчатые лапы с перекрытием кромки рабочего органа, игольчатые диски по центру междурядья) с урожайностью 9,15 т/га. При этом в условиях переувлажнения 2022 г. стрелчатые лапы, обрабатывающие почву на глубину 14 см, способствовали оттоку излишней влаги в подпахотные горизонты почвы.

По-видимому, увеличение урожайности произошло за счёт оптимального распределения рабочих органов по ширине междурядья и глубине обработки почвы, что создало условия для оптимизации водно-воздушных условий почвы.

Структура затрат практически во всех вариантах меняется незначительно в связи с применением в технологии ухода за ширококормными посевами кукурузы рабочих органов, примерно одинаковых по принципу применения и разноточной обработки почвы. Основные отличия связаны с увеличением затрат на ГСМ. В связи с этим критерием эффективности технологий может служить урожайность кукурузы на зерно.

Таблица 2

Урожайность кукурузы на зерно при комбайновой уборке, т/га

Table 2

Grain corn yield resulting from combine harvesting, t/ha

№ п/п	Варианты опыта <i>Experiment variants</i>	Урожайность кукурузы на зерно, т/га <i>Grain corn yield, t/ha</i>	
		2021 г.	2022 г.
1	Контроль (две односторонние плоскорежущие лапы (бритвы) с перекрытием кромки рабочего органа + стрелчатая лапа по центру междурядья) <i>Two one-side flat-cutting shares (edges) with overlapping of the edge of the working tool + a wedge-shaped share in the inter-row spacing center</i>	3,62	7,16
2	Две односторонние плоскорежущие лапы (бритвы) с перекрытием кромки рабочего органа + долотообразная лапа и игольчатые диски по центру междурядья <i>Two one-side flat-cutting shares (edges) with overlapping edges of the working tool + a wedge-shaped share and a wheel spider in the inter-row spacing center</i>	2,52	8,88
3	Две универсальные стрелчатые лапы с перекрытием кромки рабочего органа + игольчатые диски по центру междурядья <i>Two universal V-shaped shares with overlapping edges of the working tool + a wheel spider in the inter-row spacing center</i>	2,57	9,15
4	Две универсальные стрелчатые лапы с перекрытием кромки рабочего органа + долотообразная лапа и игольчатые диски по центру междурядья <i>Two universal V-shaped shares with overlapping edges of the working tool + a wedge-shaped share and a wheel spider in the inter-row spacing center</i>	3,01	8,82
НСР ₀₅ / <i>Smallest significant difference₀₅</i>		2,63	4,11
$F_{\text{факт}}/F_{\text{actual}}$		0,45	0,57
$F_{\text{теор}}/F_{\text{theoretical}}$		4,76	4,76

Выводы

1. При избыточном увлажнении в период с апреля по май, а в июне, июле – при недостатке влаги в ранние фазы роста и развития растений кукурузы и закладки генеративных органов, что отмечалось в 2021 г., целесообразным является применение почвообрабатывающего агрегата с комбинацией рабочих органов: две односторонние плоскорежущие лапы (бритвы) с перекрытием кромки рабочего органа, стрельчатая лапа по центру междурядья. В этом случае урожайность кукурузы составила 3,62 т/га, что

дает прибавку от 0,61 до 1,10 т/га по сравнению с результатами при других видах обработки.

2. При недостатке влаги в июле, который компенсировался избыточным увлажнением в период с апреля по июнь, что способствовало накоплению влаги в почве и формированию высокого уровня урожайности в 2022 г., целесообразным является применение двух универсальных стрельчатых лап с перекрытием кромки рабочего органа, игольчатых дисков по центру междурядья. В этом случае урожайность составила 9,15 т/га, что дает прибавку от 0,33 до 1,99 т/га по сравнению с результатами при других видах обработки.

Список использованных источников

1. Еремин Д.И., Демин Е.А. Влияние междурядной обработки кукурузы на агрофизические свойства чернозема выщелоченного // Вестник государственного аграрного университета Северного Зауралья. 2016. № 4 (35). С. 47-53. EDN: XVSYYJ.
2. Тойгильдин А.Л., Подсевалов М.И., Аюпов Д.Э., Тюрин А.В. Продуктивность гибридов кукурузы на зерно в зависимости от приемов возделывания в условиях лесостепной зоны Поволжья // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 4 (52). С. 56-64. EDN: UMMRXF.
3. Игнатова Г.А. Засорённость посевов кукурузы при разных технологиях производства // Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК: Материалы XVIII Международной научной конференции, Брянск, 24-25 мая 2021 г. Ч. 2. Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2021. С. 13-19. EDN: NSWUOK.
4. Shcatula Y. Higher reduction in maize Cereals on grain. *Sciences of Europe*. 2020;60-1 (60):3-10. <https://doi.org/10.24412/3162-2364-2020-60-1-3-10>
5. Ханьева И.М., Шогенов Ю.М., Гешева М.В., Виндугот Т.С. Продуктивность кукурузы в зависимости от способов применения микроудобрений в условиях Кабардино-Балкарии // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. 2019. № 4 (26). С. 16-20. EDN: UJSZIJ.
6. Кудрявцев Д.В., Магдин А.Г., Горбунов А.А., Нестеренко Р.А., Жанзакова Д.К. Применение сельскохозяйственного беспилотного летательного аппарата для обработки сельскохозяйственных культур // Агротехника и энергообеспечение. 2021. № 2 (31). С. 37-47. EDN: OASYEL.
7. Бумбар И.В., Мазур В.В., Кувшинов А.А. Совершенствование технологий и технических средств при возделывании кукурузы на зерно в Южной сельскохозяйственной зоне Амурской области // Дальневосточный аграрный вестник. 2021. № 2 (58). С. 131-136. <https://doi.org/10.24412/1999-6837-2021-2-131-136>
8. Мазур В.В. Оценка эффективности применения комбинаций рабочих органов культиватора для возделывания кукурузы // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 4. С. 37-41. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-4-37-41>

Вклад авторов

В.В. Мазур – концептуализация, создание черновика рукописи, формальный анализ и проведение исследований, визуализация.
К.А. Никулчев – методология, руководство исследованием, создание окончательной версии (доработка) рукописи и её редактирование.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 19.12.2022, после рецензирования и доработки 06.07.2023, принята к публикации 07.07.2023

References

1. Eremin D.I., Demin E.A. Influence of inter-row cultivation of corn on agrophysical properties of the leached black soil. *Vestnik gosudarstvennogo agrarnogo universiteta Severnogo Zauralya*. 2016;4(35):47-53. (In Rus.)
2. Toigildin A.L., Podsevalov M.I., Ayupov D.E., Tyurin A.V. Productivity of corn hybrids for grain depending on cultivation methods in the conditions of the Volga forest-steppe zone. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2020;4(52):56-64. (In Rus.)
3. Ignatova G.A. Contamination of corn crops under different production technologies. *Agroecological aspects of sustainable development of the agro-industrial sector: Proceedings of the 28th International Scientific Conference*, Bryansk, May 24-25, 2021. Bryansk: Bryansk State Agrarian University, 2021;2:13-19. (In Rus.)
4. Shcatula Y. Higher reduction in maize Cereals on grain. *Sciences of Europe*. 2020;60-1(60):3-10. <https://doi.org/10.24412/3162-2364-2020-60-1-3-10>
5. Khanieva I.M., Shogenov Yu.M., Gesheva M.V., Vin-dugov T.S. Corn yield depending on ways of application of microfertilizers under conditions of Kabardino-Balkaria. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2019;4(26):16-20. (In Rus.)
6. Kudryavtsev D.V., Magdin A.G., Gorbunov A.A., Nesterenko R.A., Zhanzakova D.K. Application of agricultural unmanned aircraft for treating agricultural crops with chemicals. *Agrotehnika i energoobespechenie*. 2021;2(31):37-44. (In Rus.)
7. Bumar I.V., Mazur V.V., Kuvshinov A.A. Improvement of technologies and technical equipment of corn cultivation for grain in the south agricultural zone of the Amur region. *Dal-nevostochniy Agrarniy Vestnik*. 2021;2(58):131-136. (In Rus.) <https://doi.org/10.24412/1999-6837-2021-2-131-136>
8. Mazur V.V. Evaluation of the effectiveness of combining corn cultivator working tools. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(4):37-41. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-4-37-41>

Contribution of the authors

V.V. Mazur – conceptualisation, writing the manuscript draft, formal analysis and research, visualisation.
K.A. Nikulchev – methodology, research supervision, revising and editing the manuscript

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 19.12.2022; revised 06.07.2023; accepted 07.07.2023

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.923.74

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-70-75



Методика комплектования деталей соединений «Вал-уплотнение» при ремонте

Леонов Олег Альбертович , д-р техн. наук, профессорoaleonov@rgau-msha.ru ; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>; Scopus Autor ID: 57209748174; Researcher ID: ABC-5873-2020**Шкаруба Нина Жоровна**, д-р техн. наук, профессорshkaruba@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>; Scopus Autor ID: 57210255441; ResearcherID: AAF-6340-2019**Вергазова Юлия Геннадьевна**, канд. техн. наук, доцентvergazova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7564-7656>; Scopus Autor ID: 57210258726; Researcher ID: AAD-5899-2022**Нестеркин Геннадий Алексеевич**

metr@rgau-msha.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. Надежность современных уплотнительных узлов сельскохозяйственной техники является недостаточной. Вследствие износа поверхности вала и манжеты при эксплуатации уменьшаются натяги в подвижном соединении, что приводит к началу утечек и отказу узла. Утечки технических жидкостей в агрегатах составляют 20...30% от общего числа отказов, в межремонтный период отказ уплотнений встречается в 1,5 раза чаще, чем у новой техники. Методика комплектования деталей соединений валов с манжетами позволит назначать рациональные ремонтные размеры валов и подбирать к ним манжеты. С целью её разработки рассмотрены основные направления обеспечения эксплуатационной надёжности соединений валов, в том числе прогрессивные способы восстановления поверхности вала. При разработке методики исследовались 100 изношенных первичных валов коробки передач двигателя ЯМЗ-239 и 100 новых манжет 1.2-52'72-8. Произведено измерение изношенной поверхности вала под манжету и внутренних диаметров отверстий манжет. Износ поверхности вала под манжету достигал 0,5 мм, а вероятность появления валов, имеющих износ более допустимого 51,7 мм, составила 33%. При сборке изношенных валов с новыми манжетами разброс натягов составлял от 1,7 до 3 мм. При этом граница наименьшего натяга, равного 2 мм, нарушена у 15% соединений. В соединениях новых манжет с валами, обработанными под ремонтный размер 51,4 мм, разброс натягов находился в диапазоне от 1,6 до 3 мм, при этом граница наименьшего натяга нарушена у 20% соединений. По критерию сохранения наименьшего натяга в соединении апробирована методика комплектования деталей соединений «Вал-уплотнение», включающая в себя расчет числа групп, назначение ремонтных размеров вала и подбор к ним диаметров манжет. В результате вероятность появления соединений с гарантированным натягом не менее 2 мкм составила 88%. Следовательно, предлагаемая методика комплектования валов и манжет позволяет обеспечить долговечность соединений «Вал-уплотнение» на уровне новых.

Ключевые слова: методика комплектования деталей соединений, ремонт, допуск, вал, манжета, надежность, долговечность, натяг

Формат цитирования: Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Нестеркин Г.А. Методика комплектования деталей соединений «Вал-уплотнение» при ремонте // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 70-75. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-70-75>.

© Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Нестеркин Г.А., 2023

ORIGINAL PAPER

Methodology of completing the parts of the “Shaft seal” connections during repair

Oleg A. Leonov , DSc (Eng), Professoroaleonov@rgau-msha.ru ; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>; Scopus Autor ID: 57209748174; Researcher ID: ABC-5873-2020**Nina Zh. Shkaruba**, DSc (Eng), Professorshkaruba@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>; Scopus Autor ID: 57210255441; ResearcherID: AAF-6340-2019

Yuliya G. Vergazova, CSc (Eng), Associate Professor

vergazova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7564-7656>; Scopus Autor ID: 57210258726; Researcher ID: AAD-5899-2022

Gennady A. Nesterkin

metr@rgau-msha.ru

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract. The reliability of modern sealing units of agricultural machinery is insufficient. Due to surface wear of the shaft and the seal during operation, the tightness in the movable joint decreases. This condition leads to the onset of leaks and the assembly failure. Leaks of technical fluids in units account for 20 to 30% of the total number of failures; during the overhaul period, seal failures occur 1.5 times more often than in new equipment. The method of completing the parts of shaft connections with seals will be useful for assigning rational repair dimensions of the shafts and selecting suitable seals. For its development, the authors considered the main ways to ensure the operational reliability of shaft connections, including advanced methods for restoring the shaft surface. When developing the method, 100 worn input shafts of the YaMZ-239 engine gearbox and 100 new seals 1.2-52'72-8 were studied. Measurements were taken of the worn surface of the shaft under the seal and the inner diameters of the seal holes. The wear of the shaft surface under the seals reached 0.5 mm, and the probability of the shafts with wear exceeding the allowable 51.7 mm was 33%. When assembling worn shafts with new seals, the spread of interference ranged from 1.7 to 3 mm. At the same time, the limit of the least tightness, equal to 2 mm, was violated in 15% of the connections. In the connections of new seals with shafts machined to a repair size of 51.4 mm, the spread of interference ranged between 1.6 mm and 3 mm, while the limit of the least interference was violated in 20% of the connections. According to the criterion of maintaining the least tightness in the connection, the method of completing the parts of the “shaft-seal” connection was tested, including the calculation of the number of groups, the assignment of shaft repair dimensions and the selection of seal diameters. As a result, the probability of appearing connections with a guaranteed tightness of at least 2 microns was 88%, therefore, the proposed method of selecting shafts and seals makes it possible to make the durability of shaft-seal connections comparable to the new ones.

Keywords: method of completing connection parts, repair, tolerance, shaft, seal, reliability, durability, tightness

For citation: Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Nesterkin G.A. Methodology of completing the parts of the “Shaft seal” connections during repair. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(4):70-75. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-70-75>.

Введение. На надежность сборочных единиц сельскохозяйственной техники существенное влияние оказывает долговечность работы уплотнительных устройств. Утечки масла в коробках передач, редукторах, двигателях и в других агрегатах составляют 20...30% от общего числа отказов, а в межремонтный период отказы уплотнений встречаются в 1,5 раза чаще, чем в доремонтный. При ремонте сельскохозяйственной техники все уплотнения подлежат замене, и 10...80% сопряженных с ними деталей валов требуют замены или восстановления¹.

При ремонте валы восстанавливаются под номинальный размер различными способами, в том числе с применением ремонтных втулок и полимерных материалов [1, 2]. Проводятся исследования по оценке показателей качества деталей и соединения [3, 4], контактного давления на поверхностях [5, 6], обеспечения работоспособности [7]. Применяется размерный анализ для расчета отклонений от соосности манжеты и вала в конкретных сборочных единицах [8]. Изучаются вопросы качества финишной обработки поверхности вала [9].

¹ Мельников О.М. Повышение работоспособности уплотнительных устройств подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2020. 161 с.

Наряду с проведением практических исследований изучаются вопросы математического обеспечения взаимодействия контактирующих поверхностей соединения «Вал-манжета» [10], но пока не разработана теория герметичности резиновых армированных манжет.

Наряду с параметрами износостойкости существенную роль в обеспечении надежности и долговечности работы соединений с натягом играют параметры точности – такие, как допуски размеров, отклонения и допуски посадки [11, 12]. Изучаются вопросы измерения натягов в процессе эксплуатации путем применения моделей параметрического отказа [13].

При назначении рациональных ремонтных размеров валов и подбора к ним манжет необходима методика комплектования деталей соединений.

Цель исследований: разработка методики комплектования деталей соединений валов с манжетами для обеспечения заданной долговечности.

Материалы и методы. В исследованиях применены положения теории точности, взаимозаменяемости, вероятности и математической статистики.

Объектом исследований являлся первичный вал коробки передач двигателя ЯМЗ. Предмет исследований – соединения «Вал-уплотнение», параметры точности которых представлены в таблице 1.

Таблица 1
Параметры точности валов и манжет 1.2-52×72-8
соединения «Вал-уплотнение»

Table 1
Accuracy parameters of shafts and cuffs 1.2-52×72-8
shaft-seal connections

Наименование измеряемого диаметра <i>Name of the measured diameter</i>	Номинальный размер с отклонениями, мм <i>Nominal size with deviations, mm</i>	Допуск, мм <i>Tolerance, mm</i>	Размер, предельно допустимый, без ремонта, мм <i>Limit of size without repair, mm</i>
Вал / Shaft	52 _{-0,12}	0,12	57,7
Отверстие манжеты <i>Hole of a rubber seal</i>	52 _{-2,0 -3,0}	1,0	*

*При ремонте все манжеты заменяются на новые.

Средства измерений внутреннего диаметра манжеты и посадочной поверхности под манжету на валу выбирались в соответствии с требованиями ГОСТ 8.051-81 «Государственная система обеспечения единства измерений. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм».

Для измерения внутреннего диаметра манжеты использовалась оптическая измерительная система, собранная на базе инструментального микроскопа, дискретность отсчета 0,01 мм. Для измерения диаметра посадочной поверхности под манжету на первичном валу коробки передач двигателя ЯМЗ применялся индикатор цифровой часового типа, дискретность отсчета 0,001 мм, в сборе со специальным острым наконечником в стойке.

Результаты и их обсуждение. Долговечность соединения «Вал-уплотнение» обеспечивается заданными величинами натягов, получаемых при сборке. При эксплуатации происходит уменьшение натягов подвижного соединения ввиду износа поверхности вала и манжеты, что приводит к началу утечек и отказу соединения.

В коробке передач двигателя ЯМЗ допуск на наружный диаметр вала составляет 0,12 мм, а допуск отверстий манжет – 1 мм (табл. 1), поэтому до выведения следов износа можно обрабатывать валы с сохранением параметров точности и твердости (твердость поверхности вала HRC 30...50) на малую глубину до 0,5 мм путем финишного шлифования под ремонтный размер.

При ремонте вала необходимо не только вывести следы износа, но и учесть припуск на обработку. Это объясняется изнашиванием поверхности вала и значительным искажением его геометрической формы (рис. 1).

На основании данных рисунка 1 можно определить ремонтный размер вала, используя зависимость

$$d_{pp} = (d_n + es - e) - \frac{2 \cdot \beta \cdot U}{1 + \beta}, \quad (1)$$

где d_n – номинальный диаметр вала, мм; es – верхнее отклонение, мм; $\beta = U_{\max}/U_{\min}$ – коэффициент неравномерности износа; e – диаметральный припуск на отработку, мм; $U_{\max}$ и $U_{\min}$ – наибольший и наименьший износ на сторону; $U = U_{\max} + U_{\min}$ – диаметральный межремонтный износ вала, мм.

Валы, обработанные под ремонтный размер, рассчитанный по формуле (1), соединяют с новыми манжетами. При этом в полученных соединениях не будет обеспечен наименьший конструктивный натяг, необходимый для обеспечения долговечности соединения.

При единичном и мелкосерийном производстве обычно применяется сплошная дефектация валов, поэтому рекомендуется использовать методику комплектации соединений путем использования группы ремонтных размеров (ГР). Число ремонтных размеров в группе можно определить как

$$n = \frac{\omega_{\text{изн}}}{T_d + (m - ei)}, \quad (2)$$

где m – шаг между ремонтными размерами; ei – наименьшее отклонение вала, мм.

Для обеспечения равенства натягов нового и восстановленного соединения манжеты к валам ремонтных размеров должны подбираться по внутреннему диаметру (рис. 2). Верхние отклонения от номинального размера манжет, устанавливаемых на валы ремонтных размеров, определяем по формуле:

$$ES\phi_{\max} = ES_{\max} - (d_n - d_{pp}). \quad (3)$$

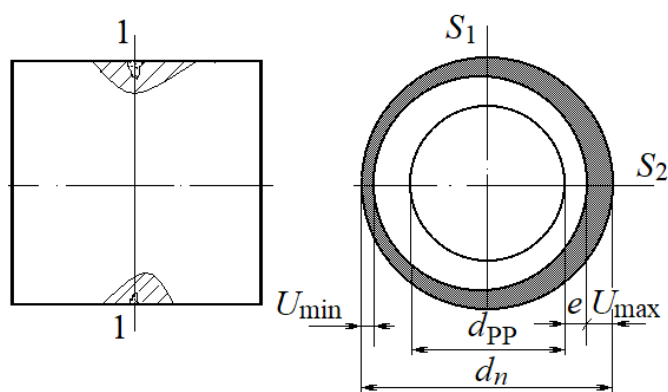


Рис. 1. Связь ремонтного размера вала с износом и припуском:

1-1 – измеряемое сечение; S_1, S_2 – измеряемые плоскости

Fig. 1. Relationship of the repair size of the shaft with wear and allowance:

1-1 – measured section; S_1, S_2 – measured planes

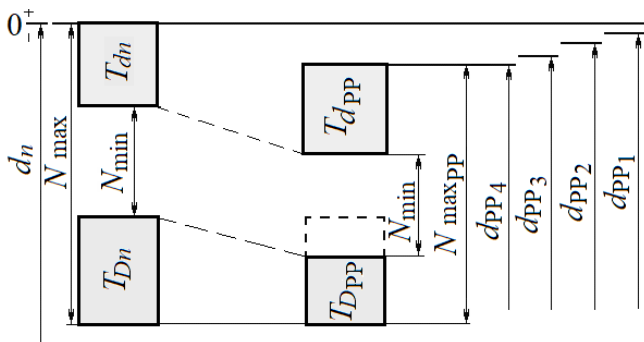


Рис. 2. Обоснование сортировки манжет по внутреннему диаметру при постановке на валы ремонтного размера (с целью сохранения наименьшего конструктивного натяга)

Fig. 2. Justification for sorting rubber seals by inner diameter when mounting on shafts of a repair size (to preserve the smallest structural tension)

Рассмотрим предлагаемую методику комплектования на следующем примере.

Для исследований были отобраны 100 изношенных первичных валов коробки передач двигателя ЯМЗ и 100 новых манжет 1.2-52'72-8. Произведено измерение изношенной поверхности вала под манжету и внутренних диаметров отверстий манжет (табл. 2, рис. 3, 4).

Из данных рисунка 3 следует, что распределение внутренних диаметров новых манжет находится в пределах допуска и все измеренные манжеты являются годными.

Из данных рисунка 4 следует, что износ поверхности вала под манжету достигает величины 0,5 мм, но большая часть распределена ближе к номинальному размеру. Вероятность появления валов, имеющих износ поверхности под манжету менее допустимого 57,7 мм (табл. 1), составила 33%. При сборке с новыми манжетами разброс натягов в пределах $\pm\sigma$ составит от 1,7 до 3 мм, при этом граница наименьшего натяга, равного 2 мм, будет нарушена у 15% соединений. Остальные 67% валов могут быть обработаны под ремонтный размер 51,4 мм, определенный по формуле (1), до выведения следов износа с учётом припуска

Параметры рассеяния диаметров изношенных валов и новых манжет

Таблица 2

Table 2

Parameters of diameter dispersion of worn shafts and new rubber seals

Параметры распределения <i>Distribution parameters</i>	Манжеты (новые) <i>Rubber seals (new)</i>	Валы (изношенные) <i>Shafts (worn out)</i>
Среднее арифметическое, мм <i>Arithmetic mean, mm</i>	49,5875	51,806
Среднее квадратическое отклонение, мм <i>Mean square deviation, mm</i>	0,177	0,109
Зона рассеяния, мм <i>Spread, mm</i>	1,060	0,655

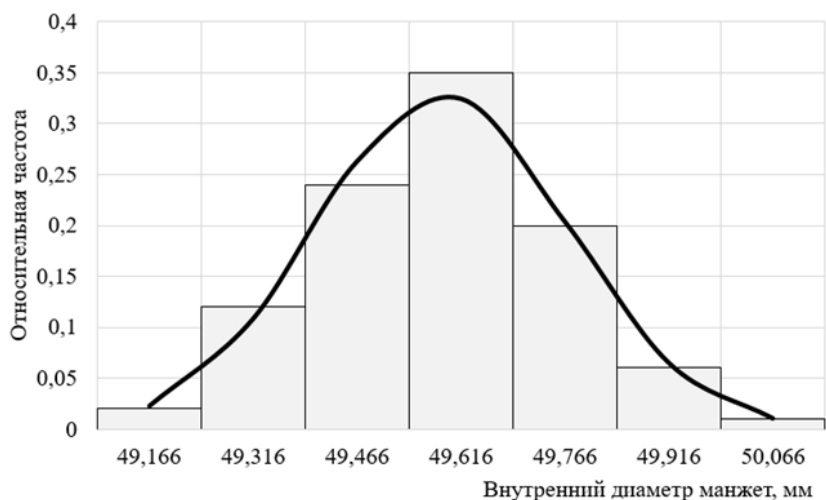


Рис. 3. Распределение внутренних диаметров новых манжет

Fig. 3. Distribution of internal diameters of new rubber seals

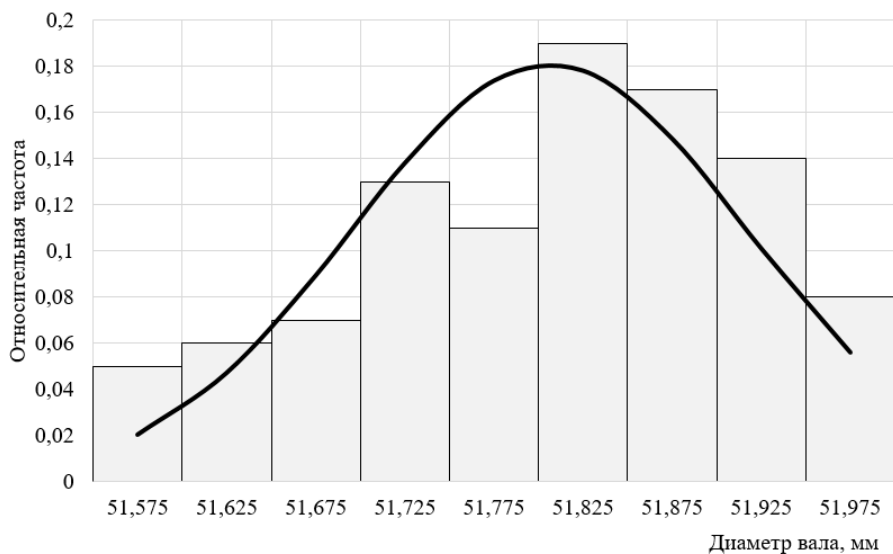


Рис. 4. Распределение изношенной поверхности вала под манжету

Fig. 4. Distribution of the worn surface of the shaft under the rubber seals

на обработку. В этом случае в соединениях новых манжет с валами, обработанными под ремонтный размер, разброс натягов в пределах $\pm\sigma$ составит от 1,6 до 3 мм, при этом граница наименьшего натяга, равного 2 мм, будет нарушена у 20% соединений.

Применим предлагаемую методику комплектации, для чего рассчитаем число ремонтных размеров валов в группе по формуле (2) и определим отклонения внутренних диаметров манжет по критерию сохранения наименьшего конструктивного натяга для каждого ремонтного размера. В результате расчета получим $n = 3,7$, поэтому примем $n = 4$ и составим комплектуючую таблицу 3.

С использованием характеристик полученных рассеяний (табл. 2) определены вероятности появления

валов и манжет в каждой размерной группе при комплектовании, рассчитаны вероятности появления соединений по каждой группе (табл. 4).

Из данных таблицы 4 следует, что при применении предлагаемой методики вероятность появления соединений с гарантированным натягом не менее 2 мкм составляет 88% (так, на 100% валов, обработанных под ремонтные размеры, хватает 88% манжет), что свидетельствует о незавершенной сборке.

Для повышения процента сборки соединений следует закупать на 12...15% больше манжет, чем обрабатываемых под ремонтный размер валов. Остальные манжеты (12%) могут быть собраны с новыми валами, которые заменяют выбракованные валы в процессе дефектации по другим причинам.

Таблица 3

Комплектовочная таблица для соединения «Вал-уплотнение»

Table 3

Assembly table for "shaft-rubber seal" connection

Ремонтный размер, мм / Repair size, mm		Маркировка Marking	Припуск на обработку Machining allowance	Размеры подбираемых манжет, мм Dimensions of the selected rubber seals, mm
при расчете по допуску when calculating the tolerance	при расчете по зоне рассеяния when calculating the spread			
51,8 _{-0,12}	51,8 _{-0,072}	1P	0,05	52 ^{-2,2} _{-3,0}
51,7 _{-0,12}	51,7 _{-0,072}	2P	0,05	52 ^{-2,3} _{-3,0}
51,6 _{-0,12}	51,6 _{-0,072}	3P	0,05	52 ^{-2,4} _{-3,0}
51,5 _{-0,12}	51,5 _{-0,072}	4P	0,05	52 ^{-2,5} _{-3,0}

Таблица 4

Вероятности появления валов и манжет, попадающих в ремонтную группу при комплектовании

Table 4

Probabilities of using shafts and seals that fall into the repair group when completing the units

Ремонтная группа Repair group	Диапазоны размеров валов, мм Ranges of shaft sizes falling into the repair group, mm	Вероятность, появления валов, мм Probability of using shafts, mm	Диапазоны размеров манжет, мм Size ranges of rubber seals, mm	Вероятность появления манжет, мм Probability of using rubber seals, mm
1P	51,85 и более	0,34	49,0...49,8	0,88
2P	51,85...51,75	0,35	49,0...49,7	0,73
3P	51,75...51,65	0,23	49,0...49,6	0,53
4P	51,65 и менее	0,07	49,0...49,5	0,31

Выводы

Разработанная методика комплектования деталей соединений «Вал-уплотнение», включающая в себя расчёт числа групп, назначение ремонтных размеров вала и подбор манжет по критерию сохранения наи-

меньшего натяга в соединении, применима для восстановления всех соединений типа «Вал-уплотнение», где уплотнением является стандартная резиновая армированная манжета (ГОСТ 8752-79). Перед расчётом ремонтных размеров необходимо провести анализ величин износа валов.

Список использованных источников

1. Игнаткин И.Ю., Дроздов А.В. Способ восстановления вала редуктора с применением упрочненной ремонтной детали // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 9. С. 13-17. EDN: LRSMGN
2. Игнаткин И.Ю., Серов А.В., Дроздов А.В. Способ восстановления вала редуктора с применением ремонтной детали и полимерных материалов // Вестник НГИЭИ. 2021. № 5(120). С. 53-64. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-5-53-64>
3. Grün J., Gohs M., Bauer F. Multiscale structural mechanics of rotary shaft seals: numerical studies and visual experiments. *Lubricants*. 2023;11(6):234 <https://doi.org/10.3390/lubricants11060234>
4. Мельников О.М., Казанцев С.П., Игнаткин И.Ю. Совершенствование уплотнительных устройств подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 3. С. 68-72. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-68-72>
5. Белов М.И., Ерохин М.Н., Мельников О.М. Оценка давления уплотнения на вал // Агроинженерия. 2020. № 2(96). С. 29-33. <https://doi.org/driveshaftseal10.26897/2687-1149-2020-2-29-33>
6. Ерохин М.Н., Белов М.И., Мельников О.М. Методика расчета контактного давления манжеты на вал // Вестник машиностроения. 2020. № 11. С. 39-45. EDN: PLAAFT
7. Zhou Q., Li Sh., Zhang K., Qin K., Lv V., Sun W., Yuan T. Transitions of Wear Characteristics for Rubber/Steel Seal Pairs During the Abrasive Wear Process. *Tribology Letters*. 2021;69:101. <https://doi.org/10.1007/s11249-021-01480-4>
8. Ерохин М.Н., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Амелин С.С., Бодунов Д.М. Применение размерного анализа для расчета суммарного отклонения от соосности манжеты относительно вала // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. № 6. С. 61-67. EDN: ITEXLG
9. Ягьяев Э.Э., Шрон Б.Л. Повышение надежности работы соединения «вал-манжета» при суперфинишировании с осцилляцией на поверхности вала // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2017. № 1(55). С. 48-53. EDN YPJNDF
10. Шрон Б.Л., Ягьяев Э.Э., Мевлют Ш.Т. Математическое обеспечение взаимодействия контактирующих поверхностей соединения «вал-манжета» // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2016. № 1(51). С. 123-127. EDN: WNGKZX
11. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г. Расчет посадки с натягом при комбинированном нагружении // Вестник машиностроения. 2021. № 3. С. 25-28. EDN: QUAQQG
12. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Хасьянова Д.У. Обоснование посадок соединений со шпонками // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2022. № 6. С. 65-71. EDN: EITIEV
13. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. Расчет допуска посадки по модели параметрического отказа соединения // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2020. № 4. С. 14-20. EDN: VILYGG

Вклад авторов

О.А. Леонов – руководство исследованием; формулирование основной концепции исследования и задач;
 Н.Ж. Шкаруба – разработка методологии исследования, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
 Ю.Г. Вергазова – верификация данных; визуализация данных, разработка программного обеспечения;
 Г.А. Нестеркин – подготовка начального варианта текста, формирование выводов представления, описание результатов и формирование выводов исследования.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 07.03.2023; поступила после рецензирования и доработки 30.05.2023; принята к публикации 30.05.2023

References

1. Ignatkin I.Yu., Drozdov A.V. Renewal method of gearbox shaft with use of strengthened repair part. *Repair, Reconditioning, Modernization*. 2020;9:13-17. (In Rus.)
2. Ignatkin I.Yu., Serov A.V., Drozdov A.V. Method for recovery of the reduction gear shaft using repair parts and polymer materials. *Bulletin NGIEI*. 2021;5(120):53-64. (In Rus.) <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-5-53-64>
3. Grün J., Gohs M., Bauer F. Multiscale structural mechanics of rotary shaft seals: numerical studies and visual experiments. *Lubricants*. 2023;11(6):234. (In Rus.) <https://doi.org/10.3390/lubricants11060234>
4. Melnikov O.M., Kazantsev S.P., Ignatkin I.Yu. Improving sealing elements of the bearing assembly of agricultural machinery. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(3):68-72. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-68-72>
5. Belov M.I., Erokhin M.N., Melnikov O.M. Evaluation of seal pressure on the shaft *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2020;2(96):29-33. (In Rus.) <https://doi.org/driveshaftseal10.26897/2687-1149-2020-2-29-33>
6. Erokhin M.N., Belov M.I., Melnikov O.M. Method of calculating the contact pressure of the seal on the shaft. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2020;11:39-45. (In Rus.)
7. Zhou Q., Li Sh., Zhang K., Qin K., Lv V., Sun W., Yuan T. Transitions of wear characteristics for rubber/steel seal pairs during the abrasive wear process. *Tribology Letters*. 2021;69:101. <https://doi.org/10.1007/s11249-021-01480-4>
8. Erokhin M.N., Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Amelin S.S., Bodunov D.M. Application of dimensional analysis for calculating the total misalignment between a seal and a shaft. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2021;50(6):524-529. (In Rus.) <https://doi.org/10.3103/S1052618821060066>
9. Yagyaev E.E., Shron B.L. Improvement reliability of work of the “shaft-seal” connection for superfinishing from oscillations on the shaft surface. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta*. 2017;1(55):48-53. (In Rus.)
10. Shron B.L., Yagyaev E.E., Mevlyut Sh.T. Mathematical support of the “shaft-seal” contacting surfaces. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta*. 2016;1(51):123-127. (In Rus.)
11. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G. Calculation of interference fits under combined loading. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2021;3:25-28. (In Rus.)
12. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Khasyanova D.U. Determining the fits of keyed connections. *Problemy Mashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin*. 2022;6:65-71.
13. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. Calculation of the fit tolerance by model parametric joint failure model. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2020;49(12):1027-1032. (In Rus.) <https://doi.org/10.3103/S1052618820120092>

Contribution of the authors

O.A. Leonov – research supervision; formulation of the main research concept and objectives;
 N.Zh. Shkaruba – development of the research methodology, revising and editing of the final manuscript;
 Yu.G. Vergazova – data verification; data visualization, software development;
 G.A. Nesterkin – writing the original version of the text, presenting and describing the research results, drawing the conclusions.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 07.03.2023; revised 30.05.2023; accepted 30.05.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 62-762:63

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-76-80

**Влияние браслетной пружины на контактную нагрузку в соединении «Вал-манжета»****Мельников Олег Михайлович**[✉], канд. техн. наукmelnikov@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-3202-8799>; Scopus Author ID: 57209744643**Серов Никита Вячеславович**, канд. техн. наук, доцентn.serov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7676-4344>; Scopus Author ID: 57226809065**Гамидов Абдурахман Гаджиевич**, канд. техн. наук, доцентn.serov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4222-3726>; Scopus Author ID: 57224404150**Лапаев Андрей Валентинович**, старший преподаватель

a9162968177@yandex.ru

Павлов Александр Егорович, д-р техн. наук, доцентpavlov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5870-7960>; Scopus Author ID: 60069979

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. Манжеты резиновые армированные служат в качестве уплотнений подшипниковых узлов. Надёжная работа обеспечивается прижатием рабочей кромки манжеты к валу. На контактную нагрузку в соединении влияет усилие, создаваемое браслетной пружиной. Представленная методика позволяет определить удельную контактную нагрузку рабочей кромки манжеты на вал от браслетной пружины в зависимости от параметров манжет и пружин. Для проверки адекватности методики исследована партия манжет армированных 1.1-45×65-1 ГОСТ 8752-79 в количестве 25 шт. Теоретические расчеты контактного усилия от действия пружины составили 2,64...3,804 Н, удельные контактные нагрузки – 0,098...0,153 Н/мм, а по экспериментальным данным – соответственно 2,75...3,50 Н и 0,102...0,141 Н/мм. Высокая сходимости подтверждает верность представленных расчётных зависимостей. Установлено, что параметры манжет имеют большой разброс, что не позволяет достаточно точно рассчитать удельную нагрузку в соединении «Вал-манжета». Для увеличения точности показаний необходимо уменьшать допуски на размеры резинотехнических изделий.

Ключевые слова: вал-манжета, манжеты резиновые армированные, параметры манжет, удельные контактные нагрузки, давление браслетной пружины, допуск

Формат цитирования: Мельников О.М., Серов Н.В., Гамидов А.Г., Лапаев А.В., Павлов А.Е. Влияние браслетной пружины на контактную нагрузку в соединении «Вал-манжета» // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 76-80. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-76-80>.

© Мельников О.М., Серов Н.В., Гамидов А.Г., Лапаев А.В., Павлов А.Е., 2023

ORIGINAL PAPER

Influence of the band spring on the contact load in the shaft-seal connection**Oleg M. Melnikov**[✉], CSc (Eng)melnikov@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-3202-8799>; Scopus Author ID: 57209744643**Nikita V. Serov**, CSc (Eng), Associate Professorn.serov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7676-4344>; Scopus Author ID: 57226809065**Abdurakhman G. Gamidov**, CSc (Eng), Associate Professorn.serov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4222-3726>; Scopus Author ID: 57224404150**Andrey V. Lapaev**, senior lecturer

a9162968177@yandex.ru

Alexander E. Pavlov, DSc (Eng), Associate Professorpavlov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5870-7960>; Scopus Author ID: 60069979

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127550, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49

Abstract. Reinforced rubber seals are used in bearing assemblies. Their reliable operation is ensured by pressing the working edge of the seal to the shaft. The contact load in the connection is affected by the force generated

by the band spring. The presented method is used to determine the specific contact load of the working edge of the seal on the shaft offered by the bracelet spring, depending on the parameters of the seals and springs. To check the adequacy of the methodology, the authors studied a batch of reinforced seals 1.1-45×65-1 GOST 8752-79 in the amount of 25 pcs. Theoretical calculations of the contact force from the action of the spring were 2.64 to 3.804 N, specific contact loads – 0.098 to 0.153 N/mm, and according to experimental data – 2.75 to 3.50 N and 0.102 to 0.141 N/mm, respectively. High convergence confirms the correctness of the presented calculated dependencies. It has been established that the parameters of the seals have a large spread, which hampers accurate calculation of the specific load in the “shaft-seal” connection. To increase the accuracy of readings, it is necessary to reduce the tolerances on the dimensions of rubber products.

Keywords: shaft-seal connection, reinforced rubber seals, seal parameters, specific contact loads, band spring pressure, tolerance

For citation: Melnikov O.M., Serov N.V., Gamidov A.G., Lapaev A.V., Pavlov A.E. Influence of the band spring on the contact load in the shaft-seal connection. Agricultural Engineering (Moscow), 2023;25(4):76-80. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-76-80>.

Введение. Решение проблемы формирования заданной надёжности ответственных соединений сборочных единиц сельскохозяйственной техники является одной из главных задач современных научных исследований [1, 2]. На данный момент можно выделить два основных направления исследований: повышение износостойкости поверхности [3, 4] и расчёт рациональных норм точности [5, 6].

Особое внимание при формировании надёжности узлов и агрегатов сельскохозяйственной техники следует уделять соединениям манжет с валами, так как при их отказе значительно снижается долговечность всех соединений узла. На данное соединение оказывают влияние такие факторы, как отклонение от соосности вала относительно манжеты и радиальное биение вала [7]. Эти факторы необходимо компенсировать натягом в соединении, но классические методики [8] в этом случае являются неприемлемыми.

Нарушение герметичности уплотнительных устройств является наиболее частой причиной выхода из строя подшипниковых узлов¹ [9]. Для агрегатов, эксплуатирующихся в условиях запыленности, попадание абразива в зону трения приводит к износу посадочной поверхности вала и снижению ресурса агрегата в целом [10-12]. Одним из путей повышения долговечности уплотнительных узлов является упрочнение шейки вала, работающей в контакте с манжетой [13]. С другой стороны, увеличить ресурс манжет можно, понижая напряжения в резине за счёт уменьшения деформации или повышения её эластичности. Согласно теоретическому анализу в манжетах, изготовленных с внутренним диаметром, обеспечивающим минимальный натяг, напряжения от растяжения и изгиба губы стремятся к нулю. В этом случае необходимое усилие прижатия рабочей кромки манжеты к валу лучше регулировать натяжением или жёсткостью пружины [14, 15]. Параметром, учитывающим

большинство конструктивных и эксплуатационных факторов, влияющих на герметичность манжетных уплотнений, является удельная контактная нагрузка манжеты на вал $\bar{F}^2$ [16]. Расчёт удельных контактных нагрузок в соединении «Вал-манжета» от давления браслетной пружины позволит определять удельную контактную нагрузку рабочей кромки манжеты на вал в зависимости от размеров манжет и параметров пружин.

Цель исследований: разработать и апробировать на конкретном примере методику расчёта удельных контактных нагрузок в соединении «Вал-манжета» в зависимости от давления браслетной пружины.

Материалы и методы. С целью определения необходимых параметров исследовано 25 манжет армированных 1.1-45×65-1 ГОСТ 8752-79 и 5 браслетных пружин.

На удельные контактные нагрузки большое влияние оказывают размеры сопрягаемых элементов. Прослеживается неравенство допусков на внутренний диаметр манжеты и диаметр вала. Например, внутреннему диаметру манжеты³ $D_0 45_{-4,58}^{-2,75}$ мм по ГОСТ 8752-79 соответствует диаметр вала $45h10 (45_{0,1})$ мм – допуск на внутренний диаметр манжеты $T_D = 1,83$ мм, а диаметр вала $T_d = 0,1$ мм. Внутренний диаметр манжет D_0 зависит как от размера формы для их изготовления, так и от длины и усилия пружины⁴.

² Кондаков Л.А., Голубев А.И., Овандер В.Б. и др. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник. М.: Машиностроение, 1986. 463 с.

³ Ерохин М.Н., Леонов О.А., Катаев Ю.В., Мельников О.М. Расчёт предельного натяга в соединениях «Вал-манжета» // Инновационные технологии реновации в машиностроении: Сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвящённой 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана; Под общ. ред. В.Ю. Лавриненко. 2019. С. 311-315. EDN: ZBJUAX.

⁴ Шишкин И.Ф. Теоретическая метрология. Ч. 1. Общая теория измерений. СПб.: Изд-во Питер, 2010. 192 с.

¹ Ерохин М.Н., Казанцев С.П. Детали машин. М.: ТРАНСЛОГ, 2018. 410 с.

Внутренний диаметр D_0 определили по методике⁵ [17], остальные размеры – на основе данных отраслевого стандарта⁶ и посредством измерения исследуемых манжет (рис. 1, 2).

Результаты и их обсуждение. Силу, действующую при растяжении пружины (F_n , Н), определяем по выражению:

$$F_n = F_0 + \Delta F, \quad (1)$$

где F_0 – сила начального натяжения пружины, получаемая при изготовлении, Н; ΔF – приращение силы от растяжения пружины, Н.

Начальную силу F_0 (Н), действующую в нерастянутой пружине, определим по выражению⁷:

$$F_0 = \frac{\pi \tau_0 d_n^3}{8 k d_c}, \quad (2)$$

где τ_0 – тангенциальное напряжение, возникающее в пружине при изготовлении, МПа; d_n – диаметр проволоки, мм; d_c – средний диаметр пружины $d_c = d_b + d_n$ (d_b – внутренний диаметр пружины), мм; k – коэффициент кривизны витков, $k = (4c + 2) / (4c - 3)$ (c – индекс пружины, $c = d_c / d_n$). Для браслетных пружин манжет⁸ индекс $c = 4 \dots 5$.

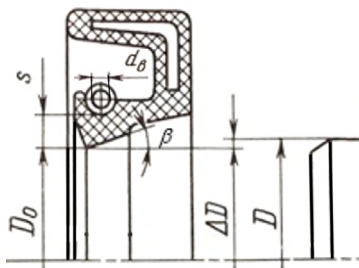


Рис. 1. Размеры элементов соединения «Вал-манжета»
Fig. 1. Dimensions of the elements of the shaft-seal connection

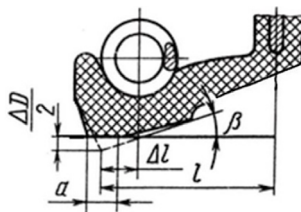


Рис. 2. Губа манжеты
Fig. 2. Seal lip

⁵ Леонов О.А. Повышение долговечности подвижных соединений «Вал-уплотнение» оптимизацией точностных параметров (на примере редукторов картофелеуборочных комбайнов): Дис. ... канд. техн. наук. М.: МГАУ, 1994. 150 с.

⁶ ОСТ 1 10454-72, ОСТ 1 10455-72. Манжеты резиновые армированные. Конструкция и размеры.

⁷ Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Карп А.В. и др. Детали машин и основы конструирования. 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. М.Н. Ерохина. М.: КолосС, 2005. 462 с.

⁸ Голубев А.И., Кондаков Л.А. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник. М.: Машиностроение, 1986. 464 с.

На рисунке 1 представлены размеры элементов манжеты.

Усилие от деформации пружины –

$$\Delta F = \Delta L \cdot C, \text{ Н}, \quad (3)$$

где ΔL – увеличение длины пружины при рабочем положении манжеты на валу, мм; C – жёсткость пружины $C = G d_n^4 / (8 z_p d_c^3)$ (где G – модуль сдвига материала пружины, МПа; z_p – число рабочих витков пружины $z_p = L_0 / d_n$).

Подставив данные выражения в формулу 3, получим

$$\Delta F = \Delta L G d_n^5 / (8 L_0 d_c^3). \quad (4)$$

Удлинение пружины определим по выражению:

$$\Delta L = \pi (\Delta D - 2 \Delta s_n) = \pi \Delta D \left(1 - \frac{2sv}{(D_0 + s)} \right), \quad (5)$$

где Δs_n – уменьшение толщины губы манжеты s при продольном растяжении ($\Delta s_n = sv \Delta D / (D_0 + s)$), мм; v – отношение уменьшения толщины к удлинению.

Чтобы уменьшить влияние износа рабочей кромки на $\bar{F}_i$ и увеличить площадь контакта, пружину смещают от вершины рабочей кромки ближе к каркасу манжеты на величину Δl (рис. 2).

Удельные контактные нагрузки в соединении «Вал-манжета» от давления браслетной пружины определяем по выражению:

$$\bar{F}_n = 2 F_n (l - \Delta l) / ID, \text{ Н / м}. \quad (6)$$

В определенном интервале диаметров валов D размеры элементов в сечении манжет остаются без изменений. Тогда с увеличением диаметра вала уменьшается относительное удлинение пружины, следовательно, снижается F_n . При износе кромки манжеты происходит уменьшение толщины губы и, следовательно, уменьшение растяжения пружины, что также приводит к снижению удельной контактной нагрузки $\bar{F}_n$.

Для уменьшения влияния удлинения пружины рекомендуется повысить силу начального натяжения пружины F_0 .

Используя стандартные значения витых пружин $d_c = 2,1$ мм, $d_n = 0,4$ мм, усилие предварительного натяжения F_0 определяем по выражению (2):

$$F_0 = \frac{\pi \tau_0 d_n^3}{8 k d_c} = \frac{3,14 \cdot (220 \dots 270) \cdot 0,4^3}{8 \cdot 1,3 \cdot 2,1} = 2,024 \dots 2,484 \text{ Н}.$$

Усилия ΔF от деформации пружины определили по формуле 4, подставив $s = 2,1 \pm 0,1$ мм согласно измерениям и рассчитав удлинение пружин $\Delta L = 7,5 \dots 13$ мм при начальной длине пружин испытуемых манжет $L_0 = 147 \dots 148$ мм.

$$\Delta F = (0,616 \dots 1,32), \text{ Н}.$$

Тогда усилие от действия браслетной пружины –
 $F_{\Pi} = F_0 + \Delta F = (2,024...2,484) + (0,616...1,32) =$
 $= (2,64...3,804) \text{ Н}.$

Замеры 5 пружин испытываемых манжет, проводимые при таких же деформациях, показали близкие значения усилия от действия браслетной пружины $F_{\Pi} = 2,75...3,50 \text{ Н}$, на рисунке 3 выделенные разным цветом.

Удельные контактные нагрузки в соединении «Вал-манжета» от давления браслетной пружины определили после измерения расстояния от каркаса до кромки манжеты (l) и смещения

пружины от вершины рабочей кромки (Δl)
 $l = 6,2 \pm 0,2 \text{ мм}$ и $\Delta l = 0,6...1 \text{ мм}$:

$$\bar{F}_{\Pi} = 0,098...0,153 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}.$$

Высокая сходимость экспериментальных данных с теоретическими расчетами (табл.) подтверждает верность последних.

Большие допуски размеров дают разброс величины $\bar{F}_{\Pi}$ в 1,5 раза. Наибольший разброс дают геометрические параметры эластичного элемента манжет.

Таблица

Значения исследуемых параметров

Table

Values of the studied parameters

Параметры Options	Вид исследований / Type of research	
	теоретические theoretical	экспериментальные experimental
Начальное натяжение пружины F_0 , Н Initial spring tension F_0 , N	2,024...2,484	2,05...2,30
Усилие от деформации пружины ΔF , Н Spring deformation force ΔF , N	0,616...1,32	0,70...1,20
Полное усилие браслетной пружины F_{Π} , Н Full reinforcement of the bracelet spring F_{Π} , N	2,64...3,804	2,75...3,50
Удельная контактная нагрузка F_{Π} , Н Specific contact load F_{Π} , N	0,098...0,153	0,102...0,141

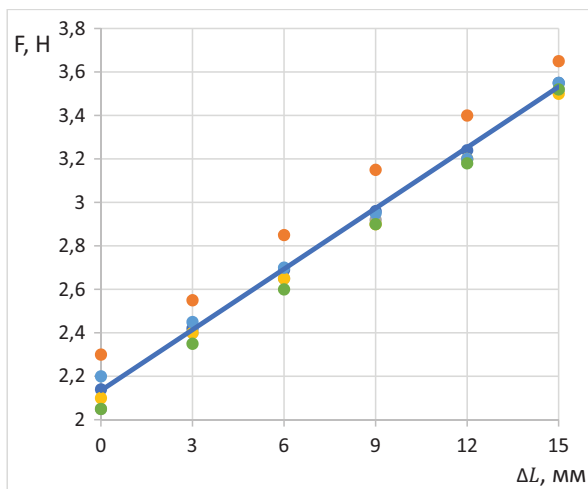


Рис. 3. График соответствия усилия пружин их удлинению (экспериментальные данные)

Fig. 3. Graph of the correspondence between the force of springs and their elongation (experimental data)

Выводы

Разработанная методика позволяет вычислить удельные контактные нагрузки в соединении «Вал-манжета» в зависимости от давления браслетной пружины. Методика апробирована на примере соединения стандартной резиновой армированной манжеты диаметром 45 мм с валом. Получена прямая линейная зависимость между усилием пружины и ее

удлинением. В результате графического сопоставления расчетных и опытных данных установлена их высокая сходимость, что подтверждает адекватность разработанной математической модели. Для уменьшения разброса получаемых показаний удельных контактных нагрузок рекомендуется уменьшить допуски на размеры сечения губы и внутренний диаметр резиновой армированной манжеты.

Список использованных источников

1. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. Модель параметрического отказа для расчета точностных параметров соединения с зазором // Трение и износ. 2019. Т. 40, № 4. С. 424-430. EDN: PMGHHY
2. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. Расчет допуска посадки по модели параметрического отказа соединения // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2020. № 4. С. 14-20. EDN: VILYGG
3. Гребнев Ю.В., Карпова Е.Ю., Габельченко Н.И. Исследование возможности повышения износостойкости деталей очистного оборудования из хромистого чугуна // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2019. № 7 (230). С. 54-58. EDN: ESGSUR

References

1. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. Parametric failure model for the calculation of the fit tolerance of clearance joints. *Journal of Friction and Wear*. 2019;40(4):332-336. (In Rus.) <https://doi.org/10.3103/S1068366619040068>
2. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. Calculation of the fit tolerance by model parametric joint failure model. *Journal of machinery manufacture and reliability*. 2020;49(12):1027-1032. (In Rus.) <https://doi.org/10.3103/S1052618820120092>
3. Grebnev Y.V., Karpova E.Y., Gabelchenko N.I. Study of the possibility of improving the wear resistance of wear-resistant chromium cast iron parts of sewage treatment plants. *Izvestia Volgograd State Technical University*. 2019;7(230):54-58. (In Rus.)

4. Сухочев Г.А., Иванников В.А., Смоленцев В.П. Повышение износостойкости покрытий нагруженных деталей транспортных машин // Физика, химия и механика трибосистем. 2005. № 4. С. 68-71. EDN: VHSEVN

5. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Голиничкий П.В., Пупкова Д.А. Расчет посадок соединений упругих втулочно-пальцевых муфт с валами // Вестник машиностроения. 2023. № 2. С. 96-101. EDN: ITNRLQ

6. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Хасьянова Д.У. Обоснование посадок соединений со шпонками // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2022. № 6. С. 65-71. EDN: EITIEV

7. Ерохин М.Н., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Амелин С.С., Бодунов Д.М. Применение размерного анализа для расчёта суммарного отклонения от соосности манжеты относительно вала // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2021. № 6. С. 61-67. <https://doi.org/10.31857/S0235711921060067>

8. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г. Расчёт посадок с натягом при комбинированном нагружении // Вестник машиностроения. 2021. № 3. С. 25-28. EDN: QUAQQG

9. Кононенко А.С., Игнаткин И.Ю., Дроздов А.В. Восстановление шейки вала редуктора приклеиванием упрочненной втулки // Клеи. Герметики. Технологии. 2021. № 8. С. 33-39. EDN: TTXMNN

10. Kononenko A.S., Ignatkin I.Y., Drozdov A.V. Recovering a reducing-gear shaft neck by reinforced-bush adhesion. *Polymer Science, Series D*. 2022;15(2):137-142. <https://doi.org/10.1134/S1995421222020113>

11. Игнаткин И.Ю., Дроздов А.В. Способ восстановления изношенной поверхности вала редуктора в соединении «Вал-манжета» с применением ремонтной втулки и полимерных материалов // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2019. № 6 (94). С. 40-45. <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-6-40-45>

12. Игнаткин И.Ю., Серов А.В., Дроздов А.В. Способ восстановления вала редуктора с применением ремонтной детали и полимерных материалов // Вестник НПИЭИ. 2021. № 5 (120). С. 53-64. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-5-53-64>

13. Устройство для испытания образцов на абразивное изнашивание: Патент на полезную модель RU200804 U1 РФ, МПК G01N3/56, № 2020121100 / И.Ю. Игнаткин, А.В. Дроздов; заявл. 25.06.2020; опубл. 12.11.2020. EDN: PERZFE

14. Erokhin M.N., Belov M.I., Mel'nikov O.M. Contact pressure of a rubber cuff on a shaft. *Russian Engineering Research*. 2021;41(2):115-122. <https://doi.org/10.3103/S1068798X21020052>

15. Расчёт контактного давления радиального манжетного уплотнения: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: RU2020661171 / М.Н. Ерохин, М.И. Белов, О.М. Мельников; заявл. № 2020619792; опубл. 18.09.2020. Object Pascal Lazarus, 2134 K6. EDN: FXDVOT

16. Ерохин М.Н., Белов М.И., Мельников О.М. Методика расчета контактного давления манжеты на вал // Вестник машиностроения. 2020. № 11. С. 39-45. EDN: PLAAFT

17. Мельников О.М., Казанцев С.П., Игнаткин И.Ю., Скороходов Д.М., Белов М.И. Совершенствование уплотнительных устройств подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 3. С. 68-72. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-68-72>

4. Sukhochev G.A., Ivannikov V.A., Smolentsev V.P. Improving the wear resistance of the coatings of loaded parts of transport machines. *Fizika, Khimiya i Mekhanika Tribosistem*. 2005;4:68-71. (In Rus.)

5. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Golinitzkiy P.V., Pupkova D.A. Calculation of joint fits of elastic sleeve-pin couplings with shafts. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2023;2:96-101. (In Rus.)

6. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Khasyanova D.U. Rationale the for fit of keyed connections. *Problemy Mashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin*. 2022;6:65-71. (In Rus.)

7. Erokhin M.N., Leonov O.A., Shkaruba N.Z., Amelin S.S., Bodunov D.M. Application of dimensional analysis for calculating the total misalignment between a seal and a shaft. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2021;50(6):524-529. (In Rus.) <https://doi.org/10.3103/S1052618821060066>

8. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G. Calculation of interference fits under combined loading. *Vestnik mashinostroeniya*. 2021;3:25-28. (In Rus.)

9. Kononenko A.S., Ignatkin I.Yu., Drozdov A.V. Renewing gearbox shaft journals by gluing a hardened sleeve. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*. 2021;8:33-39. (In Rus.)

10. Kononenko A.S., Ignatkin I.Y., Drozdov A.V. Recovering a reducing-gear shaft neck by reinforced-bush adhesion. *Polymer Science, Series D*. 2022;15 (2):137-142. (In Rus.) <https://doi.org/10.1134/S1995421222020113>

11. Ignatkin I.Yu., Drozdov A.V. Method of restoring the worn surface of a reduction gear shaft in a 'shaft-to-collar' connection using a repair bushing and polymeric materials. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2019;6(94):40-45. (In Rus.) <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-6-40-45>

12. Ignatkin I.Y., Serov A.V., Drozdov A.V. Method of recovering the reduction shaft using repair parts and polymer materials. *Bulletin NGIEI*. 2021;5(120):53-64. (In Rus.) <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-5-53-64>

13. Ignatkin I.Yu., Drozdov A.V. Device for testing samples for abrasive wear: Utility model patent RU200804 U1 RF, IPC G01N3/56, No. 2020121100, 2020. (In Rus.)

14. Erokhin M.N., Belov M.I., Mel'nikov O.M. Contact pressure of a rubber cuff on a shaft. *Russian Engineering Research*. 2021;41(2):115-122. (In Rus.) <https://doi.org/10.3103/S1068798X21020052>

15. Erokhin M.N., Belov M.I., Melnikov O.M. Calculation of the contact pressure of a radial lip seal: Certificate of state registration of a computer program: RU2020661171, No. 2020619792; 2020. Object Pascal Lazarus, 2134 Kb (In Rus.)

16. Erokhin M.N., Belov M.I., Mel'nikov O.M. Method of calculating the contact pressure of the seal on the shaft. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2020;11:39-45. (In Rus.)

17. Melnikov O.M., Kazantsev S.P., Ignatkin I.Yu., Skorohodov D.M., Belov M.I. Improving sealing elements of the bearing assembly of agricultural machinery. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(3):68-72. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-68-72>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила в редакцию 19.05.2023; поступила после рецензирования и доработки 30.05.2023; принята к публикации 30.05.2023

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 07.03.2023; revised 30.05.2023; accepted 30.05.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-81-84

**Определение оптимальных технологических параметров процесса очистки деталей в погружных моечных машинах****Петрик Дмитрий Юрьевич**✉, аспирант¹

petrick.dmitry2016@yandex.ru✉

Корнеев Виктор Михайлович, канд. техн. наук, доцент¹

tsmo@rgau-msha.ru

Петрик Владислав Юрьевич, студент²

mrpetryke@gmail.com

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49² Московский колледж транспорта; 129626, Российская Федерация, г. Москва, Кучин пер., 14

Аннотация. Очистка и мойка загрязнённых поверхностей деталей машин являются актуальными при ремонтном производстве. Повышение эффективности процесса очистки металлических деталей возможно при использовании комбинации погружного, струйного и ультразвукового методов. Многообразие конструкций моющих машин и установок, использующих разные методы очистки, требует определения оптимальных технологических параметров и режимов процесса, а также выявления эффективного моющего раствора. С этой целью проведен эксперимент относительно процесса очистки металлических деталей от остатков смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) в погружных моечных машинах с применением ультразвуковых колебаний. Для очистки металлических деталей от остатков СОЖ исследовались растворы димера, лабонида и кальцинированной соды. Для интенсификации процесса мойки металлических деталей использовалась ультразвуковая установка УЗДН-А с постоянной частотой колебаний. Степень очищения металлических деталей оценивалась отношением массы загрязнителя, удаленного с ее поверхности, к его начальной массе (в процентах). Полученные математические модели степени очистки металлических деталей (для марок конструкционных углеродистых сталей и цветных металлов) от СОЖ позволили определить оптимальные технологические параметры: концентрация моющих растворов – 15...20%; рабочая температура для димера – 20...30°C, для лабонида – 70...80°C, для кальцинированной соды – 80...90°C. Установлено, что наиболее энергоэффективным и безопасным моющим раствором является димер, а применение лабонида при ультразвуковом очищении нецелесообразно ввиду его повышенного пенообразования. Также установлено, что время мытья (нахождение металлических деталей в машине) и количество масла на поверхности металлических деталей существенно не влияют на степень очистки.

Ключевые слова: ультразвуковая очистка, эффективность, интенсификация, критерии, оптимизация, загрязнение, поверхность отклика

Формат цитирования: Петрик Д.Ю., Корнеев В.М., Петрик В.Ю. Определение оптимальных технологических параметров процесса очистки деталей в погружных моечных машинах // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25, № 4. С. 81-84. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-81-84>.

© Петрик Д.Ю., Корнеев В.М., Петрик В.Ю., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Determining the optimum technological parameters of cleaning parts in submersible washing machines**Dmitry Yu. Petrik**✉, PhD student

petrick.dmitry2016@yandex.ru✉

Viktor M. Korneev, CSc (Eng), Associate Professor

tsmo@rgau-msha.ru

Vladislav Yu. Petrik, student²

mrpetryke@gmail.com

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation² Moscow College of Transport; 14, Kuchin Lane, Moscow, 129626, Russian Federation

Abstract. Cleaning and washing contaminated surfaces of machine parts is relevant in the repair industry. Improving the efficiency of the process of cleaning metal parts is possible using a combination of submersible, jet and ultrasonic

methods. The variety of designs of washing machines and installations using different cleaning methods requires the determination of optimal technological parameters and process modes, as well as the identification of an effective washing solution. For this purpose, an experiment was carried out on the process of cleaning metal parts from the remnants of cutting fluids (coolants) in submersible washing machines using ultrasonic vibrations. Solutions of dimer, labomid, and soda ash were studied to clean metal parts from coolant residues. To intensify the process of washing metal parts, an ultrasonic unit UZDN-A with a constant oscillation frequency was used. The degree of purification of metal parts was estimated by the ratio of the mass of the pollutant removed from its surface to its initial mass, in percent. The obtained mathematical models of the degree of cleaning of metal parts (for grades of structural carbon steels and non-ferrous metals) from coolant made it possible to determine the optimal technological parameters: concentration of cleaning solutions 15 to 20%; working temperature for dimer – 20 to 30°C, for labomid – 70 to 80°C, for soda ash – 80 to 90°C. It has been established that the most energy-efficient and safe cleaning solution is a dimer, and the use of labomid for ultrasonic cleaning is not advisable due to its increased foaming. It was also found that the time of washing (the presence of metal parts in the machine) and the amount of oil on the surface of metal parts do not significantly affect the degree of cleaning.

Keywords: ultrasonic cleaning, efficiency, intensification, criteria, optimization, contamination, response surface

For citation: Petrik D.Yu., Korneev V.M., Petrik V.Yu. Determining the optimum technological parameters of cleaning parts in submersible washing machines. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(4):81-84. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-81-84>.

Введение. К традиционным способам очистки металлических поверхностей относят метод погружения, очистку струей растворителя, электролитическую очистку, электрогидравлическую очистку, ультразвуковую очистку, пневмо-абразивную (с использованием электрокорунда, гранул CO₂, гидрокарбоната натрия).

Наиболее распространенным способом удаления загрязнений с поверхности является очистка методом погружения в емкости с моющими растворами [1]. При этом в качестве моющих растворов используются смеси поверхностно-активных веществ, различных растворителей, слабые растворы щелочей и кислот, бензин и керосин. Эффективность очистки повышается при перемешивании моющего раствора. Недостатками этого способа является использование большого объема легколетучих веществ, опасных для окружающей среды и здоровья людей.

Анализ зарубежной литературы [2, 3] показывает, что несмотря на пожароопасность нехлорированных углеводородных растворителей (KW), их использование постоянно увеличивается за счет усовершенствования оборудования, в котором интенсификация процессов очистки и обезжиривания происходит с помощью ультразвука, флотации и вакуумной сушки. В этом случае KW могут заменять хлорированные углеводородные растворители при использовании их методов [4].

При ультразвуковом способе очистки в качестве моющих составляющих применяют органические растворители, а также водные растворы моющих веществ. К недостаткам ультразвуковых установок, помимо их высокой энергоемкости и сложности оборудования, следует отнести применение различных видов растворителей, которые токсичными отходами могут отрицательно влиять на здоровье человека и окружающую среду [4].

При использовании струйного метода очистки механический фактор проявляется как удар струи на загрязнения, приводящий к их разрушению и вымыванию. Повышение давления воды с 2,5 до 15 МПа при удалении внешних загрязнений приводит к увеличению производительности процесса очистки до 20 раз, к снижению энергозатрат в 4 раза и расходу воды в 10 раз.

Авторами [4-8] отмечаются существенные недостатки перечисленных методов, среди которых – относительно большие расходы материалов, значительная энергоемкость, комплексное негативное влияние на окружающую среду и здоровье человека.

Уникальные возможности вибрационного поля позволяют успешно осуществлять не только отделочно-зачистную и укрепляющую операции, но и такие операции, как очистка и мойка деталей машин.

В настоящее время существует много различных конструкций моющих машин и установок, использующих разные методы очистки или их комбинации, но все они имеют некоторые недостатки. На основании анализа способов очистки металлических деталей в машине для мытья [9, 10] установлено, что для повышения эффективности данного процесса целесообразно использовать комбинацию погружного, струйного и ультразвукового методов.

Цель исследований: определение оптимальных технологических параметров, режимов процесса очистки и эффективного моющего раствора, обеспечивающих очистку деталей в погружных моечных машинах с применением ультразвуковых колебаний.

Материалы и методы. Для интенсификации процесса мойки металлических деталей использовалась ультразвуковая установка УЗДН-А с постоянной частотой колебаний.

В качестве смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) использовали масло-I20 и водную эмульсию ЭТ-2. Методика выбора моющего раствора включала в себя оценку нескольких параметров: длительность очистки металлических поверхностей от масляных и водных смазочно-охлаждающих жидкостей; способность к переработке и регенерации; коррозионное воздействие на объект очистки; стойкость раствора; цена и стойкость к пенообразованию.

Для очистки металлических деталей от остатков СОЖ применены 3 моющих раствора:

– димер – высококонцентрированное щелочное моющее вещество, используемое для мойки автомобильного транспорта;

– лабомид – комплексное соединение активных веществ на основе солей, применяемое для очистки узлов и деталей (двигатель, редуктор и др.);

– раствор кальцинированной соды.

Экспериментальные исследования моющей среды проводились следующим образом. В раствор погружалась порция металлических деталей, загрязненных маслом-I20 или водными охлаждающими жидкостями на основе эмульсии ЭТ-2, и интенсивно перемешивалась. Партия ежеминутно извлекалась из раствора, высушивалась путем продувания теплым воздухом и взвешивалась на электронных весах. Опыты повторялись несколько раз при постоянной температуре и изменении концентрации моющего раствора.

Степень очищения металлических деталей оценивается отношением (в процентах) массы загрязнителя, удаленного с ее поверхности, к его начальной массе.

С целью исследования влияния температуры и концентрации моющего раствора, а также времени мытья на степень очистки металлических деталей из углеродистой стали в машинах, использующих ультразвуковой метод очистки, был применен метод планирования многофакторного эксперимента.

Уровни варьирования факторов составляли: концентрация моющего раствора – 5%; температура моющего раствора – 10°C; время мытья – 1 мин; содержание масла на металлических деталях – 1%. Границы варьирования составляли: концентрация моющего раствора – 0...40%; температура моющего раствора – 20...100°C; время мытья – 1-10 мин; содержание масла на металлических деталях – 1...10%.

При проведении эксперимента и построении модели степени очистки металлических деталей моющими растворами применялся метод ортогонального центрального композиционного планирования. При обработке полученных результатов использовались методы математической статистики программного комплекса STATISTICA 10.

Результаты и их обсуждение. Планирование научного эксперимента позволяет не получить

математическую модель изучаемого процесса, а лишь эффективно оценить коэффициенты математической модели, выбранной на основании информации о процессе. Выбранная математическая модель отражает связь между параметрами процесса, включенными в рассмотрение, и в общем виде представляется функцией многих переменных:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n). \quad (1)$$

Для построения математической модели приняты следующие обозначения:

Y – степень очистки;

X_1 – концентрация моющего раствора;

X_2 – температура моющего раствора;

X_3 – содержание масла на металлических деталях;

X_4 – время мытья.

Стандартная модель включает в себя линейную и нелинейную комбинации факторов. После оценки результатов экспериментальных и расчетных данных по модели мы установили, что целесообразно использовать нелинейную комбинацию факторов. Предполагается, что данная модель будет использована в дальнейшем моделировании физических процессов в предложенной машине. Упрощение математических зависимостей позволяет создать более надежные методики расчета при проектировании моющих машин.

Получены математические модели степени очистки металлических деталей для моющего раствора на основе димера в зависимости от следующих параметров:

– от температуры раствора X_2 и его концентрации X_1 :

$$Y_1 = 68,0027 + 3,734X_1 - 0,4333X_2 - 0,0748X_1^2 + 0,0015X_1X_2 + 0,046X_2^2; \quad (2)$$

– от содержания масла на металлических деталях X_3 и концентрации раствора X_1 :

$$Y_2 = 105,8459 + 4,3553X_1 - 17,9067X_3 - 0,0793X_1^2 - 0,0754X_1X_3 + 1,4884X_3^2; \quad (3)$$

– от содержания масла на металлических деталях X_3 и температуры моющего раствора X_2 :

$$Y_3 = 184,7866 - 0,3901X_2 - 25,0267X_3 + 0,0056X_2^2 - 0,0305X_2X_3 + 1,8718X_3^2. \quad (4)$$

Аналогично для лабомиды получены следующие уравнения:

$$Y_4 = 90,1073 - 1,101X_1 + 0,5983X_2 + 0,0074X_1^2 + 0,0114X_1X_2 - 0,006X_2^2; \quad (5)$$

$$Y_5 = 280,4974 + 1,1099X_1 - 57,8101X_3 + 0,0176X_1^2 - 0,3034X_1X_3 + 4,7153X_3^2; \quad (6)$$

$$Y_6 = 222,8166 - 0,0356X_2 - 36,2227X_3 - 0,0058X_2^2 + 0,1269X_2X_3 + 1,9937X_3^2. \quad (7)$$

Для моющего раствора на основе кальцинированной соды уравнения имеют вид:

$$Y_7 = 120,535 - 1,0527X_1 - 1,2993X_2 + 0,023X_1^2 + 0,0018X_1X_2 + 0,0113X_2^2; \quad (8)$$

$$Y_8 = 52,1695 - 0,796X_2 + 14,3766X_3 - 0,0331X_2^2 + 0,3428X_2X_3 - 1,7508X_3^2; \quad (9)$$

$$Y_9 = 163,5227 - 2,0081X_2 - 11,1875X_3 + 0,0066X_2^2 + 0,2485X_2X_3 - 0,2724X_3^2. \quad (10)$$

Параметр X_4 (время мытья) в силу своей незначительности в формулах (1)–(9) отсутствует. Это объясняется тем, что вследствие интенсификации процесса мойки ультразвуковыми колебаниями время мойки сокращается до минимума, и последующее время нахождения металлических деталей в машине значительного влияния не оказывает.

Анализ представленных моделей показал, что с увеличением концентрации раствора степень очистки возрастает, а при достижении определенной концентрации дальнейшее ее увеличение существенного

влияния на степень очистки не имеет. Количество масла на поверхности металлических деталей существенно не влияет на степень очистки.

Выводы

1. Полученные математические модели для очистки металлических деталей марок конструкционных углеродистых сталей и цветных металлов от СОЖ позволили определить оптимальные технологические параметры: – концентрацию моющих растворов – 15...20%; – рабочую температуру для димера – 20...30°C, для лабонида – 70...80°C, для кальцинированной соды – 80...90°C.

2. Время мытья (нахождение металлических деталей в машине) и количество масла на поверхности металлических деталей существенно не влияют на степень очистки.

3. Наиболее энергоэффективным и безопасным моющим раствором является димер. При ультразвуковой очистке использование лабонида является нецелесообразным ввиду его повышенного пенообразования.

Список использованных источников / References

1. Verhaagen B., Rivas D.F. Measuring cavitation and its cleaning effect. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016;29:619-628. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.03.009>
2. Vetrinmurugan, Goodson M., Terry L., Samiheta, Nagarajan, Siddharth J. Experimental Investigation of Ultrasonic and Megasonic Frequency on Cleaning of Various Disk Drive Components. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*. 2013;4 (4):174-177. <https://doi.org/10.7763/IJCEA.2013.V4.288>
3. Weller R.N., Brady J.M., Bernier W.E. Efficacy of ultrasonic cleaning. *Journal of Endodontics*. 1980;6(9):740-743. [https://doi.org/10.1016/S0099-2399\(80\)80185-3](https://doi.org/10.1016/S0099-2399(80)80185-3)
4. Hicks Ch.R., Turner K.V. *Fundamental concepts in the design of experiments*. Oxford University Press, 1999. 576 p.
5. Илюхин А.В., Колбасин А.М., Цепкин П.А. Методы ультразвуковой очистки деталей в условиях основного и ремонтного производства // *Науковедение: Интернет-журнал*. 2013. № 3 (16). С. 69. EDN: QZXYOR.
6. Илюхин А.В., Колбасин А.М., Цепкин П.А. Ultrasonic cleaning methods in the main parts and repair of production. *Naukovedenie*. 2013;3(16):69.
7. Майоров А.В., Михеева Д.А. Сравнительный анализ режимов мойки жестяных банок в моечных машинах струйного и погружного типов // *Вестник Марийского государственного университета*. 2014. № 1 (13). С. 48-53. EDN: SGLMVL.
8. Mayarov A.V., Mikheeva D.A. The comparative analysis of tin washing regimes in spray-washing and dunking washing

machines. *Vestnik of the Mari State University*. 2014;1(13):48-53. (In Rus.)

7. Fuchs F.J. Ultrasonic cleaning: Fundamental theory and application. 1995. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19950025362> (Last accessed: 09.06.2022).

8. Mason T.J. Ultrasonic cleaning: an historical perspective. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016;29:519-523. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.05.004>

9. Петрик Д.Ю., Корнеев В.М., Петрик В.Ю. Факторы интенсификации процессов очистки деталей в погружных моечных машинах (на примере ультразвукового метода очистки) // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2023. № 1 (127). 101. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.24>

Petrik D.Y., Korneev V.M., Petrik V.Yu. Factors of intensification of cleaning parts in submerged washing machines (as exemplified by ultrasonic cleaning method). *International Research Journal*. 2023;1(127):101. (In Rus.) <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.24>

10. Петрик Д.Ю., Корнеев В.М., Петрик В.Ю. Интенсификация процесса очистки деталей в погружных моечных машинах // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24, № 5. С. 73-77. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-5-73-77>

Petrik D.Yu., Korneev V.M., Petrik V.Yu. Intensifying the process of cleaning parts in submersible washing machines. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(5):73-77. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-5-73-77>

Вклад авторов

Д.Ю. Петрик – проведение исследования, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
В.М. Корнеев – концептуализация, методология, руководство исследованием;
В.Ю. Петрик – проведение исследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 25.04.2023, после рецензирования и доработки 06.07.2023, принята к публикации 07.07.2023

Contribution of the authors

M.N. Erokhin – conceptualization;
V.V. Kirsanov – methodology, revision and editing of the final manuscript;
Y.G. Ivanov – resource;
S.V. Kirsanov – visualisation, manuscript drafting.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 25.04.2023; revised 06.07.2023; accepted 07.07.2023

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.313.33

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-85-90



Моделирование потерь энергии в асинхронном электродвигателе

Оськин Сергей Владимирович✉, *д-р техн. наук, профессор*¹

kgauem@yandex.ru✉

Мирошников Алексей Владимирович, *аспирант*¹

el-mash@kubsau.ru

Нагучев Заур Хамедович, *аспирант*¹

el-mash@kubsau.ru

Украинцев Максим Михайлович, *канд. техн. наук, доцент*²

rostmax@rambler.ru

¹ Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина; 350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, 13

² Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ; 347740, Российская Федерация, Ростовская область, г. Зерноград, ул. Ленина, 21

Аннотация. Особые условия эксплуатации электродвигателей в агропромышленном комплексе приводят к их высокой аварийности. Внедрение частотных преобразователей приводит к необходимости анализа теплового состояния электрических машин в ненормальных и аварийных режимах работы и разработки адекватной компьютерной модели процесса функционирования электропривода в различных режимах работы. Созданная авторами тепловая компьютерная модель на основе расчетов всех потерь в электрической машине дает возможность проанализировать аэродинамику машины и температурные режимы. В результате реализации модели с помощью программного продукта Comsol установлены скорости и направления воздушных потоков в отдельных составляющих электродвигателя. Отмечено, что скорость воздушного потока резко изменяется: в начале воздушного канала она составляет 14 м/с, в конце – до 3 м/с. Интерфейс мультифизика программного продукта объединяет расчеты аэродинамики и тепловое исследование. Результаты теплового анализа показали, что при номинальном режиме работы максимальная температура корпуса составила 43°C, а температура лобовой части обмотки статора – 112°C. Исследования переходного процесса пуска электродвигателя показали неравномерность нагрева передней и задней частей обмотки статора, разница температур составила 3°C. Полученная тепловая компьютерная модель позволяет установить влияние потерь в машине, состояния окружающей среды, конструктивных элементов электродвигателя на температуру отдельных составляющих объекта исследований, а также оценить изменение эксплуатационных условий работы и регулирование скорости вращения ротора. Обнаружение более нагретой части машины дает возможность правильно установить датчики температуры устройств аварийной защиты.

Ключевые слова: электродвигатель, потери, моделирование, Comsol, тепловая компьютерная модель, температура

Формат цитирования: Оськин С.В., Мирошников А.В., Нагучев З.Х., Украинцев М.М. Моделирование потерь энергии в асинхронном электродвигателе // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 85-90. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-85-90>.

© Оськин С.В., Мирошников А.В., Нагучев З.Х., Украинцев М.М., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Modeling of energy losses in an asynchronous electric motor

Sergey V. Oskin✉, DSc (Eng), Professor¹

kgauem@yandex.ru✉

Aleksei V. Miroshnikov, postgraduate student¹

el-mash@kubsau.ru

Zaur H. Naguchev, postgraduate student¹

el-mash@kubsau.ru

Maksim M. Ukrainiantsev, CSc (Eng), Associate Professor²

rostmax@rambler.ru

¹ Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin; 13, Kalinina str., Krasnodar, 350044, Russian Federation² Azov-Black Sea Engineering Institute of Don SAU; 21, Lenina str., Zernograd, 347740, Rostov region, Russian Federation

Abstract. Special operating conditions of operating electric motors in the agro-industrial sector determine their high accident rate. The rapid introduction of frequency converters leads to the need to analyze the thermal state of electric machines in non-nominal and emergency operating modes and the development of relevant software simulation model of electric drive performance in various operating modes. The thermal computer model developed by the authors and based on the calculation of all losses in an electric machine makes it possible to analyze the aerodynamics of the machine and temperature conditions. As a result of the model implementation, the speeds and directions of air flows in the individual components of the electric motor are established in the Comsol software. It is noted that the air flow velocity changes dramatically from the beginning of the air channel to the end – from 14 m/s to 3 m/s. The multiphysics interface in the software product combines aerodynamic analysis and thermal research. The results of thermal analysis showed that under nominal operating conditions the maximum body temperature was 43 degrees, and the temperature of the stator winding front part was 112 degrees. Studies of the transient process of electric motor start-up showed uneven heating of the front and back parts of the stator winding, the temperature difference was 3 degrees. The obtained computer model will make it possible to establish the influence of losses in the machine, environmental conditions, constructive elements of the electric motor on the temperature of individual components of the research object. Change of operating conditions and regulation of the rotor speed can also be estimated by means of the obtained computer model. Determining a more heated part of the machine makes it possible to properly install the temperature sensors of the emergency protection devices.

Keywords: electric motor, losses, modeling, aero-dynamics, temperature, ventilation, frequency converter

For citation: Oskin S.V., Miroshnikov A.V., Naguchev Z.H., Ukrainiantsev M.M. Modeling of energy losses in an asynchronous electric motor. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(4):85-90. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-85-90>.

Введение. Высокая аварийность приводных электродвигателей в агропромышленном комплексе связана с агрессивностью и большими колебаниями параметров окружающей среды, несоответствием характеристик электродвигателя параметрам рабочей машины, низким качеством электроэнергии и т.д. Ущерб, нанесенный аварийным отключением, часто превышает стоимость отказавшего электропривода. Кроме технологического ущерба, может иметь место и экологическая составляющая убытков от отказов [1], поэтому в сельскохозяйственном производстве к качеству работы электропривода предъявляются дополнительные требования: максимальное использование перегрузочной способности электрической машины и возможность работы в аварийном режиме до окончания технологического процесса.

Исследованиям тепловых процессов, протекающих внутри электродвигателя, посвящены многие работы [2-7]. В связи с невозможностью учета реальных условий эксплуатации электродвигателей часто в расчетах принимаются различные допущения, которые иногда приводят к значительным отличиям от фактического состояния машины.

Появление частотного электропривода с набором различных функций контроля способствовало частичному решению проблемы, однако возникла проблема температурных перегрузок при низких частотах вращения [8, 9]. Появляющиеся модификации преобразователей частоты насыщаются элементами интеллектуального электропривода. Для их дальнейшего развития необходимы точные и адекватные компьютерные модели процесса функционирования электропривода в различных режимах работы. Появление

современных программных продуктов Autodesk Simulation CFD и Comsol позволяет это сделать.

Цель исследований: разработать математическую модель тепловых процессов в асинхронном электродвигателе с возможностью анализа его состояния при изменении внешних условий и режима работы, используя программное обеспечение Comsol.

Материалы и методы. Для теплового расчета электрических машин применяют методы эквивалентных тепловых схем и температурного поля. Определение температурных полей исследуемых объектов возможно с использованием численных методов расчета, из которых самым распространенным является метод конечных элементов, применяемый в ПО Comsol.

При разработке тепловой компьютерной модели сначала при помощи программного обеспечения Comsol создана геометрическая модель объекта исследований. За прототип объекта принят электродвигатель АИР63А2 мощностью 370 Вт с соответствующими конструктивными размерами. После разработки геометрической модели (рис. 1) в интерфейс «Материалы» введены все необходимые характеристики отдельных конструктивных элементов электрической машины (174 элемента).

Для расчёта отдельных физических процессов выбраны соответствующие интерфейсы. Блок «Turbulent Flow» с моделью турбулентности «Algebraic uPlus» принят для исследований течений воздушных потоков. Расчёты производились отдельно: под крышкой вентилятора, внутри электродвигателя и снаружи машины – в связи с различной скоростью воздуха в этих местах. Подачу воздуха по внешней оболочке машины осуществляет встроенный вентилятор. Циркуляцию внутри машины производят лопасти ротора.

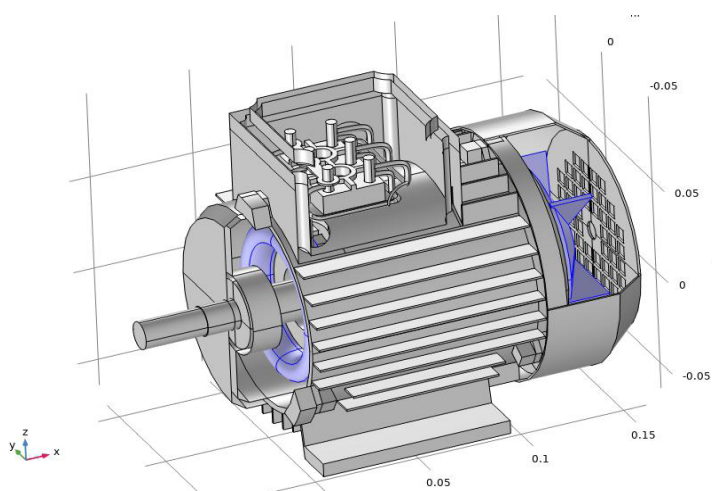


Рис. 1. Вид геометрической модели объекта исследований

Fig. 1. Type of a geometric model of the research object

С целью получения адекватных результатов по движению воздушных потоков между статором и ротором, а также под подшипниковыми щитами применен интерфейс «Rotating Domain», позволяющий производить имитации вращения ротора на различных частотах его работы [10].

Анализ теплового состояния электродвигателя проводился в блоке «Heat Transfer», позволяющем учесть как тепловые потери, так и тепловыделения. В связи с различной теплопроводностью материалов и их конфигурацией весь объект исследований разбивался на отдельные схожие структурные единицы. В качестве источников тепла, выделяющих энергию в результате электрических и электромагнитных потерь, приняты статорная обмотка, стержни и кольца ротора, электротехническая сталь статора и ротора. Учитывались дополнительные потери в подшипниках ротора и вентиляционные потери, а также теплопроводность проводников в пазах и лобовых частях обмотки статора. Программное обеспечение учитывало анизотропность материалов. Поскольку толщина пазовой изоляции очень мала, то для облегчения расчетов использовался интерфейс «Thin Layer» (тонкие пленки). Моделирование теплового состояния с учетом всех потерь проводилось с использованием мультифизического блока, позволяющего объединить расчеты по аэродинамике и движению тепла.

Конвективная теплоотдача описывается системой дифференциальных уравнений и условиями однозначности, учитывающих конвективную теплоотдачу, теплопроводность текучей среды, движение среды Навье-Стокса, неразрывность потока.

Уравнение теплопроводности электрической машины имеет классический вид:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \cdot c_p \cdot u \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial z} \right) = \sum Q_{source}, \quad (1)$$

где c_p – теплоёмкость среды; u – скорость потока; $q = -\lambda \nabla T$ – плотность теплового потока; $\sum Q_{source}$ – общая интенсивность тепловыделений, Вт/м³.

В условия однозначности вошли геометрические и физические параметры, начальные условия. Геометрические параметры определены геометрической моделью объекта (174 домена). Построение сетки на объекте производилось с количеством степеней свободы 758603. Теплофизические постоянные при определяющей температуре,

используемые в качестве физических параметров, рассчитывались по известным методикам, применимым к электрическим машинам. Для поиска единственного решения задавались начальные условия: $t = 0$; $T(x, y, z, t) = T_0$; температура окружающего воздуха $T_0 = 20^\circ\text{C}$; дополнительных тепловых потоков на границах объекта нет; теплообмен электродвигателя с окружающим воздухом происходит с определенным коэффициентом теплообмена и с учетом тепловой конвекции.

Окончательные расчеты моделирования по тепловым полям с направлениями и интенсивностями движений воздушных масс выводились в интерфейс Result как в графическом, так и в табличном виде. Моделирование производилось в стационарном состоянии электрической машины и переходных процессах (пуск и смена скорости вращения).

Результаты и их обсуждение. Расчёты движений воздушных масс позволили получить изображения полей скоростей в отдельных составляющих машины (рис. 2). Максимальная скорость воздушного потока наблюдается из-под крышки вентилятора (до 14 м/с), в конце вентиляционного канала (вдоль ребра статора) скорость составляет порядка 3 м/с, поэтому теплоотдача снижается.

Изображения аэродинамики можно получить при различной частоте вращения ротора электродвигателя.

Тепловое поле машины в номинальном режиме представлено на рисунке 3.

При нормальной температуре окружающей среды в 25°C передняя часть корпуса электродвигателя нагревается до 43°C (рис. 3). Это связано с тем, что основное охлаждение машина получает за счёт работы внутреннего вентилятора, который установлен в задней части машины.

Анализ тепловых полей внутри электрической машины выявил наиболее нагретую часть электродвигателя – статорную обмотку (рис. 4). При этом лобовая часть со стороны рабочего конца вала нагрета максимально – до 112°C .

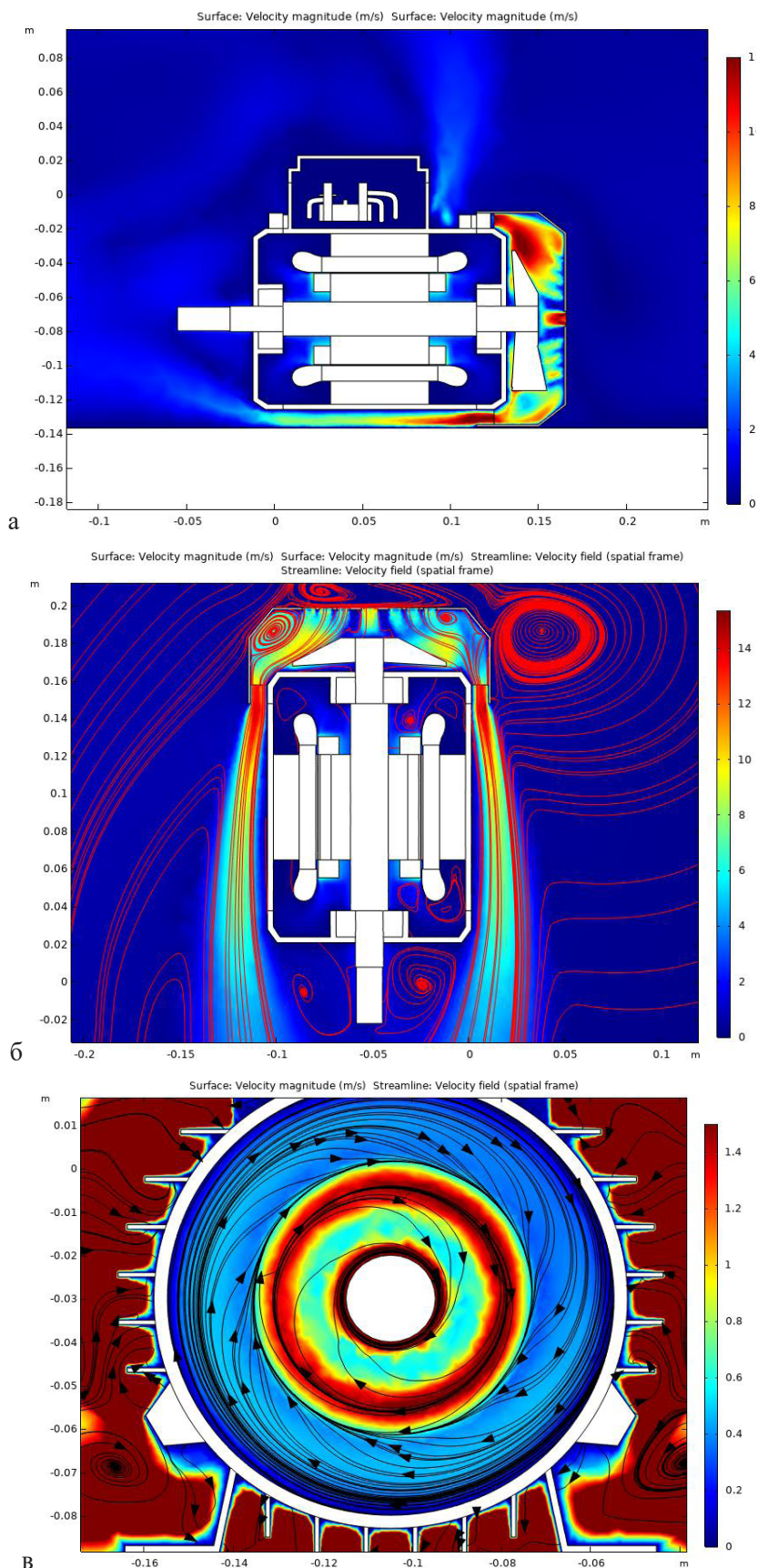


Рис. 2. Изображения полей скоростей:

а – под крышкой вентилятора; б – наружного воздуха;
в – внутри электрической машины

Fig. 2. Images of velocity fields:

a- under the fan cover; b – outside air; c – inside the electric machine

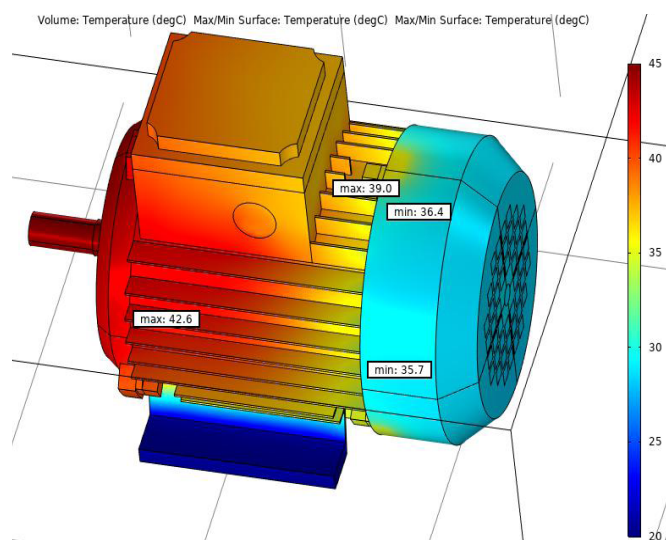


Рис. 3. Температурное поле модели электрической машины в номинальном режиме
Fig. 3. Temperature field of the electric machine model in the nominal mode

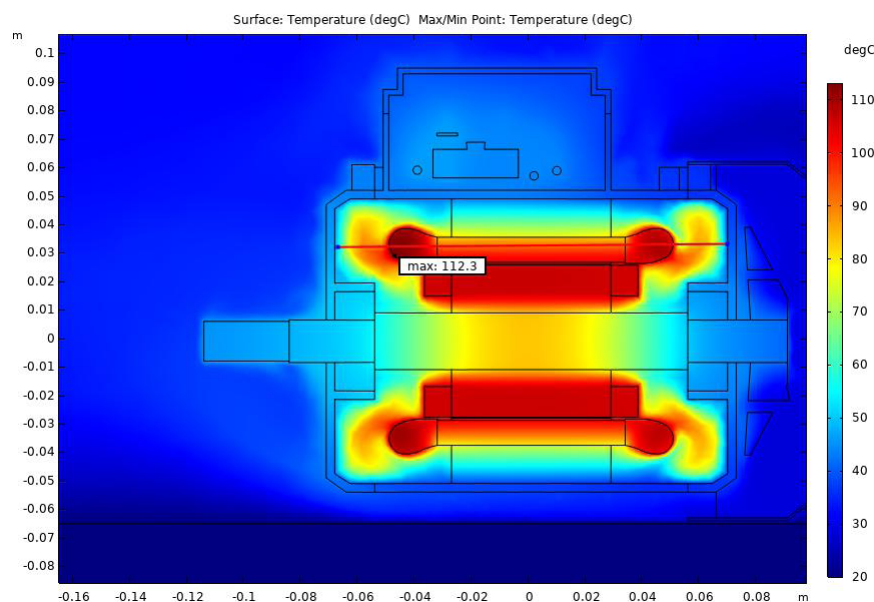


Рис. 4. Состояние внутреннего температурного поля в разрезе электродвигателя
Fig. 4. State of the internal temperature field in the electric motor cross-section

Разница температур передней и задней частей обмоток статора составляет 3...5°C. Достигнутая температура обмотки статора в номинальном режиме соответствует классу изоляции данной машины – 115°C.

Список использованных источников

- Оськин С.В., Тарасенко Б.Ф. Надежность технических систем и экологический, экономический ущерб в сельском хозяйстве // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 101. С. 985-1004. EDN: SZVWXZ.
- Жадан В.А., Санников Д.И. Методика расчета температуры ребристых обдуваемых корпусов электрических машин

При частоте вращения ротора 1000 об/мин температура лобовой части достигла 160°C, что приведёт к старению изоляции.

Созданная тепловая компьютерная модель проверялась на адекватность путём сопоставления результатов моделирования с экспериментальными данными. Анализ температур отдельных составляющих электрической машины, проведенный с использованием термопар, показал, что в установившемся режиме экспериментальная температура отличается от модельной: разница температур лобовых частей со стороны рабочей части вала составила 1...2°C, а со стороны вентилятора – 11°C; температура внешней стороны корпуса машины отличается в среднем на 4°C, пазов статора – на 2...3°C.

Тепловая компьютерная модель позволяет провести анализ теплового состояния электродвигателя в аварийных режимах (поломка крыльчатки вентилятора, повышенное загрязнение оболочки статора, заторможенный ротор). При необходимости применения температурной защиты электродвигателя можно определить наиболее нагретые части для установки датчиков температуры с соответствующей классификационной температурой.

Выводы

1. Тепловая компьютерная модель физических процессов электродвигателя в программном обеспечении Comsol, основанная на расчётах электрических, электромагнитных, механических и вентиляционных потерь, адекватна реальному состоянию объекта исследований и позволяет проводить анализы температурных полей, отдельных составляющих машины в высокдетализированном виде.

2. Тепловая компьютерная модель позволяет получать результаты в стационарном (установившемся режиме работы) и в переходных режимах (пуск, смена скорости вращения ротора.), а также при питании от преобразователя частоты тока.

References

1. Oskin S.V., Tarasenko B.F. Reliability of technical systems and environmental and economic losses in agriculture. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2014;101:985-1004. (In Rus.)
2. Zhadan V.A., Sannikov D.I. Calculation technique of the temperature of finned ventilated cases of electric machines. *Izvestia of Tomsk Polytechnic Institute*. 1968;190:106-111. (In Rus.)

// Известия Томского политехнического института. 1968. Т. 190. С. 106-111. URL: [bulletin_tpu-1968-v190-17_bw.pdf](#).

3. Жадан В.А., Санников Д.И. Несимметрия нагрева корпуса электрических машин с внешним обдувом // Известия Томского политехнического института. 1967. Т. 172. С. 104-111. URL: [bulletin_tpu-1967-v172-19_bw.pdf](#).

4. Осташевский Н.А., Петренко А.Н. Исследование теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя при изменении нагрузки // Електротехніка і електромеханіка. 2010. № 3. С. 25-29. EDN: RWNQV.

5. Петренко А.Н. Экспериментальное исследование нагрева частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных источниках питания // Електротехніка і електромеханіка. 2010. № 5. С. 21-23. EDN: RWNQDD.

6. Петушков М.Ю. Тепловая модель асинхронного двигателя // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2011. № 4 (162). С. 48-50. EDN: OCQJEJ.

7. Klimenta D.O., Hannukainen A. Novel approach to analytical modelling of steady-state heat transfer from the exterior of tefc induction motors. *Thermal science*. 2017;21(3):1529-1542. <https://doi.org/10.2298/TSCI150629091K>

8. Осташевский Н.А., Шайда В.П., Петренко А.Н. Исследование теплового состояния асинхронного частотно-управляемого двигателя с помощью метода конечных элементов // Електротехніка і електромеханіка. 2011. № 5. С. 39-42. EDN: RWCNBJ.

9. Oskin S.V., Miroshnikov A.V. Defining acceptable motor reduction in variable-speed drives of agricultural machinery. *International conference on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM)*. 2020;1-5. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9111949>

10. Oskin S.V., Miroshnikov A.V., Tsokur D.S. Investigation of the aerodynamic characteristics of electric motors when regulating their speed in the Comsol package. *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2021:585-590. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537420>

Критерии авторства

С.В. Оськин – концептуализация, методология, руководство исследованием

А.В. Мирошников, З.Х. Нагучев, М.М. Украинцев – формальный анализ, проведение исследования, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 29.03.2023; поступила после рецензирования и доработки 05.04.2023; принята к публикации 06.04.2023

3. Zhadan V.A., Sannikov D.I. Unbalanced heating of an electric machine body with external blowing. *Izvestia of Tomsk Polytechnic Institute*. 1968;190:106-111. (In Rus.)

4. Ostashevsky N.A., Petrenko A.N. Thermal state of a frequency-controlled induction motor under load variation. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*. 2010;3:25-29. (In Rus.)

5. Petrenko A.N. Experimental study of a frequency-controlled induction motor heating under different power sources. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*. 2010;5:21-23. (In Rus.)

6. Petushkov M.Y. Thermal model of asynchronous motor. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*. 2011;4 (162):48-50. (In Rus.)

7. Klimenta D.O., Hannukainen A. Novel approach to analytical modelling of steady-state heat transfer from the exterior of tefc induction motors. *Thermal science*. 2017;21(3):1529-1542. <https://doi.org/10.2298/TSCI150629091K>

8. Ostashevskiy N.A., Shayda V.P., Petrenko A.N. Research into thermal state of a frequency-controlled asynchronous motor by means of a finite element method. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*. 2010;3:25-29. (In Rus.)

9. Oskin S.V., Miroshnikov, A.V. Defining acceptable motor reduction in variable-speed drives of agricultural machinery. *2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2020. pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9111949>

10. Oskin S.V., Miroshnikov A.V., Tsokur D.S. Investigation of the aerodynamic characteristics of electric motors when regulating their speed in the comsol package. *2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2021. pp. 585-590. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537420>

Contribution of the authors

S.V. Oskin – conceptualisation, methodology, research supervision
A.V. Miroshnikov, Zh.Kh. Naguchev, M.M. Ukraintsev – formal analysis, conducting the study, revising and editing of the final manuscript

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 29.03.2023; revised 05.04.2023; accepted 06.04.2023

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 378.146; 378.14.015.62

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-91-96



Фонды оценочных средств как инструмент диагностики качества профессионального образования

Чистова Яна Сергеевна✉, канд. пед. наук, доцент

energo-chistova@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-3713-8965>

Козленкова Елена Николаевна, канд. пед. наук, доцент

kozlenkova28@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8230-5200>

Назарова Людмила Ивановна, канд. пед. наук, доцент

nazarova@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-5698-6284>

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

Аннотация. В системе профессионального образования, остаётся актуальной проблема надёжной и достоверной оценки степени сформированности компетенций выпускников, а также разработки инструментов, позволяющих сделать это максимально объективно. Одним из показателей при проведении аккредитации образовательной организации является доля обучающихся, выполнивших определённые условия проведения с ними диагностической работы, которая формируется из фондов оценочных средств. Целью исследований стало выявление и обоснование диагностических возможностей фондов оценочных средств для повышения качества профессионального образования. В ходе исследований проводился анализ практики разработки и применения фондов оценочных средств для направления подготовки 35.03.06 – Агроинженерия в ряде аграрных вузов России: Волгоградском государственном аграрном университете, Кузбасской государственной сельскохозяйственной академии, Белгородском государственном аграрном университете имени В.Я. Горина, Иркутском государственном аграрном университете имени А.А. Ежевского и в Ульяновском государственном аграрном университете имени П.А. Столыпина. В исследовании приняли участие 365 студентов. Комплекты оценочных средств включали в себя по 40 вопросов из дескрипторов, отражающих сформированность нескольких общепрофессиональных компетенций. Наибольшие трудности возникли у обучающихся при прохождении тестов, включающих в себя вопросы, отражающие содержание нескольких компетенций. Для обеспечения соответствия подготовки выпускников требованиям государственной аккредитации образовательной деятельности обоснованы направления модернизации содержания и методики обучения студентов с учётом тенденций развития компетентностного подхода в теории и практике профессионального образования.

Ключевые слова: оценочные средства, фонд оценочных средств, педагогическая диагностика, качество образования, аккредитация образовательной деятельности, компетентностный подход, индикатор достижения компетенции, дескриптор компетенции

Формат цитирования: Чистова Я.С., Козленкова Е.Н., Назарова Л.И. Фонды оценочных средств как инструмент диагностики качества профессионального образования // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 91-96. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-91-96>.

© Чистова Я.С., Козленкова Е.Н., Назарова Л.И., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Assessment kit as a diagnosing tool of professional education quality

Yana S. Chistova[✉], CSc (Ed), Associate Professor

energo-chistova@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-3713-8965>

Elena N. Kozlenkova, CSc (Ed), Associate Professor

kozlenkova28@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8230-5200>

Liudmila I. Nazarova, CSc (Ed), Associate Professor

nazarova@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-5698-6284>

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49

Abstract. In the system of professional education, the highly relevant problem is to ensure reliable and valid assessment of graduates' competences, as well as to develop appropriate tools to do this as explicitly as possible. One of the indicators used in the accreditation of an educational organization is the proportion of students showing certain results when working with diagnostic tools from the assessment kit. The purpose of the study is to identify and justify the diagnostic capabilities of the assessment kit tools to improve the quality of professional education. In the course of the study, the authors analyzed the practice of developing and using assessment tools for training area 35.03.06 "Agroengineering" in a number of agricultural universities in Russia: Volgograd State Agrarian University, Kuzbass State Agricultural Academy, Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky and Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin. A total of 365 students took part in the study. Sets of assessment tools included 40 questions each from descriptors, reflecting the development of several general professional competences. The greatest difficulties arose for students when passing tests, which included questions reflecting the content of several competences. To ensure that the training of graduates meets the requirements of state accreditation of educational activities, the authors emphasized the ways to modernize the content and methods of teaching students, taking into account the development trends of the competence-based approach in the theory and practice of professional education.

Keywords: assessment tools, assessment tool kit, pedagogical diagnostics, quality of education, accreditation of educational activities, competence-based approach, indicator of competence achievement, competence descriptor

For citation: Chistova Ya.S., Kozlenkova E.N., Nazarova L.I. Assessment kit as a diagnosing tool of professional education quality. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(4):91-96. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-91-96>.

Введение. В развивающемся информационном обществе динамично изменяющийся рынок труда предъявляет повышенные требования к системе образования в целом, и к университетам – в частности [1]. В системе профессионального образования особую роль играет высшее аграрное образование, ключевой задачей которого является подготовка кадров для аграрной сферы, что в целом способствует обеспечению продовольственной безопасности страны [2, 3].

Одним из основных методологических подходов в системе профессионального образования продолжает оставаться компетентностный подход, ориентированный на достижение высокого уровня формирования у будущих профессионалов компетенций, необходимых для качественного выполнения профессиональной деятельности. Однако остается открытым вопрос об оценке степени сформированности компетенций, а следовательно, о разработке инструментов, позволяющих сделать это максимально объективно.

С 1 марта 2022 г. вступил в силу приказ Министерства науки и высшего образования РФ от 25 ноября 2021 г. № 1094 «Об утверждении

аккредитационных показателей по образовательным программам высшего образования». Данный документ предполагает использование набора показателей для проведения аккредитационных процедур: государственной аккредитации образовательной деятельности; аккредитационного мониторинга; федерального государственного контроля (надзора) в сфере образования.

Один из показателей отражает долю обучающихся, выполнивших определённые условия проведения с ними диагностической работы, которая формируется из фондов оценочных средств организации, осуществляющей образовательную деятельность.

В соответствии с Федеральным законом «Об образовании в Российской Федерации» оценочные материалы включены как обязательный компонент в структуру основной профессиональной образовательной программы. В связи с этим актуальной задачей для теории и практики профессионального образования является поиск эффективных инструментов диагностики качества подготовки кадров в условиях цифровой трансформации образования [4-6].

Цель исследований: обоснование диагностических возможностей фондов оценочных средств для повышения качества профессионального образования.

Материалы и методы. Анализ нормативной и научно-педагогической литературы по проблемам оценки качества образования, анализ практики разработки фондов оценочных средств для направления подготовки 35.03.06 – Агроинженерия в аграрных вузах. В основу методологии исследования положены системный и компетентностный подходы.

Исследования проводились в ряде аграрных вузов России: Волгоградском государственном аграрном университете, Кузбасской государственной сельскохозяйственной академии, Белгородском государственном аграрном университете имени В.Я. Горина, Иркутском государственном аграрном университете имени А.А. Ежевского и в Ульяновском государственном аграрном университете имени П.А. Столыпина. В исследованиях приняли участие 365 студентов.

Результаты и их обсуждение. В структуре педагогического процесса диагностический компонент занимает особое место, позволяя педагогу получать обратную связь с информацией о том, насколько успешно обучающийся осваивает учебный материал.

Педагогическая диагностика не ограничивается проверкой знаний и умений обучающихся. Педагогическая диагностика рассматривает результаты в совокупности с методами, способами и средствами их достижения, выявляет динамику и тенденции формирования продуктов обучения [7]. Сочетание текущего, промежуточного и итогового контроля, оценки, анализа данных, прогнозирования обеспечивает комплексный характер педагогической диагностики.

Обобщая подходы ряда учёных, исследовавших вопросы оценки учебных достижений [8-10], можно выделить следующие основные принципы педагогической диагностики:

- объективность – беспристрастность, непредвзятость диагностических процедур, научная обоснованность методик, тестовых заданий, задач, вопросов, их соответствие установленным критериям;
- надёжность – воспроизводимость результатов диагностики, их точность;
- системность – обеспечение единства и целостности диагностического инструментария, охватывающего всё содержание образования на конкретном этапе подготовки;
- практико-ориентированность – чёткая направленность педагогической диагностики на реальную профессиональную деятельность;
- интегративность – обеспечение возможности оценки сформированности компетенций как

интегративных способностей эффективно действовать при решении профессиональных задач.

Оценочные материалы, или фонды оценочных средств (ФОС), образовательной организации – это комплект оценочных средств, представляющий собой комплекс заданий различного типа, в том числе ключи к ним и критерии оценки.

К оценочным материалам, разработанным образовательной организацией, предъявляются следующие требования:

- соответствие целям и задачам образовательной программы, содержанию изучаемых дисциплин (модулей), научно-исследовательской работы, практик;
- наличие полного и достаточного состава оценочных материалов в целях возможного отбора заданий для комплектования диагностической работы;
- соответствие оценочных средств предмету оценки, направленной на определение уровня достижения планируемых результатов обучения и (или) освоения образовательной программы (её части);
- использование актуальных редакций понятий, терминов, определений, соответствующих действующему законодательству в определённой сфере общественных отношений, отраслевым регламентам, ГОСТ и т.д.

В нашем исследовании диагностическая работа проводилась по общепрофессиональным компетенциям (ОПК).

Для направления подготовки 35.03.06 – Агроинженерия разрабатывались два комплекта фондов оценочных средств для двух направленностей: «Эксплуатация и ремонт машин и оборудования» и «Электрооборудование и электротехнологии». ФОС были разработаны по общепрофессиональным компетенциям.

Этапы формирования ФОС по ОПК:

I. Формирование перечня контролируемых индикаторов достижения (результатов освоения) ОПК – 3 индикатора (результата освоения) по каждой ОПК;

II. Содержательное раскрытие каждого индикатора достижения (результата освоения) – 7 содержательных элементов (дескрипторов);

III. Разработка вариантов заданий, включаемых в ФОС – 20 заданий для каждого содержательного элемента;

IV. Оформление ФОС.

Эксперты разрабатывают не менее 20 однородных вариантов заданий по 21 содержательному элементу, раскрывающему 3 индикатора достижения (результата освоения) ОПК. Задания одного содержания, сложности и типа.

ФОС по каждой компетенции включает в себя не менее 420 заданий разного типа. Распределение по числу того или иного типа заданий не регламентируется, однако желательно, чтобы большая часть заданий

отражала надпрофессиональные знания, умения и навыки, обеспечивающие формирование профессиональных компетенций и направленности личности.

Индикатор достижения компетенции раскрывается через дескрипторы (один из вариантов: каждый дескриптор содержательно совпадает с одной дисциплиной, которая направлена на формирование результата по данному индикатору). Дескриптор должен быть кратко сформулирован и диагностичен (что конкретно проверяется у обучающегося).

Дескрипторы – признаки проявления, применяемые для измерения индикаторов достижения компетенций, определяемые как качественные критерии оценивания, описывающие уровень проявления индикаторов достижения компетенции (низкий, средний, высокий), что даёт основания для определения степени её сформированности у обучающегося.

Базовым вариантом ФОС является тестирование с разными типами вопросов: выбор одного правильного ответа из предложенных вариантов, выбор нескольких правильных вариантов из предложенных вариантов ответов, сопоставление, установление последовательности и др. В методических рекомендациях по применению аккредитационных показателей по образовательным программам высшего образования, утверждённых приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 25 ноября 2021 г. № 1094, отмечается, что «Оценочные материалы образовательной организации в зависимости от профиля (направленности) образовательной программы могут содержать задания в виде расчётных задач, мини-кейса, ситуационных задач, практико-ориентированных заданий». Такого рода задания позволяют оценивать усвоение учебного материала не только на уровне знания и понимания, но и на уровне применения. В отдельных случаях возможен выход и на творческий уровень, когда студент предлагает оригинальное решение, например, прикладного, практико-ориентированного кейса. Однако для такого случая требуется экспертная оценка решения, а не тестовое задание.

Включение в оценочные материалы задач подобного типа требует чёткой формулировки критериев оценки результата их решения, и прежде всего – с позиций проявления способности диагностируемого к творчеству. Это предполагает оценку новизны предложенного решения или способа решения задачи, оригинальность, а также его практико-реализуемость и приближенность к задачам, решаемым в реальной профессиональной деятельности. Одной из проблем использования такого рода задач в диагностической работе является необходимость привлечения профильных экспертов и сложность в технической организации проверки ответов студентов [11, 12]. Одним

из путей решения данной проблемы является использование экспертных систем с применением искусственного интеллекта. Также, возможно, повысит эффективность оценки компетенций студентов расширение диагностических процедур за счёт анализа творческих заданий и результатов курсового проектирования студентов. Поэтому на сегодняшний день оптимальной является диагностическая процедура, предполагающая только тестирование остаточных знаний.

К фундам оценочных средств, разрабатываемым для аккредитационных процедур, предъявляются следующие требования.

1. Время выполнения одного задания – 3–4 мин из расчёта того, что время выполнения варианта составляет 60 или 90 мин.

2. Число вариантов ответов для задания типа «выбор одного правильного из предложенных» – 4.

3. Число правильных вариантов ответов для задания типа «Выбор нескольких правильных из предложенных» – не менее 2, вариантов ответов – 4.

4. Число вариантов ответов для задания типа «Установление правильной последовательности в предложенных вариантах ответов» – не менее 3 (рекомендуется 4).

5. Число вариантов ответов в условии задания (в первом множестве) для типа «Установление соответствия между двумя множествами вариантов ответов» – не менее 2, а во втором множестве – не менее 3.

6. В тексте заданий и в вариантах ответов могут быть графические объекты (фотоснимки, графики, картинки и т.д.).

В апробации ФОС участвовали студенты, обучающиеся по направлению подготовки 35.03.06 – Агроинженерия. Сформированы комплекты оценочных средств, состоящие из 40 вопросов из дескрипторов, отражающих сформированность нескольких общепрофессиональных компетенций. Все задания были представлены в виде тестов, на тестирование отводилось 60 мин.

Диагностика осуществлялась в соответствии с правилами проведения аккредитационных мероприятий, а именно:

- численность участвующих в диагностической работе, должна составлять не менее 70% обучающихся, осваивающих соответствующую образовательную программу, от списочного состава академических групп;

- диагностическая работа может формироваться методом случайной выборки из разработанных заданий и проводиться с применением электронного тестирования, при этом генерируются логины и пароли для доступа в информационную систему (электронного тестирования).

По направленности «Электрооборудование и электротехнологии» в тестировании приняли участие

обучающиеся Волгоградского государственного аграрного университета и Кузбасской государственной сельскохозяйственной академии. Диагностика проводилась в очном и дистанционном форматах, всего приняли участие 156 студентов 3 курса. В тестирование были включены вопросы из разработанного банка фондов оценочных средств, выбранные случайным образом. Все вопросы были закрытого типа, с выбором одного правильного ответа. Методика проведения в двух группах различалась: первая группа выполняла задания по одной компетенции; вторая группа выполняла комплексный тест, включающий в себя вопросы, отражающие суть трех общепрофессиональных компетенций.

По направленности «Эксплуатация и ремонт машин и оборудования» апробация проводилась в Белгородском государственном аграрном университете имени В.Я. Горина, Иркутском государственном аграрном университете имени А.А. Ежевского и в Ульяновском государственном аграрном университете имени П.А. Столыпина. Тестирование проводилось по каждой компетенции отдельно, в нем приняли участие 209 обучающихся. Результаты исследований показали, что наибольшие трудности у обучающихся возникли при прохождении тестов, включающих в себя вопросы, отражающие содержание нескольких компетенций. По этим тестам выполнен наименьший процент правильных заданий (52%), и он является недостаточным для получения положительного решения при проведении аккредитационных мероприятий. Можно предположить, что задания и задачи, отражающие несколько компетенций, имеют более высокий уровень сложности, чем задания и задачи, отражающие одну компетенцию. Это необходимо учитывать при компоновке теста, что может отражаться как в большем весовом значении ответа на вопрос, так и в изменении времени тестирования или числа вопросов в тесте.

Отсутствие творческих заданий, с одной стороны, позволяет технологизировать процесс диагностики, а с другой – не даёт полной картины сформированности компетенций у студентов, поскольку реальная профессиональная деятельность включает в себя и решение нестандартных, нешаблонных задач.

Уровень учебных достижений обучающихся заметно снижается с повышением сложности решаемых задач. Соответственно возникает вопрос

об определении оптимальной компоновки теста для выявления уровня сформированности компетенций и, возможно, коррекции процедуры тестирования, поскольку тестирование без использования задач, несущих в себе элемент творческой, самостоятельной и исследовательской деятельности, снижает объективность оценки сформированности компетенций.

Выводы

Результаты исследования по итогам оценки учебных достижений студентов свидетельствуют о необходимости существенной модернизации содержания и методики обучения студентов с учётом тенденций развития компетентностного подхода в теории и практике профессионального образования, а именно:

- усиление междисциплинарных связей в содержании образования с целью повышения качества формирования компетенций у выпускников [13];
- интенсификация процессов интеграции образования, науки и производства (в идеале – создание образовательно-производственных кластеров, объединяющих научные и образовательные организации и промышленные предприятия);
- более широкое применение иммерсивных образовательных технологий, нацеленных на погружение студентов в контекст профессиональной деятельности (при этом необходимо также повышать уровень агентности этих технологий как симбиоза инициативности, активности, самостоятельности, креативности обучающихся);
- увеличение доли практико-ориентированных, прикладных задач и заданий, максимально приближенных к реальной профессиональной деятельности и моделирующих разнообразные, в том числе нештатные, производственные ситуации, требующие высокого уровня профессионализма от работников сферы АПК;
- совершенствование механизмов оценки качества подготовки, встраивание их в электронную информационно-образовательную среду университета;
- формирование у студентов «гибких навыков» (soft skills) как основы общепрофессиональных и профессиональных компетенций;
- повышение квалификации преподавателей по актуальным проблемам реализации компетентностного подхода в условиях цифровой трансформации образования и др.

Список использованных источников

1. Сошенко И.И. Университеты в условиях изменений: запрос на социальные инновации // Высшее образование в России. 2020. № 10. С. 161-167. doi: 10.31992/0869-3617-2020-29-10-161-167.
2. Рябчикова Н.Н. Высшее аграрное образование и наука в системе кластерно-сетевого управления экономикой России // Продовольственная политика и безопасность. 2022. Т. 9, № 1. С. 121-140. doi: 10.18334/ppib.9.1.113882.

References

1. Soshenko I.I. Universities under change: a request for social innovation. *Vyssheye obrazovanie v Rossii= Higher Education in Russia*. 2020;10:161-167. (In Rus.) <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2020-29-10-161-167>
2. Ryabchikova N.N. Higher agricultural education and science in the system of cluster-network management of the Russian economy. *Food Policy*

3. Чистова Я.С., Занфирова Л.В., Коваленок Т.П. Интенсификация процесса подготовки инженеров для агропромышленного комплекса // Технологические новации как фактор устойчивого и эффективного развития современного агропромышленного комплекса: Материалы Национальной научно-практической конференции. Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, 2020. Ч. 2. С. 492-498. EDN: RUFHQG.

4. Лобачёв А.А., Мамаева И.А. Особенности развития электронной информационно-образовательной среды в современных условиях // Образовательная деятельность вуза в современных условиях: Материалы Международной научно-методической конференции. Караваево: Костромская ГСХА, 2017. С. 34. EDN: YOVERT.

5. Симан А.С., Жилиева В.В. Электронная информационно-образовательная среда в условиях государственной аккредитации вуза // Международный научный журнал. 2020. № 3. С. 121-127. <https://doi.org/10.34286/1995-4638-2020-72-3-121-127>

6. Роберт И.В. Развитие информатизации образования в условиях цифровой трансформации // Педагогика. 2022. Т. 86, № 1. С. 40-50. EDN: FWHKKG.

7. Бекоева М.И. Принципы и этапы реализации педагогической диагностики // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 1055. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=18946> (дата обращения: 03.05.2023). EDN: VIESJJ.

8. Белошицкий А.В., Ларина Т.В. Психолого-педагогические особенности мониторинга, диагностики и контроля в образовательном процессе вуза // Высшее образование сегодня. 2011. № 5. С. 73-75. EDN: OCOURR.

9. Симан А.С., Шингарева М.В. Комплексная диагностика достижений студентов по учебной дисциплине вуза в условиях компетентного подхода // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина». 2014. № 4. С. 106-109. EDN: TJGGZJ.

10. Alipichev A., Nazarova L., Shingareva M., Siman A. Improving the credibility of pedagogical diagnostics in E-Learning. CEUR Workshop Proceedings. 2020;2861:203-209. EDN: LGLVAA.

11. Абаскалова Н.П. и др. Образование как целевой ресурс в развитии личности: теория, методология, опыт: Монография. Стерлитамак: Фобос, 2014. 359 с. EDN: XTFRYL.

12. Меликов А.В. Построение иерархий в системе оперативного анализа данных // Вестник Воронежского государственного университета. Серия «Системный анализ и информационные технологии». 2012. № 1. С. 130-134. EDN: PBSGLD.

13. Nikitin P., Gorokhova R., Bazhenov R., Bystrenina I. Applied orientation and interdisciplinary integration as a factor in increasing student learning motivation. Universal Journal of Educational Research. 2020;8(10):4931-4938. <https://doi.org/10.13189/ujer.2020.081065>

and Security. 2022;9(1):121-140. (In Rus.) <https://doi.org/10.18334/ppib.9.1.113882>

3. Chistova Ya.S., Zanfirova L.V., Kovalenok T.P. Intensification of training engineers for the agro-industrial sector. *Tekhnologicheskie novatsii kak faktor ustoychivogo i effektivnogo razvitiya sovremennogo agropromyshlennogo kompleksa: materialy Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Ryazan'. 2020;2:492-498. (In Rus.)

4. Lobachev A.A., Mamaeva I.A. Peculiarities of creating electronic informational and educational environment in modern conditions. *Obrazovatel'naya deyatel'nost' vuzov v sovremennykh usloviyakh: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii*. Karavaevo. 2017:34. (In Rus.)

5. Siman A.S., Zhilyaeva V.V. Electronic information-educational environment under conditions of state university accreditation. *International Scientific Journal*. 2020;3:121-127. (In Rus.)

6. Robert I.V. Development of informatization of education in the context of digital transformation. *Pedagogika = Russian Education and Society*. 2022;86(1):40-50. (In Rus.)

7. Bekoyeva M.I. Principles and stages diagnostics teaching. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015;1-1:1055. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=18946> (In Rus.)

8. Beloshitskiy A.V., Larina T.V. Psychological and pedagogical features of monitoring, diagnostics and control in the educational process of the university. *Vyshee obrazovanie segodnya*. 2011;5:73-75. (In Rus.)

9. Siman A.S., Shingareva M.V. Complex diagnostics of achievements of students on a subject matter of higher education institution in the conditions of competence-based approach. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2014;4:106-109. (In Rus.)

10. Alipichev A., Nazarova L., Shingareva M., Siman A. Improving the credibility of pedagogical diagnostics in E-Learning. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020;2861:203-209.

11. Abaskalova N.P. et. Al. Education as a target resource in personality development: theory, methodology, experience: monograph. Sterlitamak, 2014. 359 p. (In Rus.)

12. Melikov A.V. The hierarchic construction in the system of operational data analysis. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*. 2012;1:130-134. (In Rus.)

13. Nikitin P., Gorokhova R., Bazhenov R., Bystrenina I. Applied orientation and interdisciplinary integration as a factor in increasing students learning motivation. *Universal Journal of Educational Research*. 2020;8(10):4931-4938. <https://doi.org/10.13189/ujer.2020.081065>

Критерии авторства

Я.С. Чистова – проведение исследования, создание черновика рукописи, визуализация результатов;
Е.Н. Козленкова – разработка методологии исследования, анализ и интерпретация результатов;
Л.И. Назарова – теоретическое обоснование проблемы исследования и его перспективных направлений, создание окончательной версии рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила в редакцию 12.05.2023; поступила после рецензирования и доработки 23.05.2023; принята к публикации 23.05.2023

Contribution

Ya.S. Chistova – conducting the research, drafting the manuscript, visualizing the results;
E.N. Kozlenkova – developing the research methodology, analyzing and interpreting the results;
L.I. Nazarova – providing theoretical grounds for the research problem and describing further research goals, revising and editing the final version of the manuscript.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 12.05.2023; revised 23.05.2023; accepted 23.05.2023