



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

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Научный журнал

Том 25. № 3 / 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. Лаверова
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 29.06.2023 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 29.06.2023

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

А.Н. Цепляев

Жизнь во имя жизни 4

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

И.М. Довлатов, В.В. Кирсанов,

И.В. Комков, С.С. Юрочка, И.Ю. Игнаткин

Система обеспечения параметров воздуха в помещении
для содержания крупного рогатого скота 5

В.В. Кирсанов, И.М. Довлатов,

С.С. Юрочка, И.В. Комков

Разработка параметрической модели определения газового
состава воздушной среды (аммиак, сероводород, углекислый
газ) животноводческого помещения 13

С.М. Михайличенко

Автоматические системы кормления КРС: опыт эксплуатации
и перспективы использования 23

Н.В. Алдошин, Ф.М. Маматов,

И.И. Исмаилов, Р.Х. Угли Тавашов, А.С. Васильев

Обработка почвы и посев зерновых культур на склоновых полях... 30

В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин

Сепарация очесанного зернового вороха на решетчатом
днице наклонной камеры комбайна 35

В.Н. Нечаяев

Оптимизация настроечных параметров пассивного
измельчителя при приготовлении ржаной патоки 41

И.А. Старостин, С.А. Давыдова, А.В. Ещин

Интеллектуальная система управления
сельскохозяйственными роботами: формирование структуры... 49

В.Ф. Первушин, А.Г. Левшин,

М.З. Салимзянов, А.Г. Ипатов, В.И. Ширококов

Классификация ротационных рабочих органов
сельскохозяйственных машин и их траектории движения 57

В.В. Шаров

Аспекты наследия академика В.П. Горячкина 65

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

М.Н. Ерохин, С.М. Гайдар, Д.М. Скороходов,

С.М. Ветрова, А.С. Барчукова

Износостойкость низколегированных сталей в абразивной
среде 72

А.Г. Пастухов, Е.П. Тимашов

Обеспечение контролепригодности подшипниковых узлов
ведомого вала коробки перемены передач автомобиля
КАМАЗ-5320 79

К.М. Логачёв

Модернизация CVD-установки для осаждения карбида
хрома на внутренних поверхностях корпуса распылителя
форсунки дизельных двигателей 84

CONTENTS

Aleksei N. Tseplyaev

Life for the Sake of Life 4

FARM MACHINERY AND TECHNOLOGIES

Igor M. Dovlatov, Vladimir V. Kirsanov,

Ilya V. Komkov, Sergey S. Yurochka,

Ivan Yu. Ignatkin

Indoor air-conditioning system for cattle houses 5

Vladimir V. Kirsanov, Igor M. Dovlatov,

Sergey S. Yurochka, Ilya V. Komkov

Development of a parametric model for determining the gas
composition of the air environment (ammonia, hydrogen sulfide,
carbon dioxide) of livestock premises 13

Stanislav M. Mikhailichenko

Automatic systems for feeding cattle: operating experience
and perspective for use 23

Nikolay V. Aldoshin, Farmon M. Mamatov, Ibrat I. Ismailov,

Rustam Kh. Ugli Tavashov, Aleksandr S. Vasiliev

Soil tillage and crop sowing in slope fields 30

Viktor N. Ozherelev, Viktor V. Nikitin

Grain heap separation at the grates of a combine feederhouse 35

Vladimir N. Nechaev

Optimising the setting parameters of a passive grinder used
for rye molasses preparation 41

Ivan A. Starostin, Svetlana A. Davydova,

Aleksandr V. Eshchin

Intelligent agricultural robot control system: structure formation 49

Vladimir F. Pervushin,

Aleksandr G. Levshin, Marat Z. Salimzyanov,

Aleksei G. Ipatov, Vladimir I. Shirobokov

Classification of rotary cultivation tools of agricultural machines
and their motion trajectories 57

Vladimir V. Sharov

Aspects of the scientific legacy of Academician V.P. Goryachkin 65

TECHNICAL SERVICE IN AGRICULTURE

Mikhail N. Erokhin, Sergey M. Gaidar,

Dmitry M. Skorokhodov, Sofya M. Vetrova,

Alina S. Barchukova

Wear resistance of low-alloy steels in the abrasive environment 72

Aleksandr G. Pastukhov, Evgeniy P. Timashov

Ensuring the controllability of rear bearings used in the driven
shaft of the KAMAZ-5320 gearbox 79

Konstantin M. Logachev

Upgrading a CVD unit for chrome carbide deposition on the inner
surfaces of the fuel injector nozzle body of a diesel engine 84



К столетию со дня рождения Георгия Ефремовича Листопада – академика Россельхозакадемии, доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации, лауреата Золотой медали имени В.П. Горячкина, заслуженного изобретателя СССР

ЖИЗНЬ ВО ИМЯ ЖИЗНИ

Георгий Ефремович Листопад родился 1 мая 1923 г. в селе Камень Новгород-Северского района Черниговской области УССР. Будучи уже 15-летним пареньком, он начал трудовую биографию: сначала учеником токаря, а затем – токарем ре-

монтного завода. Проработав в течение незначительного времени на заводе, он возвратился в родное село.

Мечтой Георгия Листопада, как и большинства мальчишек той поры, были небо, самолеты, парашюты и все, что связано с романтикой воздухоплавания. В то далекое время этот «океан» манил своей загадочностью, непредсказуемостью, сложностью в познании. Но единственный сезон работы в колхозе на уборочной машине, называемой в простонародье «лобогрейкой», изменил представление сельского паренька о ценностях земного бытия. Тогда он сделал вывод о том, что свою судьбу свяжет с землей, сельским хозяйством, а точнее с инженерным делом на селе, и слова «Хлеб всему голова!» стали для него смыслом всей жизни.

В 1940 г. Георгий Листопад блестяще сдал экзамены в Азово-Черноморский институт механизации сельского хозяйства и был зачислен на первый курс факультета механизации сельского хозяйства.

Когда в 1941 г. началась Великая Отечественная война, Георгий Ефремович отказался от брони, предоставленной ему решением комиссариата, и добровольцем вступил в ряды Красной Армии. Наспех, по укороченной программе, он окончил военное училище и уже весной 1942 г. попал на Юго-Западный фронт под Харьковом. По приказу командования он был назначен командиром взвода противотанковых ружей. В то время под Харьковом шли самые тяжёлые бои, и наши бойцы несли огромные потери. Здесь Георгий Листопад получил первое боевое крещение и первое осколочное ранение. К концу лета 1942 г. его назначили заместителем командира роты Грузинской стрелковой дивизии. Далее военное лихолетье забросило его в Новороссийск. В составе 109-й гвардейской стрелковой и 9-й пластунской стрелковой дивизии он участвовал в освобождении Донбасса, Мелитополя и других городов Украины. Вместе с войной, уходившей на запад, твердой поступью освободителя шел Георгий Листопад. Бессарабия и Польша, Германия и Чехословакия – все перемешалось в страшном военном калейдоскопе.

Судьба была так благосклонна к Георгию, что при четырех ранениях и контузиях оставила его практически здоровым. О войне напоминали лишь множественные шрамы да часть осколков, покоящихся в этом нестигаемом теле.

После войны Г.Е. Листопад окончил Азово-Черноморский институт механизации сельского хозяйства и стал инженером-механиком. Аналитические способности позволили ему освоить самую древнюю игру – шахматы.

Он увлекся ею еще в студенческие годы, и после окончания института перед ним стоял выбор: стать профессиональным шахматистом или пойти в науку. Он выбрал последнее.

С 1950 г. Георгий Ефремович Листопад связал свою судьбу со Сталинградским СХИ. Его научная карьера от аспиранта до академика – пример целеустремленности, таланта и недюжинного ума мыслителя. Им разработаны и проведены фундаментальные исследования по улучшению конструкции зерноуборочных и зерноочистительных машин, разработан и внедрен в производство комплекс машин и механизмов для возделывания, уборки и переработки бахчевых культур, выполнены капитальные исследования по эффективности применения мобильных машин в сельскохозяйственном производстве. Основной вопрос, решенный им, – открытие совершенного нового, пионерского направления: программированного получения урожая сельскохозяйственных культур. Эти исследования коренным образом изменили представление о земледельческой механике, позволили объединить усилия агрономов, механиков, гидротехников, электриков, направленные на решение одной общей задачи – гарантированное получение урожая сельскохозяйственных культур.

В 1982 г. Георгий Ефремович был избран действительным членом академии ВАСХНИЛ (РАСХН) и переведен в Москву, где работал академиком-секретарем Отделения механизации, электрификации и автоматизации сельского хозяйства, членом Президиума ВАСХНИЛ, заведующим отделом прогнозирования и системы перспективных машин Всесоюзного научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства, а также профессором кафедры почвообрабатывающих машин Московского агроинженерного университета имени В.П. Горячкина.

По результатам исследований опубликовано 237 научных статей Г.Е. Листопада, изданы два учебника «Сельскохозяйственные и мелиоративные машины» для вузов, 14 книг и брошюр. Им получено более 30 авторских свидетельств и патентов на изобретения, опубликованы 4 его работы за рубежом. Кроме того, Георгием Ефремовичем Листопадом создана школа ученых, под его руководством и при его участии подготовлены 6 докторов и 32 кандидата технических наук. Его существенный вклад в земельную механику и классические фундаментальные разработки оценены золотой медалью имени В.П. Горячкина (с момента учреждения этой медали в 1936 г. ею награждены 8 лауреатов (восьмой – Г.Е. Листопад).

За боевые подвиги и трудовые достижения Г.Е. Листопад награжден 18 государственными наградами, в числе которых – 7 орденов (Октябрьской Революции, Трудового Красного Знамени, Почета, Отечественной войны первой и второй степени, Красной Звезды) и 11 медалей. В 1993 г. Георгию Ефремовичу присвоено звание «Заслуженный деятель науки и техники РФ».

А.Н. Цепляев,

доктор с.-х. наук, профессор,
ведущий научный сотрудник ВНИИОЗ

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 658.52.011.56

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-5-12



Система обеспечения параметров воздуха в помещении для содержания крупного рогатого скота

Игорь Мамедяревич Довлатов, канд. техн. наук, научный сотрудник¹

dovlatovim@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3058-2446>

Владимир Вячеславович Кирсанов[✉], чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, зав. отделом механизации и автоматизации животноводства¹

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

Илья Владимирович Комков, магистр, специалист¹

ilyakomkov10@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2407-4584>

Сергей Сергеевич Юрочка, канд. техн. наук, старший научный сотрудник¹

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

Иван Юрьевич Игнаткин, д-р техн. наук, профессор²

ignatkin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4867-1973>

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

² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. Создание комфортных условий для животных обеспечивает их долголетие и высокую продуктивность. Искусственная вентиляция, включающая в себя приточную, вытяжную системы и систему управления, минимизирует влияние человеческого фактора на поддержание параметров микроклимата в помещении. Предлагаемая система обеспечения параметров воздуха в помещении для содержания КРС с беспривязным содержанием разрабатывалась на основе анализа систем вентиляции животноводческих помещений и исследований, доказывающих эффективность осушения воздуха в зимний период с помощью рекуперативного теплообменника. Система обеспечения параметров микроклимата создавалась с помощью программы автоматизированного проектирования «Компас» (САПР) компании «Аскон». Разработанная система обеспечения параметров воздуха в помещении для содержания КРС включает в себя: электрофильтр и фильтр грубой очистки; вентиляторы; пластинчатый теплообменник; турбодефлектор; датчики температуры, влажности, скорости воздушного потока; пылесборники; насос; бак с дезинфектантом; механизм заслонки приточного воздуха и рециркулируемого воздуха. Использование рекуперативной системы осушения при низких температурах наружного воздуха позволяет поддерживать в помещении относительную влажность воздуха в нормативных пределах (75...40%) и снижать концентрацию углекислого газа на 20...45%. Для обеспечения указанных параметров микроклимата без осушения воздуха необходимо 200 кВт тепловой мощности для подогрева приточного воздуха. Предлагаемая комбинированная энергосберегающая всесезонная климатическая установка обеспечивает мониторинг параметров микроклимата и энергосбережение за счёт применения турбодефлектора, обеззараживает вентиляционный воздух, осушает воздух в коровнике в зимний период и охлаждает летом, а также частично обеспыливает воздух электромагнитным фильтром.

Ключевые слова: микроклимат, мониторинг параметров микроклимата, система обеспечения параметров воздуха, КРС, воздухообмен, рекуператор, влажность воздуха, содержание углекислого газа, продуктивность

Формат цитирования: Довлатов И.М., Кирсанов В.В., Комков И.В., Юрочка С.С., Игнаткин И.Ю. Система обеспечения параметров воздуха в помещении для содержания крупного рогатого скота // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 3. С. 5-12. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-5-12>.

ORIGINAL ARTICLE

Indoor air-conditioning system for cattle houses

Igor M. Dovlatov, CSc (Eng), Research Engineer¹

dovlatovim@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3058-2446>

Vladimir V. Kirsanov[✉], Corresponding Member of RAS, DSc (Eng), Professor¹

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

Ilya V. Komkov, specialist¹

ilyakomkov10@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2407-4584>

Sergey S. Yurochka, Junior Research Engineer¹

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

Ivan Yu. Ignatkin, DSc (Eng), Professor²

ignatkin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4867-1973>

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

² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract. Creating comfortable conditions for animals ensures their longevity and high productivity. Artificial ventilation, which includes supply and exhaust systems and a control system, minimizes the influence of the human factor on maintaining the indoor air parameters. The proposed system of indoor air-conditioning for the loose cattle housing layout was developed based on the analysis of ventilation systems of livestock premises and studies proving the effectiveness of dehumidification in winter using a regenerative heat exchanger. The system for providing indoor air parameters was developed using the computer-aided design program “Compass” (CAD) of the “Askon” company. The developed system for providing indoor air parameters for keeping cattle includes an electrofilter and a coarse filter, fans, a plate heat exchanger, a turbodeflector; temperature, humidity, and air flow velocity sensors, dust collectors, a pump, a tank with a disinfectant, and a mechanism for shutting down supply air and recirculated air. The use of a recuperative dehumidification system at low outdoor temperatures helps maintain the relative indoor humidity within the regulatory limits (75...40%) and reduce the concentration of carbon dioxide by 20...45%. To ensure these indoor air parameters without dehumidification, 200 kW of thermal power is needed to heat the supply air. The proposed combined energy-saving all-season climate control system provides monitoring of indoor air parameters and energy saving through the use of a turbo deflector, disinfects the ventilation air, dehumidifies the air in the cowshed in winter and cools in summer, and also partially removes dust from the air with an electromagnetic filter.

Keywords: indoor climate, monitoring of indoor air parameters, system for providing air parameters, cattle, air exchange, recuperator, air humidity, carbon dioxide content, productivity

For citation: Dovlatov I.M., Kirsanov V.V., Komkov I.V., Yurochka S.S., Ignatkin I.Yu. Indoor air-conditioning system for cattle houses. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(3):5-12. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-5-12>.

Введение. Создание комфортных условий для животных является залогом их долголетия и высокой продуктивности. К основным параметрам [1-2] микроклимата относятся температура, относительная влажность, содержание углекислого газа, аммиака, сероводорода, скорость движения воздуха и др¹. Несоблюдение установленных показателей параметров микроклимата приводит к возникновению различных отклонений в развитии животных, к появлению заболеваний, и как следствие – к снижению продуктивных

показателей, изменению их поведения [3, 4]. Содержание углекислого газа в помещении – наиболее важный показатель, который необходимо контролировать [5].

Известны два основных способа вентиляции: естественная и принудительная [6, 7], а также различные их комбинации. Основным недостатком систем вентиляции с естественным побуждением является зависимость естественной тяги от разности плотностей внутреннего и наружного воздуха, определяемой разностью температур, поэтому не весь отработанный воздух подвержен удалению из помещения. В отсутствие отопления в зимний период вентиляционные проемы прикрываются, что позволяет поддерживать положительную температуру в производственных

¹ Об утверждении Ветеринарных правил содержания крупного рогатого скота в целях его воспроизводства, выращивания и реализации: Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 21 октября 2020 г. № 622.

помещениях. Однако при этом резко повышается влажность и нередко наблюдается устойчивый туман с капельной влагой, свидетельствующий о 100%-ной относительной влажности. При естественной вентиляции происходит неравномерное распределение воздушных потоков и тепла, увеличивается загазованность помещения, что негативно сказывается на здоровье КРС и способно понизить его продуктивность на 10...20%.

Уровень общей механизации на животноводческих производствах крупного рогатого скота за последние три десятка лет снизился до 45%, что негативно сказывается на экономических показателях [8, 9]. Около 75% отечественных молочных хозяйств механизировано комплексно, что является недостаточным для нынешнего уровня сельского хозяйства.

Естественная вентиляция является основным ее способом в тех случаях, когда доминирующим критерием принятия решения является снижение затрат на капитальное строительство. Исходя из данных², следует, что типовое размещение приточно-вытяжной системы конькового типа не удовлетворяет потребности скотоводства в случае недостаточного количества данных систем в помещении для содержания, поэтому существует потребность в совершенствовании вентиляционных систем.

Искусственная вентиляция, являющаяся современным техническим решением и включающая в себя приточную, вытяжную системы и систему управления, минимизирует влияние человеческого фактора на поддержание параметров микроклимата в помещении. Отличительной особенностью таких систем является возможность их внедрения на производстве, где используют моноблочные помещения для содержания поголовья КРС. Такого рода системы вентиляции обходятся дороже, но способны стабильно обеспечивать требуемый микроклимат [5, 6], а также при прочих равных условиях имеют меньшие теплотери через ограждающие конструкции за счёт снижения удельной поверхности.

Система контроля микроклимата должна иметь автоматическое управление с возможностью ручного вмешательства [9]. При создании приточно-вытяжной системы необходимо учитывать траектории распределения воздушных масс, поля температур и концентраций вредных веществ [10-13].

Кроме того, применяемые системы естественной вентиляции не обеспечивают эффективную борьбу с тепловым стрессом у животных [14-17].

² Войтюк М.М., Сураева Е.А. Типовые проектные решения для модернизации животноводческих и птицеводческих комплексов и ферм: Сборник. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2017. 272 с.

Предлагается [18] комбинированная система обеспечения параметров микроклимата, основой которой является приточно-вытяжная система шахтного типа, включающая в себя теплообменник рекуперативного типа для утилизации теплоты вытяжного воздуха. Такое решение позволяет частично регенерировать воздух помещения за счёт его осушения, сохраняет воздух со значительным тепловым потенциалом и снижает потери теплоты.

Применение рекуператоров в коровниках с целью исключительно утилизации теплоты вытяжного воздуха является малоэффективным, что обусловлено низкой температурой содержания животных. Однако рекуператоры позволяют эффективно осушать воздух помещения [19-21], что позволяет без дополнительного подогрева поддерживать относительную влажность воздуха в требуемом диапазоне при минимальном воздухообмене, а следовательно, и повысить температуру воздуха. Описанные меры благотворно сказываются на здоровье и продуктивности животных.

Следует разработать всесезонную систему управления микроклиматом для помещений беспривязного содержания крупного рогатого скота на основе приточно-вытяжных установок шахтного типа с дополнительными функциями по очистке и осушению (увлажнению) воздуха, повышению эффективности утилизации теплоты, использованию энергосберегающего ветрового побудителя тяги: турбодефлектора, датчиков температуры, относительной влажности и загазованности.

Цель исследований: разработка системы обеспечения основных параметров воздуха в помещении для содержания крупного рогатого скота с беспривязным содержанием скота.

Материалы и методы. Анализ систем вентиляции животноводческих помещений, изучение источников литературы показали эффективность осушения воздуха с помощью рекуперативного теплообменника, на основании чего разработаны технологическая схема комбинированной энергосберегающей всесезонной климатической установки, схема ее расположения в коровнике и структурная схема управления контроллера.

Разработка новой системы обеспечения параметров микроклимата проводилась с помощью программы автоматизированного проектирования «Компас» (САПР) компании «Аскон».

Контроль параметров воздушной среды помещения осуществлялся в соответствии с требованиями, изложенными в приказе Министерства сельского хозяйства Российской Федерации № 622 от 21 октября 2020 г. и РД-АПК 1.10.01.01-18 «Методические

рекомендации по технологическому проектированию ферм и комплексов крупного рогатого скота».

Одна корова массой 500 кг при 10°C выделяет 504 Вт явной теплоты, 100 л/ч углекислого газа и 288 г/ч водяных паров. При этом относительная влажность воздуха в коровниках должна варьироваться в диапазоне 40...75%, концентрация углекислого газа – до 0,25%, аммиака – до 20 мг/м³, содержание сероводорода – 5 мг/м³, а для молодняка и взрослых животных эти показатели допускаются лишь в следовых количествах (РД-АПК 1.10.01.01-18).

Для круглогодичного поддержания вышеописанных показателей необходимо осуществлять воздухообмен с адекватной по отношению к условиям кратностью. Без применения энергосберегающих технологий в зимний период предполагаются значительные затраты на отопление.

В структуре теплового баланса современного, хорошо утепленного коровника на 600 гол. (стены и кровля – из сэндвич-панелей 100 и 200 мм соответственно, вентиляционные проемы закрыты надувными шторами), основные потери теплоты приходятся на нагрев вентиляционного воздуха. Так, при обеспечении нормативной относительной влажности 75% и температуры 10°C на вентиляцию приходится 388 кВт (76%), потери через ограждающие конструкции – 89 кВт (17%), потери на испарение влаги со смоченных поверхностей – 35 кВт (7%) [21].

Расчет тепло-влажностных балансов для коровника на 600 гол., расположенного в Липецкой области, показал, что для обеспечения требуемого микроклимата достаточными являются 4 установки производительностью 6000 м³/ч [21]. В наиболее холодный период года они будут работать поочередно в режимах «Рекуперация» и «Оттаивание».

Известно [21], что характерным является изменение относительной влажности в зависимости от температуры наружного воздуха для коровников, оборудованных системой осушения при обеспечении температуры 10°C, а также для коровников без системы осушения при обеспечении температуры 10 и 5°C. Согласно указанным данным составлены графики зависимости относительной влажности от наружной температуры [21].

Использование системы осушения воздуха позволяет внутри помещения поддерживать относительную влажность воздуха в нормативных пределах 75...40% и поддерживать концентрацию углекислого газа в среднем ниже на 20 и 45% по сравнению с базовой системой (при температуре воздуха внутри помещения соответственно 5 и 10°C). Без осушения воздуха при температурах ниже –13°C и –20°C поддержание относительной влажности в нормативных

пределах без отопления теоретически недостижимо. Для обеспечения указанных параметров микроклимата без осушения воздуха необходимо 200 кВт тепловой мощности для подогрева приточного воздуха [21].

Необходимо замерять относительную влажность воздуха и его температуру, а также содержание углекислого газа, в том числе контролировать скорость движения воздуха и другие параметры. Использовать газоанализирующие датчики в качестве источников регулирующего сигнала нежелательно в связи с техническими ограничениями: сравнительно низким ресурсом чувствительных элементов и их деградацией в процессе эксплуатации, требующими частой калибровки. На наш взгляд, в качестве регулирующих параметров следует принимать температуру и относительную влажность, так как они позволяют гарантированно управлять микроклиматом, а косвенно за счет корреляции относительной влажности и температуры с содержанием углекислого газа регулировать и концентрацию CO₂. Для более точного контроля концентрации углекислого газа допустима установка соответствующего датчика, информация с которого может быть использована в целях мониторинга или малой корректировки сигнал управляющего контура.

Результаты и их обсуждение. В результате анализа источников литературы определены функции и разработана технологическая схема комбинированной энергосберегающей всесезонной климатической установки (рис. 3). В качестве рекуператора предлагается теплообменник пластинчато-рифлёный с коэффициентом теплопередачи 5935 Вт/(м² К), который позволяет за счёт рифлёной конструкции достигать большей площади контакта для передачи тепла. Для осуществления его работы в холодный период от 0 до –10°C целесообразно интегрировать в него нагревательный элемент, а для проведения дезинфекции воздуха – распылительную форсунку, в которую поступает дезинфицирующее средство (дезинфектант), располагаемое в специальном баке. Поступление дезинфицирующего средства осуществляется по патрубку при работе насоса. Приходящие потоки воздуха обрабатываются дезинфектантом и поступают в помещение. Дезинфицирующее вещество также попадает в возвращённый воздух, что уменьшает вероятность распространения потенциально вредоносных организмов.

Предлагаемая система осуществляет:

- сбор данных с датчиков температуры, относительной влажности и концентрации углекислого газа;
- энергосбережение при обеспечении воздухообмена за счёт удаления части отработанного воздуха с применением турбодефлектора;
- обеззараживание вентиляционного воздуха;

- осушение воздуха в коровнике в зимний период;
- охлаждение воздуха и обдув животных приточными вентиляторами в жаркий период для борьбы с тепловыми стрессами;
- частичное обеспыливание воздуха электромагнитным фильтром.

Принцип работы системы описан ниже (рис. 1). При включении данной системы загрязненный воздух из помещения засасывается в шахту с помощью вентилятора и турбодефлектора, располагающегося сверху. Часть отработанного воздуха подвергается рециркуляции, проходя через фильтры.

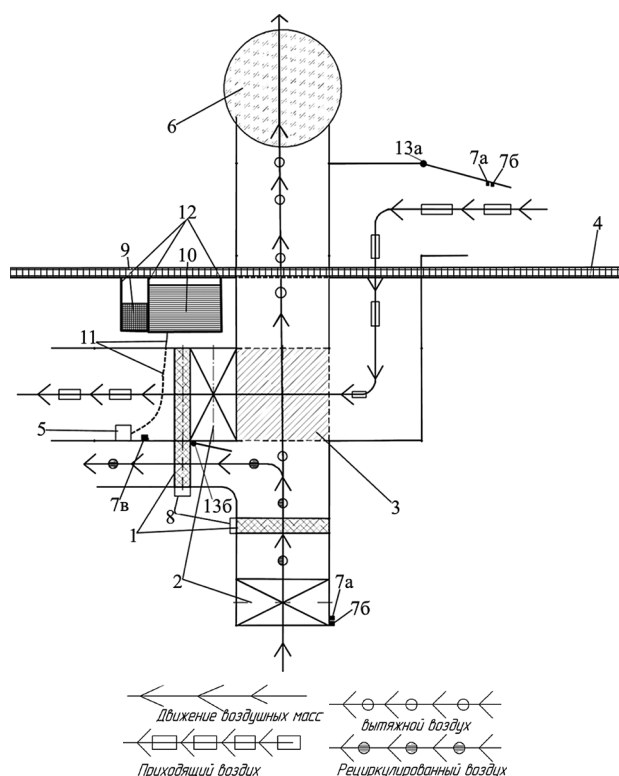


Рис. 1. Технологическая схема комбинированной энергосберегающей всесезонной климатической установки:

- 1 – электрофильтр и фильтр грубой очистки;
- 2 – вентиляторы с воздухопотоком 1440 m^3 ;
- 3 – теплообменник пластинчатый; 4 – крыша;
- 5 – распылительная форсунка; 6 – турбодефлектор;
- 7 – датчики температуры (а), влажности (б), скорости воздушного потока (в); 8 – баки-пылесборники;
- 9 – насос; 10 – бак с дезинфектантом; 11 – патрубок;
- 12 – крепления к потолку; 13 – механизм заслонки приточного воздуха (а) и рециркулируемого воздуха (б)

Fig. 1. Technological scheme of the combined energy-saving all-season climate control system:

- 1 – electrostatic precipitator and coarse filter;
- 2 – fans with 1440 m^3 airflow; 3 – plate heat exchanger;
- 4 – roof; 5 – spray nozzle; 6 – turbo deflector;
- 7 – temperature (a), humidity (b), airflow rate sensors (c);
- 8 – dust collector tanks; 9 – pump; 10 – tank with disinfectant;
- 11 – spigot; 12 – ceiling mountings;
- 13 – supply air (a) and recirculated air (b) damper

Вещества, оседающие на фильтрах, попадают в пылесборник, располагающийся под фильтрами. Также в рекуперационной части шахты имеется заслонка, которую можно закрыть, если температура воздуха в помещении достаточно высокая и нет необходимости в поступлении теплого воздуха. Основная масса удаляемого воздуха выносится наружу по шахте, проходя через пластинчатый теплообменник. Пластины нагреваются от удаляемого воздуха путем передачи тепла, которое потом передают поступающему свежему воздуху с улицы. Поступающий воздух, проходя через теплообменник, нагревается до оптимальной температуры и поступает в помещение уже достаточно прогретым, что способствует поддержанию оптимальных условий микроклимата. Приходящий воздух перед поступлением в помещение также проходит через электрофильтр, что способствует его очищению. Внутри шахты, через которую поступает воздух с улицы, располагается форсунка, распыляющая дезинфектант. Это позволяет частично обеспылить воздух и инактивировать патогенную микрофлору, а дополнительно – увлажнять воздух при необходимости. Форсунка располагается таким образом, что распыляющийся дезинфектант обрабатывает 2 потока воздуха: приходящий с улицы и рециркуляционный, то есть часть отработанного воздуха, который возвращается для поддержания положительного значения температуры, также обрабатывается от патогенных микроорганизмов. Дополнительно в системе предусмотрена автоматика по сбору параметров и их анализу по скорости потока, влажности и температуре.

Датчики температуры 7а, относительной влажности 7б и углекислого газа, располагающиеся в данной системе, позволяют осуществлять мониторинг и регулирование системы по интересующим нас параметрам.

Для более полного понимания взаимодействия системы и среды нами разработана технологическая схема расположения предлагаемого решения в коровнике (рис. 2).

Устройство управления следует располагать с торцевой стороны коровника или в техническом помещении для более удобного доступа к нему работников предприятия. Датчики необходимо устанавливать на уровне голов животных, однако на досочном расстоянии от них, чтобы избежать возможных повреждений и ложных управляющих сигналов в случае нахождения датчиков в зоне дыхания животных.

Система имеет три режима работы: летний, зимний, межсезонный. При летнем режиме не осуществляется работа вентиляторов или включается только вытяжной вентилятор при условии, что дефлектору не хватает производительности; приток воздуха

осуществляется через оконные проемы или шторы. При межсезонном режиме попеременная работа вентиляторов зависит от показателей температуры внешней среды. Приток может осуществляться как через окна, так и через рекуператор. При зимнем режиме воздухообмен осуществляется через рекуператор. Приточный воздух будет прогреваться в теплообменнике за счет выходящих воздушных масс, однако при низких температурах вытяжной канал рекуператора будет обмерзать, что обусловлено кристаллизацией конденсата влажного вытяжного воздуха. В таком случае рекуператор необходимо эксплуатировать поочередно в режимах «Рекуперация» и «Оттаивание». В случае оттаивания приток свежего воздуха прекращается, а теплый вытяжной, проходя через рекуператор, направляется обратно в помещение (рециркуляция). В процессе теплообмена рециркуляционный воздух охлаждается, достигая точки росы, что приводит к выделению конденсата. Воздух осушается, а в конденсате растворяется часть вредных газов (прежде всего – аммиак), что позволяет говорить о частичной регенерации воздуха.

Поскольку дополнительное удаление воздуха осуществляется за счет работы турбодефлектора, приводимого в движение от скорости ветра, то располагая внутри него датчик скорости вращения, можно определить его производительность.

Для автоматизации системы нами предлагается использование контроллера на базе *Arduino*. С основой на базе данных выбирается режим работы, соответствующий текущим условиям окружающей среды. После сбора и обработки данных, полученных

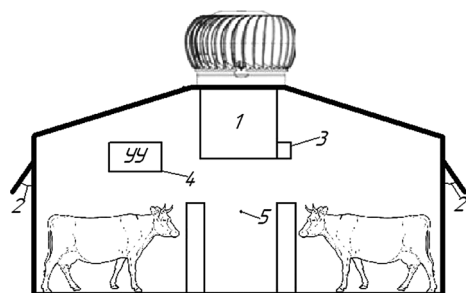


Рис. 2. Схема расположения системы обеспечения параметров воздуха в коровнике с беспривязным содержанием:

- 1 – система обеспечения параметров;
- 2 – приточные летние каналы;
- 3 – датчик температуры, влажности;
- 4 – устройство управления;
- 5 – датчики углекислого газа

Fig. 2. Schematic layout of the air-conditioning system in a loose-housing cowshed:

- 1 – air-conditioning system; 2 – summer inlet channels;
- 3 – temperature sensor, humidity sensor; 4 – control unit;
- 5 – carbon dioxide sensors

от датчиков температуры, влажности, углекислого газа, задающее устройство формирует команду устройству управления (включение/выключение вентилятора, начало работы дезинфицирующего устройства). Далее по каналу связи передается команда исполнительному устройству, которое уже выполняет необходимую команду. Затем цикл повторяется.

Структурная схема управления контроллера создана в соответствии с ГОСТ 19.701-90 «Схемы алгоритмов программ, данных и систем» и состоит из трех замкнутых каналов регулирования: 1 – управление вентиляторами; 2 – управление форсункой; 3 – управление электрофильтром (рис. 3).

В дальнейшем будут проводиться теоретические исследования с целью получения аналитических моделей распределения воздушных масс. Также планируется провести численное моделирование процессов распределения воздуха с учетом неравномерности его газового состава и разработку алгоритма работы контроллера. Будут проводиться опыты по функционированию работы контроллера и режимов работы на стенде, осуществляться сбор данных на ферме. Для проверки расхода воздуха в различных режимах системы и исследования процесса теплообмена планируется провести испытания узла дезинфекции для рассмотрения характера и площади распыления и узла воздухообмена. Планируется изготовить опытный образец системы и провести натурные испытания в хозяйстве.

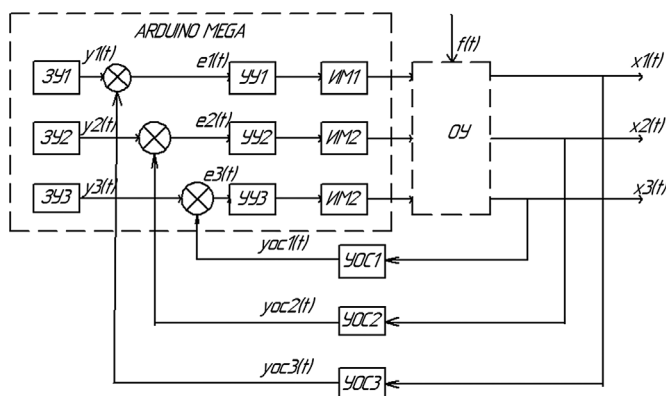


Рис. 3. Структурная схема управления контроллера:

- ЗУ – задающее устройство; УУ – устройство управления;
- ИМ – исполнительный механизм;
- ОУ – объект управления; УОС – устройство обратной связи;
- $y(t)$, $yoc(t)$ – задающее воздействие и сигнал обратной связи;
- $e(t)$ – сигнал ошибки; $f(t)$ – возмущающее воздействие;
- $x(t)$ – управляемый сигнал

Fig. 3. Control block diagram of the controller:

- ЗУ – set point device; УУ – control device; ИМ – actuator;
- ОУ – control object; УОС – feedback device;
- $y(t)$, $yoc(t)$ – set point and feedback signal; $e(t)$ – error signal;
- $f(t)$ – disturbance impact; $x(t)$ – controlled signal

Выводы

1. Существует необходимость в зимний период осушения воздуха помещения с применением рекуперативного теплообмена.

2. Рекуперативная система осушения при низких температурах наружного воздуха позволяет поддерживать в помещении относительную влажность воздуха в нормативных пределах (75...40%) и снижать концентрацию углекислого газа на 20...45% по сравнению с базовой системой. Поддержание указанных параметров микроклимата без осушения воздуха

обеспечивается подогревом приточного воздуха, на что необходимо 200 кВт тепловой мощности.

3. Разработанная комбинированная энергосберегающая всесезонная климатическая установка обеспечивает мониторинг параметров микроклимата и энергосбережение при условии воздухообмена, обусловленного удалением части отработанного воздуха с помощью турбодефлектора. Дополнительно установка обеззараживает вентиляционный воздух, осушает воздух в коровнике в зимний период и охлаждает летом, а также частично обеспыливает воздух электромагнитным фильтром.

Список использованных источников

1. Иванов Ю.Г., Кирсанов В.В., Юрочка С.С. Исследования параметров микроклимата в зоостанции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева // Доклады ТСХА. 2019. Вып. 291. Ч. V. С. 115. EDN: IFYIGH
2. Assatbayeva G., Issabekova S., Uskenov R., Karymsakov T., Abdrakhmanov T. Influence of microclimate on ketosis, mastitis and diseases of cow reproductive organs. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*. 2022;10 (3):2230. <http://dx.doi.org/10.31893/jabb.22030>
3. Lovarelli D., Riva E., Mattachini G., Guarino M., Provolo G. Assessing the effect of barns structures and environmental conditions in dairy cattle farms monitored in Northern Italy. *Journal of Agricultural Engineering*. 2021;52(4):12-29.
4. Второй В.Ф. Структура системы конверсии вредных газов из воздушной среды коровника // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. № 2 (99). С. 286-295. <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10174>
5. Довлатов И.М., Юрочка С.С. Разработка энергоэффективной системы микроклимата для беспривязного содержания дойного стада // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15, № 3. С. 73-80. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-3-73-80>
6. Tomasello N., Valenti F., Cascone G., Porto S. Development of a CFD model to simulate natural ventilation in a semi-open free-stall barn for dairy cows. *Buildings*. 2019;9(8):183. <https://doi.org/10.3390/buildings9080183>
7. Волков А.И., Прохорова Л.Н., Большакова В.С. Технико-экономические показатели механизации и автоматизации базовых отраслей животноводства // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. 2019. № 21. С. 527-530. EDN: HIZNWU
8. Морозов Н.М. Развитие исследований по механизации и автоматизации животноводства // История науки и техники. 2019. № 12. С. 40-45. EDN: HNCLMJ
9. Тихомиров Д.А., Баклячян Р.А., Добровольский Ю.Н. Функциональная схема и исходные требования на комплект автоматического управления микроклиматом в животноводческом помещении // Агротехника и энергообеспечение. 2021. № 1 (30). С. 7-17. EDN: MEKSSM
10. Игнаткин И.Ю. Способ утилизации теплоты вытяжного воздуха с применением рекуперативного теплообменника // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2018. № 1 (56). С. 151-157. EDN: XSVENN
11. Кирсанов В.В., Игнаткин И.Ю. Струйная модель притока вентиляционного воздуха из теплоутилизационной установки // Вестник Федерального государственного

References

1. Ivanov Yu.G., Kirsanov V.V., Yurochka S.S. Studies of microclimate parameters in the zoo station of the Russian State Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev. *TLC reports*. 2019;291(V):115. (In Rus.)
2. Assatbayeva G., Issabekova S., Uskenov R., Karymsakov T., Abdrakhmanov T. Influence of microclimate on ketosis, mastitis and diseases of cow reproductive organs. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*. 2022;10(3):2230. <http://dx.doi.org/10.31893/jabb.22030>
3. Lovarelli D., Riva E., Mattachini G., Guarino M., Provolo G. Assessing the effect of barns structures and environmental conditions in dairy cattle farms monitored in Northern Italy. *Journal of Agricultural Engineering*. 2021;52(4):12-29.
4. Vtoriy V.F. Structure of the conversion system of harmful substances found in the cowshed air. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2019;2(99):286-295. <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10174> (In Rus.)
5. Dovlatov I.M., Yurochka, S.S. Development of an energy-efficient microclimate system for dairy herd loose keeping. *Agricultural machines and technologies*. 2021;15(3):73-80. (In Rus.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-3-73-80>
6. Tomasello N., Valenti F., Cascone G., Porto S. Development of a CFD model to simulate natural ventilation in a semi-open free-stall barn for dairy cows. *Buildings*. 2019;9(8):183. <https://doi.org/10.3390/buildings9080183>
7. Volkov A.I., Prokhorova L.N., Bolshakova V.S. Technical and economic indicators of mechanization and automation of basic livestock industries. *Topical issues of improving the technology of production and processing of agricultural products*. 2019;21:527-530. (In Rus.)
8. Morozov N.M. Development of research on mechanization and automation of livestock. *History of science and technology*. 2019;12:40-45. (In Rus.)
9. Tikhomirov D.A., Baklachyan R.A., Dobrovolsky Yu.N. Functional diagram and initial requirements for a set of automatic climate control in a livestock room. *Agricultural machinery and energy supply*. 2021;1(30):7-17. (In Rus.)
10. Ignatkin I.Yu. Exhaust air heat recovery technique using a recuperative heat exchanger. *Bulletin of the Voronezh State Agrarian University*. 2018;1(56):151-157. (In Rus.)
11. Kirsanov V.V., Ignatkin I.Yu. Jet model of ventilation air inflow from heat-recovery unit. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2018;2(84):28-32. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-28-32>
12. Myroniuk K., Voznyak O., Savchenko O., Kasynets M. Mathematical modeling of an air flow leakage with the jets interaction at the variable mode: *Lecture Notes*

образовательного учреждения высшего профессионально образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2018. № 2 (84). С. 28-32. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-28-32>

12. Myroniuk K., Voznyak O., Savchenko O., Kasynets M. Mathematical modeling of an air flow leakage with the jets interaction at the variable mode: Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. Pp. 289-298. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14141-6_29

13. García-Castillo J.L., Picón-Núñez M., Abu-Khader M.M. Improving the prediction of the thermohydraulic performance of secondary surfaces and its application in heat recovery processes. *Energy*. 2022;261:125-196. <https://doi.org/10.1016/j.energy>

14. Ильин И.В., Игнаткин И.Ю., Курячий М.Г. Ресурсосберегающая система отопления и вентиляции // Эффективное животноводство. 2011. № 9 (71). С. 42-44. EDN: WKKTAX

15. Архипцев А.В., Игнаткин И.Ю. Автоматизированная система микроклимата с утилизацией теплоты вытяжного воздуха // Вестник НГИЭИ. 2016. № 4 (59). С. 5-14. EDN: VYUQPX

16. Mohsenimanesh A., LeRiche E.L., Gordon R., MacKinnon I., VanderZaag A.C. Review: Dairy farm electricity use, conservation, and renewable production- a global perspective. *Applied Engineering in Agriculture*. 2021;37(5):977-990. <https://doi.org/10.13031/aea.14621>

17. Колотушкин А.Н., Юрочка С.С., Васина М.Ю., Довлатов И.М. Устройство автоматического регулирования качества воздуха в животноводческих помещениях // Агротехника и энергообеспечение. 2021. № 3 (32). С. 17-23. EDN: GWBZKJ

18. Sizova Y.V., Kucherenko M.N., Vasilieva L.A., Matveev V.Y., Kotin A.I. Analysis of microclimate in livestock housing. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2020;29(3):3730-3736. <http://sercsc.org/journals/index.php/IJAST/article/view/5051>

19. Mylostyvyi R., Chernenko O. Correlations between environmental factors and milk production of Holstein cows. *Data*. 2019;4(3):103. <https://doi.org/10.3390/data4030103>

20. Yan G., Shi Z., Cui B., Li H. Developing a new thermal comfort prediction model and web-based application for heat stress assessment in dairy cows. *Biosystems Engineering*. 2022;214:72-89. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.12.006>

21. Игнаткин И.Ю. Способ осушения воздуха в коровниках // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2017. № 3 (79). С. 20-24. EDN: YTPHCH

Вклад авторов

В.В. Кирсанов – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, литературный анализ, обработка результатов исследования.

И.М. Довлатов – литературный анализ, обработка результатов исследования, доработка текста и общих выводов.

И.В. Комков – литературный анализ, верстка и формирование работы, формирование текста.

С.С. Юрочка – литературный анализ, обработка результатов исследования.

И.Ю. Игнаткин – обработка результатов исследования, доработка текста и выводов.

Конфликт интересов

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

Статья поступила в редакцию 14.11.2022; поступила после рецензирования и доработки 12.04.2023; принята к публикации 17.04.2023

in *Civil Engineering*. 2023. Pp. 289-298. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14141-6_29

13. García-Castillo J.L., Picón-Núñez M., Abu-Khader M.M. Improving the prediction of the thermohydraulic performance of secondary surfaces and its application in heat recovery processes. *Energy*. 2022;261:125-196. <https://doi.org/10.1016/j.energy>

14. Ilyin I.V., Ignatkin I.Yu., Kuryachiy M.G. Resource-saving heating and ventilation system. *Efficient animal husbandry*. 2011;9(71):42-44. (In Rus.)

15. Arkhipov A.V. Arkhipov, Ignatkin I.Yu. Automated system microclimate with heat recovery exhaust air. *Bulletin of the NGIEI*. 2016;4(59):5-14. (In Rus.)

16. Mohsenimanesh A., LeRiche E.L., Gordon R., MacKinnon I., VanderZaag A.C. Review: Dairy farm electricity use, conservation, and renewable production- a global perspective. *Applied Engineering in Agriculture*. 2021;37(5):977-990. <https://doi.org/10.13031/aea.14621>

17. Kolotushkin A.N., Jurochka S.S., Vasina M.Yu., Dovlatov I.M. Device for automatic air quality control in livestock premises. *Agrotehnika i energoobespechenie*. 2021;3:17-23. (In Rus.)

18. Sizova Y.V., Kucherenko M.N., Vasilieva L.A., Matveev V.Y., Kotin A.I. Analysis of microclimate in livestock housing. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2020;29(3):3730-3736. <http://sercsc.org/journals/index.php/IJAST/article/view/5051>

19. Mylostyvyi R., Chernenko O. Correlations between environmental factors and milk production of Holstein cows. *Data*. 2019;4(3):103. <https://doi.org/10.3390/data4030103>

20. Yan G., Shi Z., Cui B., Li H. Developing a new thermal comfort prediction model and web-based application for heat stress assessment in dairy cows. *Biosystems Engineering*. 2022;214:72-89. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.12.006>

21. Ignatkin Ivan Yu. Method of drying air in cowsheds. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2017;3(79):20-24. (In Rus.)

Contribution of the authors

V.V. Kirsanov – research supervision, formulation of the main directions of research, literature review, processing of research results.

I.M. Dovlatov – literature review, processing of research results, finalising the text and general conclusions.

I.V. Komkov – literature review, layout and formation of the work, text formation.

S.S. Yurochka – literature review, processing of the research results.

I.Yu. Ignatkin – processing of the research results, finalization of the text and conclusions

Conflict of interests

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

Received 14.11.2022; revised 12.04.2023; accepted 17.04.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.22.019

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-13-22



Разработка параметрической модели определения газового состава воздушной среды (аммиак, сероводород, углекислый газ) животноводческого помещения

Владимир Вячеславович Кирсанов, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор

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

Игорь Мамедяревич Довлатов[✉], канд. техн. наук, научный сотрудник

dovlatovim@mail.ru

Сергей Сергеевич Юрочка, младший научный сотрудник

yurochkasr@gmail.com

Илья Владимирович Комков, специалист

ilyakomkov10@yandex.ru

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

Аннотация. Параметры микроклимата влияют на продуктивность животных и их физиологическое состояние. Превышение допустимых концентраций газов приводит к заболеваниям животных, падению продуктивности и падежу молодняка КРС, поэтому целесообразно прогнозировать концентрацию газового состава в животноводческом помещении. С целью определения и распределения вредных газов (аммиак, сероводород, углекислый газ) в животноводческом помещении осуществлено 3D-моделирование фрагмента фермы в программном комплексе SolidWorks 2020. Созданы параметрические модели движения газов в различных условиях и определены оптимальные точки замеров концентрации газов в животноводческом помещении. Произведенное моделирование позволило определить направление воздушных потоков, обнаружить скопления и облака газов. Максимальная концентрация углекислого газа выявлена на уровне 0,9 м (скорость воздуха – 0 м/с) и на уровне 1,3 м (скорость – 0,75 м/с). Наибольшая концентрация сероводорода отмечена в области, граничащей с коньковым пространством (скорость воздуха – 0 м/с), и на уровне 2,25 м (скорость – 2 м/с). Наибольшая концентрация аммиака наблюдается под крышей и в области под коньком (скорость воздуха – 2 м/с). Рекомендовано устанавливать датчики сероводорода и аммиака под коньком, датчики углекислого газа, сероводорода и аммиака – в стойле, датчики углекислого газа и сероводорода – у кормового стола. Измерение концентрации необходимо производить на высоте 500, 1500 и 3000 мм. При увеличении концентрации выделяемого газа и прочих равных условиях увеличивается концентрация газа в облаке, но структура облака изменяется незначительно. Датчики опроса параметров необходимо устанавливать в закрытых продуваемых боксах, как в погодных метеостанциях.

Ключевые слова: микроклимат, КРС, аммиак, углекислый газ, сероводород, параметрическая модель, моделирование

Формат цитирования: Кирсанов В.В., Довлатов И.М., Юрочка С.С., Комков И.В. Разработка параметрической модели определения газового состава воздушной среды (аммиак, сероводород, углекислый газ) животноводческого помещения // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 3. С. 13-22. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-13-22>.

© Кирсанов В.В., Довлатов И.М., Юрочка С.С., Комков И.В., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Development of a parametric model for determining the gas composition of the air environment (ammonia, hydrogen sulfide, carbon dioxide) of livestock premises

Vladimir V. Kirsanov, Corresponding Member of RAS, DSc (Eng), Professor

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

Igor M. Dovlatov[✉], CSc (Eng), Research Engineer

dovlatovim@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-3058-2446>

Sergey S. Yurochka, Junior Research Engineer

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

Ilya V. Komkov, Expert

ilyakomkov10@yandex.ru

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

Abstract. Indoor climate parameters influence the productivity of animals and their physiological condition. Exceeding permissible concentrations of gases leads to animal diseases, loss of productivity, and the mortality of young cattle. Therefore, it is reasonable to predict the concentration of gas composition in the livestock houses. To determine and distribute harmful gases (ammonia, hydrogen sulphide, and carbon dioxide) in the livestock house, the authors performed the 3D modeling of a fragment of the farm in the SolidWorks 2020 software package. Parametric models of gas movement under different conditions were created and optimal measurement points of gas concentration in the livestock house were determined. The simulations made it possible to determine the direction of air flows and detect accumulations and clouds of gases. The maximum concentration of carbon dioxide was detected at 0.9m (an air speed of 0 m/sec) and at 1.3m (a speed of 0.75 m/sec). The highest concentration of hydrogen sulphide was found in the area bordering the ridge space (an air speed of 0 m/s) and at the level of 2.25 m (a speed of 2 m/s). The highest concentration of ammonia was observed under the roof and in the area under the ridge (an air speed of 2 m/s). It is recommended to install hydrogen sulphide and ammonia sensors under the ridge, while carbon dioxide, hydrogen sulphide and ammonia sensors – in the stall, carbon dioxide and hydrogen sulphide sensors – near the feed table. Concentrations should be measured at heights of 500, 1500, and 3000 mm. When the concentration of emitted gas increases and other conditions are equal, the concentration of gas in the cloud increases, but the structure of the cloud changes insignificantly. Parameter interrogation sensors should be installed in enclosed ventilated boxes in the same manner as in weather stations.

Keywords: indoor climate, cattle, ammonia, carbon dioxide, hydrogen sulfide, parametric model, modeling

For citation: Kirsanov V.V., Dovlatov I.M., Yurochka S.S., Komkov I.V. Development of a parametric model for determining the gas composition of the air environment (ammonia, hydrogen sulfide, carbon dioxide) of livestock premises. Agricultural Engineering (Moscow), 2023;25(3):13-22. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-13-22>.

Введение. Мониторинг и контроль показателей параметров микроклимата являются одними из важнейших аспектов животноводства. Для осуществления данного процесса определены ПДК – концентрации веществ, которые при повседневном контакте в течение длительного времени не вызывают патологических отклонений или заболеваний¹ [1-5].

При превышении ПДК того или иного газа у коров развивается стресс, ухудшается физиологическое состояние вплоть до летального исхода. Также отсутствие нормирования потоков в зимний период приводит к значительному повышению риска заболеваний у крупного рогатого скота в связи с воздействием низких температур. В жаркий период есть риск получения теплового удара и неблагоприятной является сухость воздуха. Все перечисленные факторы значительно увеличивают стресс у КРС и, помимо возможных заболеваний, могут привести к падению продуктивности до 30...35%. Падеж молодняка при несоблюдении вышеизложенных условий может достигать 35% [6-13].

Цель исследований: теоретическое моделирование определения накопления и распределения

вредных газов (аммиак, сероводород, углекислый газ) в животноводческом помещении.

Задачами исследования являлись:

- разработка 3D-модели фрагмента фермы для загрузки в специализированную программу SolidWorks;
- описание газового состава воздуха в животноводческом помещении и различных внешних условий для параметрических моделей;
- создание модели движения газов в животноводческих помещениях в различных условиях с помощью специализированного программного обеспечения;
- определение оптимальных точек замеров газовой составляющей внутри животноводческого помещения;
- выявление влияния увеличения концентрации выделяемого газа на структуру облака.

Материалы и методы. В ходе исследований в программных комплексах SketchUp 2020 разработана упрощенная модель фермы с полным соответствием габаритных размеров помещений, приточных и вытяжных отверстий.

Моделирование движения воздуха внутри помещения производилось в программном комплексе SolidWorks 2020.

Для проведения параметрического моделирования по определению газового состава воздушной среды внутри животноводческого помещения разработана

¹ Об утверждении Ветеринарных правил содержания крупного рогатого скота в целях его воспроизводства, выращивания и реализации: приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 21 октября 2020 г. № 622.

3D-модель фермы, в которой присутствуют упрощения: изображение коров, отсутствуют стойла, закрыты ворота, отсутствуют коммуникации на колоннах и прочие мелкие допущения. Данные допущения были сделаны с целью оптимизации модели для возможности параметрического моделирования. В противном случае мощности вычислительных машин не хватит, а влияние добавленных упрощений на результат будет незначительным. Допущение, применяемое в расчете, заключается в том, что рассматривается участок фермы (часть коровника, где размещено 10 коров).

Результаты и их обсуждение. Для разработки параметрической модели авторами дополнительно проведено исследование газового состава воздуха (производные аммиака, сероводород, метан, органические соединения, аммиак). С помощью молярной массы газов (углекислый газ – 44 г/моль; сероводород – 34 г/моль; кислород – 32 г/моль; угарный газ – 28 г/моль; аммиак – 17 г/моль; метан – 16 г/моль), определяемой по таблице Менделеева, можно обнаружить их локализацию.

На распределение газов в помещении для КРС влияют количество тепла, массовая концентрация углекислого газа и массовые концентрации аммиака с сероводородом. Для коров количество выделяемого тепла составляет 1000 Вт; массовая концентрация углекислого газа – 0,04 мг/м³, аммиака – 50 мг/м³,

сероводорода – 1 мг/м³. Следовательно, наиболее эффективно проводить мониторинг углекислого газа ввиду того, что концентрация CO₂ быстрее других газов достигает отметки, приближенной к верхней границе ПДК. Также ряд газов имеет специфичную локализацию, в которой затруднительно располагать датчики. Датчик углекислого газа имеет наибольший срок эксплуатации по сравнению с датчиками других газов.

Параметрическое моделирование. Внешний вид разработанной параметрической модели определения газового состава воздушной среды животноводческого помещения, реализованной в виде фрагмента фермы, в котором размещено 10 гол., представлен на рисунке 1.

В свежем воздухе концентрация углекислого газа (CO₂) составляет от 0,03 до 0,045%. В соответствии с ветеринарным журналом о состоянии животных в выдыхаемом коровой воздухе концентрация углекислого газа составляет 4%.

Параметрическая модель 1. Летом, при штиле и отсутствии движения воздуха, углекислый газ в коровнике распространяется, как представлено на рисунке 2. Данная модель показывает, какая концентрация углекислого газа от 10 животных содержится в объеме 31,5×11,2×2,5 м (Д×Ш×В). В зоне скопления животных количество углекислого газа возрастает. Полученные результаты некорректно

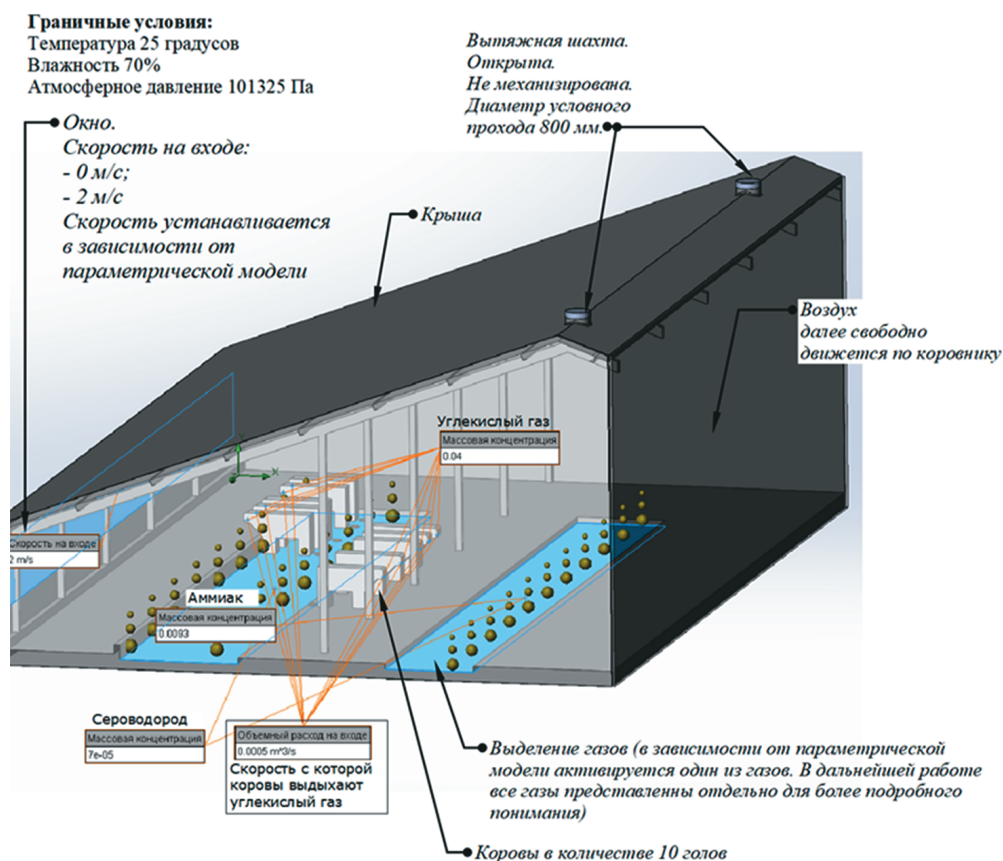


Рис. 1. Параметрическая модель граничных условий

Fig. 1. Parametric model of boundary conditions

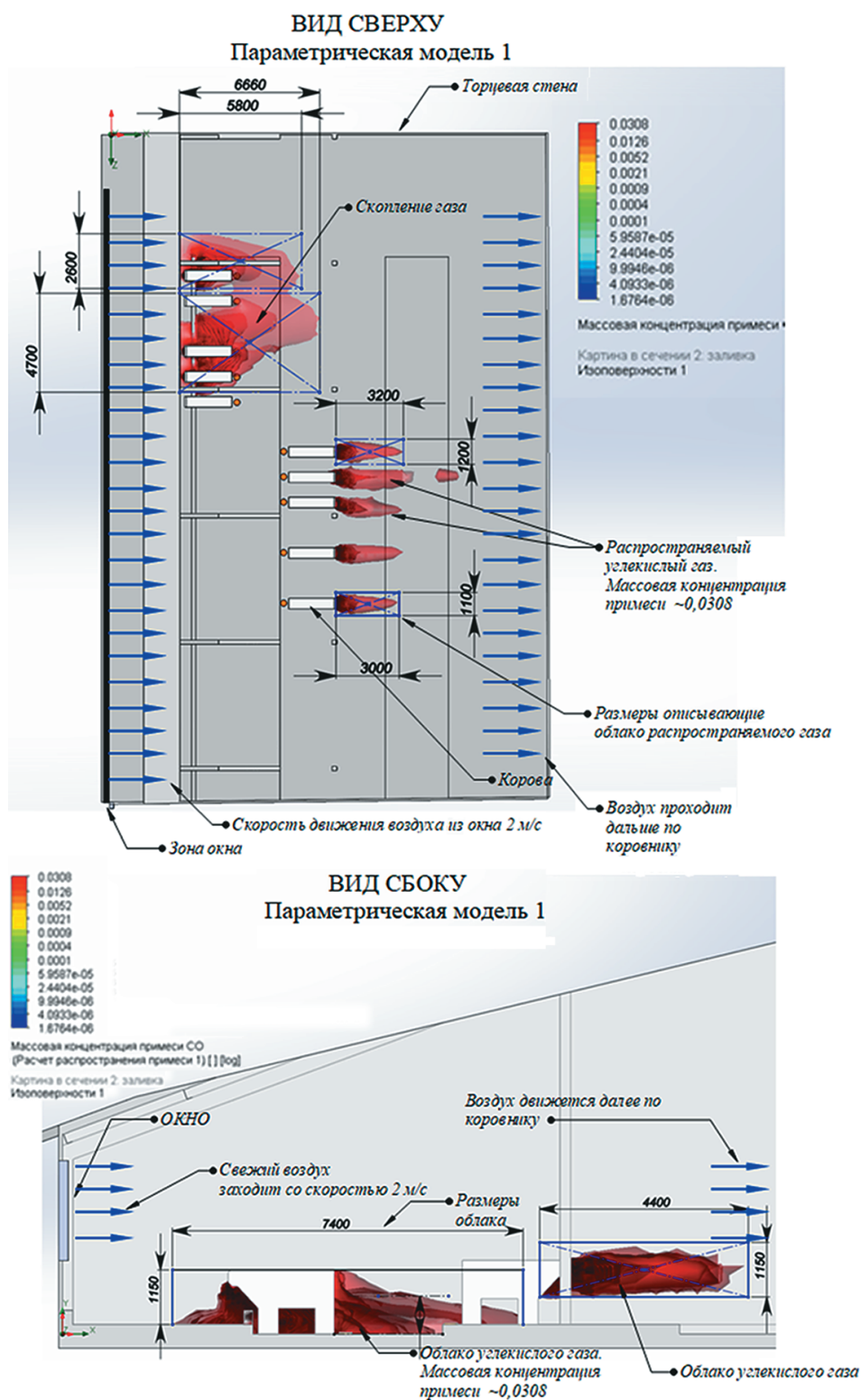


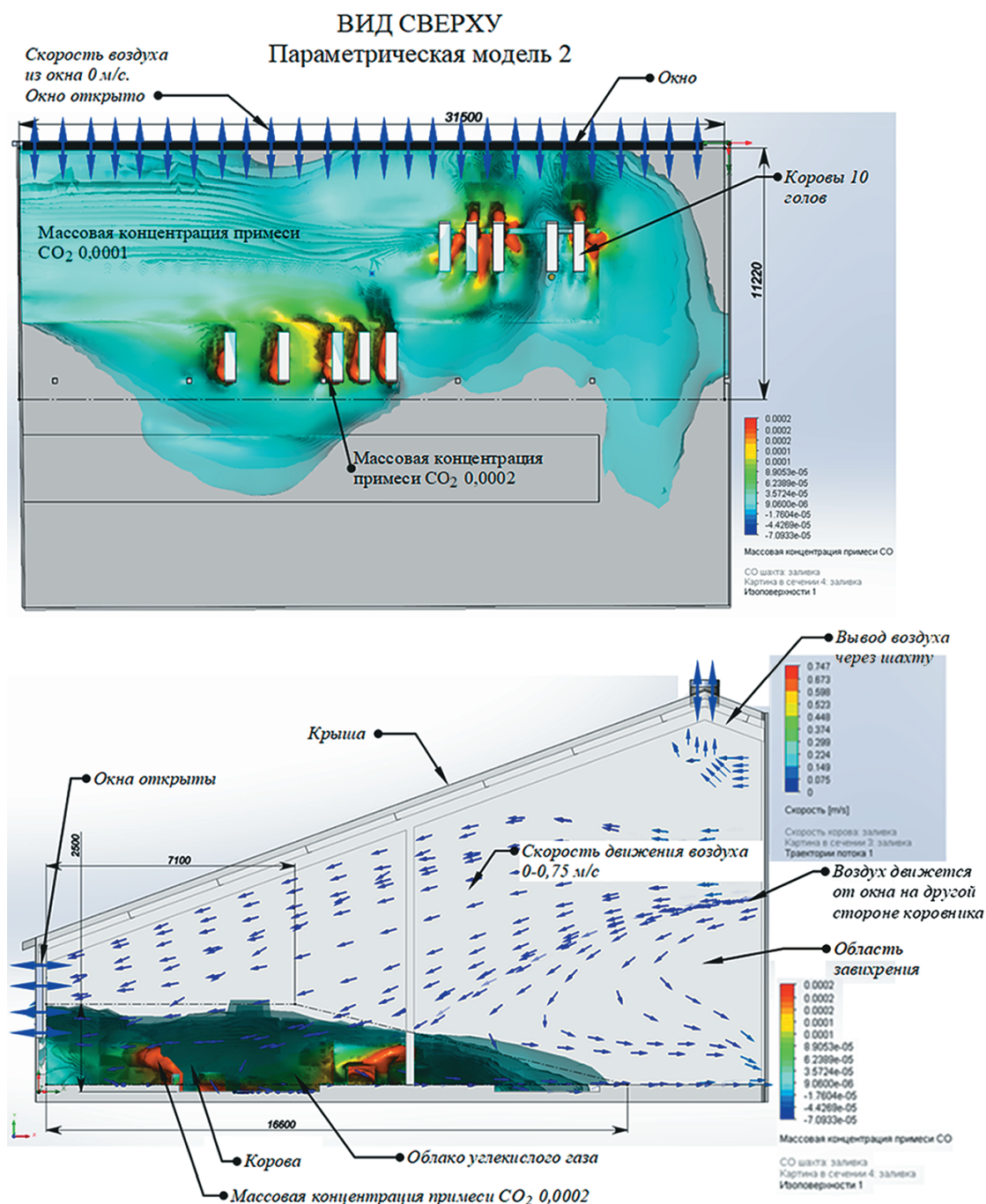
Рис. 2. Параметрическая модель распространения CO_2 (0,04) (отсутствие воздушного потока)

Fig. 2. Parametric model of CO_2 spreading (0.04) (no airflow)

использовать для прогнозирования превышения ПДК по углекислому газу, но корректно использовать для прогнозирования установки исполнительных механизмов микроклимата (датчиков, вентиляторов, шторок и пр.).

Параметрическая модель 2. При наличии воздушного потока параметрическая модель имеет другой

вид (рис. 3). На рисунке стрелками синего цвета изображены произвольные потоки движения воздуха, равные 0,75 м/с. Выявлено, что наибольшая концентрация углекислого газа достигается на уровне морды коровы, что соответствует 0,9 м. Рекомендуется рассматривать место установки датчиков на опорных стойках в интервале 0,4...1,0 м от пола.

Рис. 3. Параметрическая модель распространения CO_2 (скорость воздушного потока – 0,75 м/с)Fig. 3. Parametric model of CO_2 spreading (airflow velocity – 0.75 m/s)

В обоих случаях углекислый газ растворяется в общем объеме свежего воздуха, и его концентрация становится предельно малой, поэтому на модели отображение отсутствует. Следует вывод о том, что место установки и точку замеров углекислого газа на ферме следует выбирать с учетом внешней среды, но в любом случае расположение датчиков, измеряющих углекислый газ, не следует устанавливать выше 1,2 м.

Параметрическая модель показывает, что вся зеленая зона имеет концентрацию углекислого газа 1%, бирюзовая зона – от 0,045 до 0,07%. Благодаря данной модели мы можем наглядно видеть, что наибольшая

концентрация CO_2 локализуется возле животных, но при наличии достаточного воздушного потока происходит распространение данного газа по большей части коровника. Также можно увидеть, что уровень локации CO_2 выше высоты животного на несколько десятков сантиметров, выше локализация не установлена. Установлено, что максимальная концентрация углекислого газа наблюдается в области перед животным на уровне 1,30 м.

Параметрическая модель 3. На рисунке 4 показано облако распространения H_2S концентрацией 20 мг/м³ при условии, что свежий воздух поступает из окон со скоростью 2 м/с.

Параметрическая модель показывает скопление газа сероводорода в области работы скреперной установки, где находятся кал и моча. Газ, растворенный и перемещенный потоком воздуха, скапливается под потолком, сероводород легче других газов подвергается засасыванию вытяжкой. Это место скопления газа является постоянным и не зависит от временных характеристик. При изменении скорости входящего свежего воздуха насыщенность газа в облаке будет меняться. Было обнаружено, что наибольшая концентрация сероводорода находится на высоте 2,25 м.

Параметрическая модель 4. На рисунке 5 смоделирована ситуация, когда скорость воздушного потока имеет нулевое значение. Воздух произвольно движется со скоростью не более 0,3 м/с.

Из рисунка 5 следует, что основная часть сероводорода скапливается под коньком. Часть сероводородного облака оседает на полу, высотой не более 500 мм. Воздушные потоки и завихрения «прибивают» газ к полу в область, предназначенную для отдыха животных. Известно, что наибольшая концентрация сероводорода наблюдается в области, граничащей с коньковым пространством.

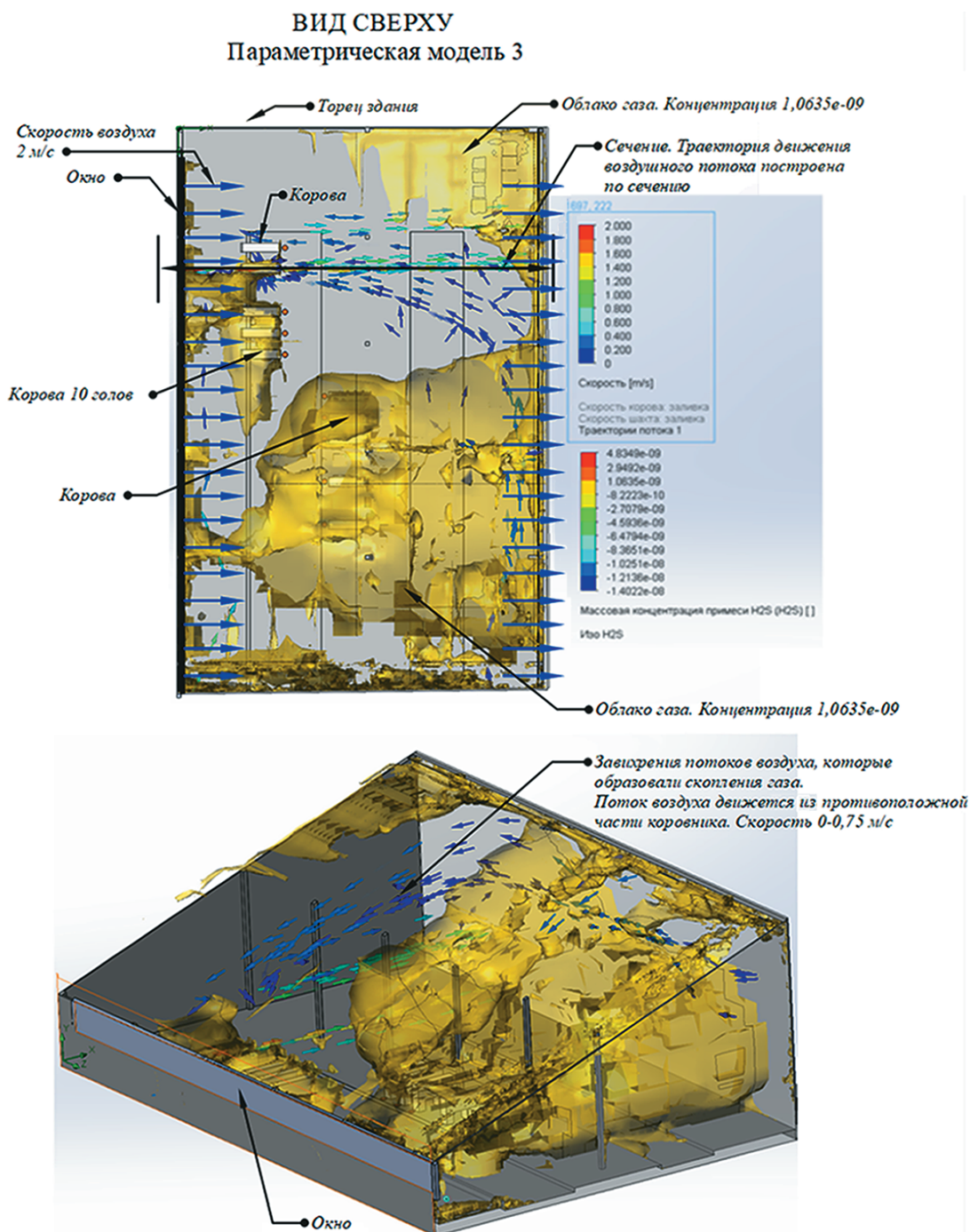


Рис. 4. Параметрическая модель распространения H_2S 20 мг/м³ (скорость воздушного потока – 2 м/с)

Fig. 4. Parametric model of H_2S spreading – 20 mg/m³ (airflow velocity 2 m/s)

Параметрическая модель 5. На рисунке 6 изображены закрытые окна, воздух произвольно движется со скоростью не более 0,3 м/с. Основная часть аммиака

скапливается под коньком. Малая часть аммиачного облака оседает на полу, высотой не более 500 мм, в том числе у кормового стола. Воздушные потоки

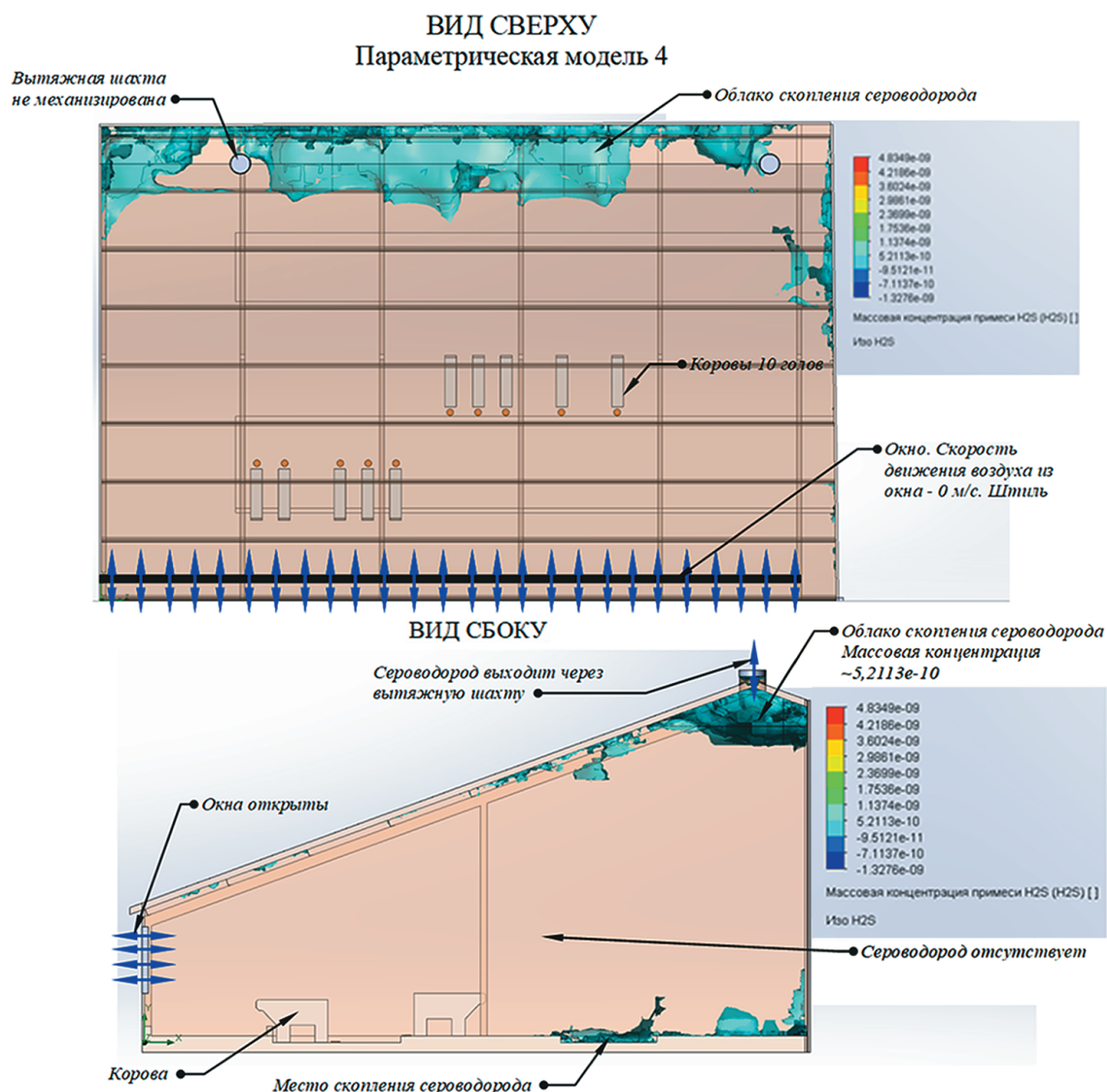


Рис. 5. Параметрическая модель распространения H_2S 20 мг/м³ (отсутствие воздушного потока)

Fig. 5. Parametric model of H_2S spreading – 20 mg/m³ (no airflow)

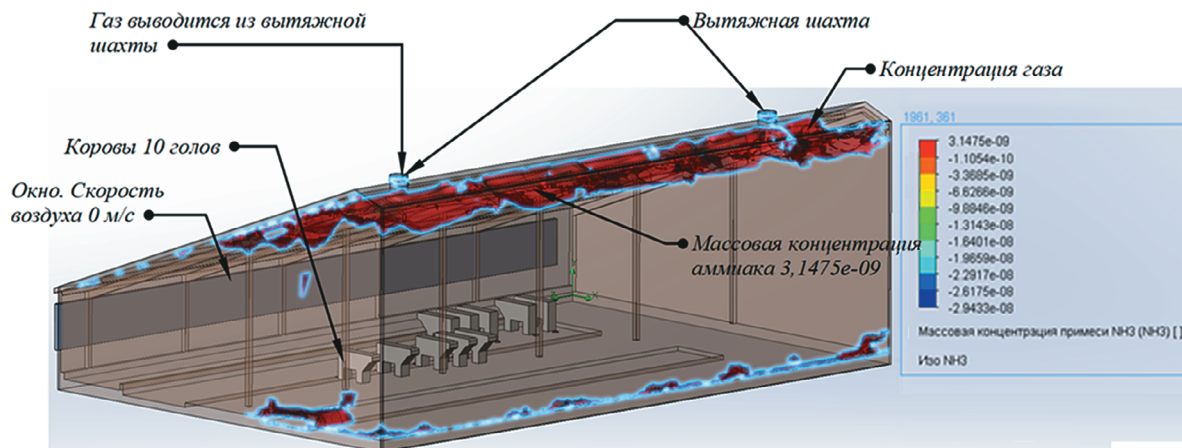


Рис. 6. Параметрическая модель распространения NH_3 50 мг/м³ (скорость воздушного потока – не более 0,3 м/с)

Fig. 6. Parametric model of NH_3 spreading – 50 mg/m³ (air velocity max. 0.3 m/s)

и завихрения «прибивают» газ к полу, где животные отдыхают.

Анализируя модели распространения газа, прослеживаем закономерность: при штиле аммиак и сероводород скапливаются под коньком и выводятся из шахт; при поступлении через окно свежего воздуха со скоростью 2 м/с часть газа выводится из коровника, другая часть распространяется по коровнику и оседает в областях завихрения воздушных потоков.

Следовательно, организовав правильно движение воздушных потоков внутри помещения, можно добиться полного удаления газов из коровника. Также установлено, что наибольшая концентрация аммиака наблюдается в области коньковой зоны.

Параметрическая модель 6. На рисунке 7 изображено облако скопления аммиака. За счет перемещающихся потоков воздуха облако имеет схожие места скопления, но более плотную концентрацию.

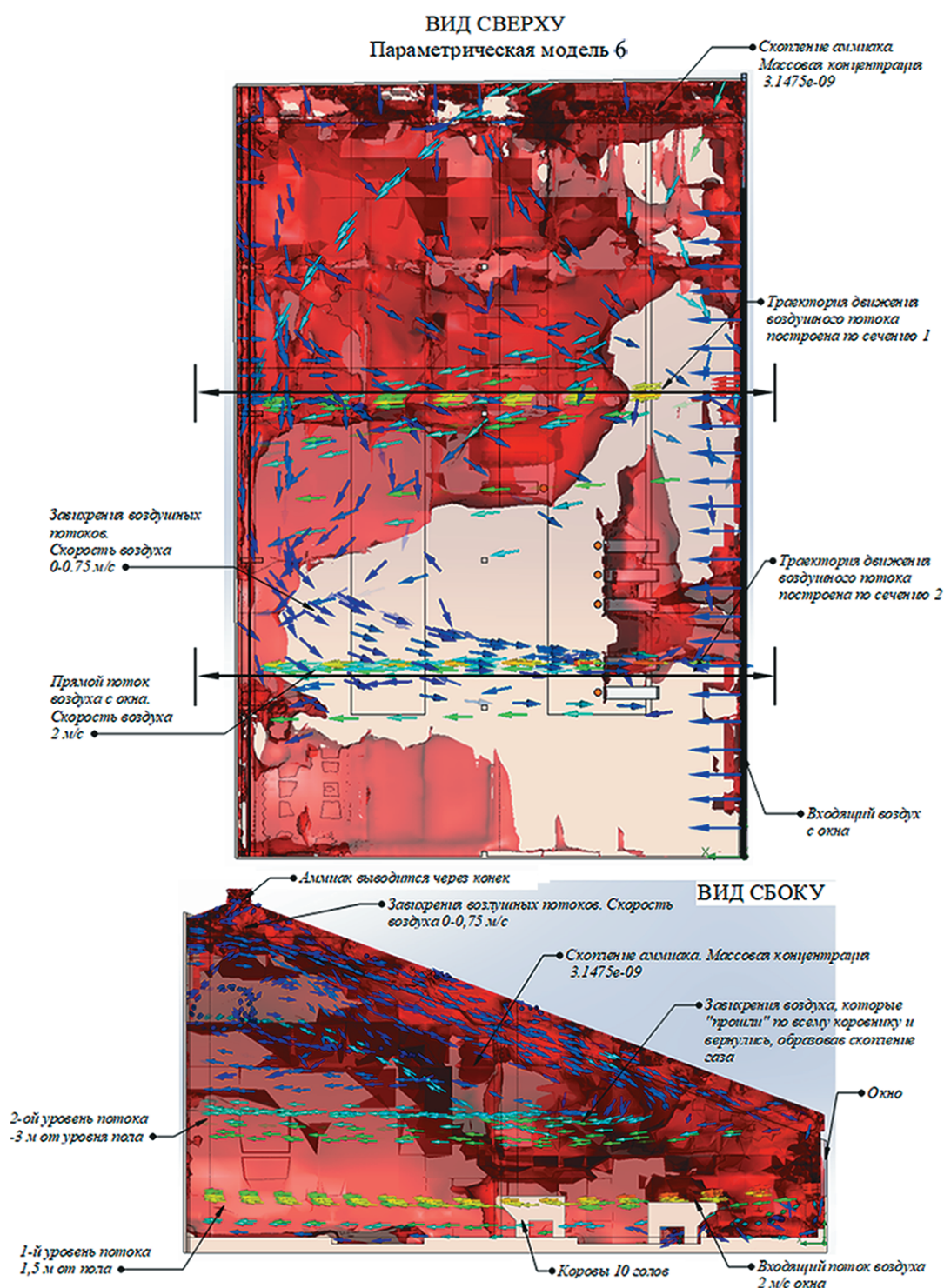


Рис. 7. Параметрическая модель распространения NH_3 50 мг/м³ (скорость воздушного потока – 2 м/с)

Fig. 7. Parametric model of NH_3 spreading – 50 mg/m³ (air velocity – 2 m/s)

Масса аммиака в 2 раза больше массы сероводорода, следовательно, его концентрация в облаке выше. Дополнительно выявлено, что в области отдыха коров аммиака меньше, и он стремится подняться выше.

Согласно данным параметрической модели при скорости в 2 м/с распределение аммиака является довольно обширным по всему помещению. Наибольшая концентрация аммиака наблюдается под крышей.

На следующем этапе исследований будет разработана методика исследования движения воздушных потоков и оценки газового состава воздуха внутри животноводческого помещения.

В дальнейших исследованиях будут смоделированы зимний/осенне-весенний варианты, увеличено число объектов, изменены начальные параметры микроклимата.

Выводы

1. Моделирование позволило определить направление воздушных потоков, обнаружить скопления

и облака газа. Датчики сероводорода и аммиака рекомендуется устанавливать под коньком; датчики углекислого газа, сероводорода и аммиака – в стойле; датчики углекислого газа и сероводорода – у кормового стола. Измерения концентрации необходимо производить на высоте 500, 1500 и 3000 мм.

2. Максимальная концентрация CO_2 выявлена на уровне 0,9 м при скорости воздуха 0 м/с, при скорости 0,75 м/с – на уровне 1,3. Наибольшая концентрация H_2S отмечена при скорости 0 м/с на уровне области, граничащей с коньковым пространством, при скорости 2 м/с – на уровне 2,25 м. Наибольшая концентрация NH_3 при скорости 2 м/с наблюдается под крышей и в области под коньком.

3. При увеличении концентрации выделяемого газа и прочих равных условиях структура облака изменяется незначительно, увеличивается концентрация газа в облаке. Датчики опроса параметров необходимо устанавливать в закрытых продуваемых боксах, как в погодных метеостанциях.

Список использованных источников

1. Довлатов И.М., Юфев Л.Ю. Увеличение живой массы разводимой птицы при очистке воздуха комбинированным рециркулятором // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2020. Т. 67, № 3 (40). С. 124-131. EDN: WRWXXK
2. Kostarev S., Kochetova O., Ivanova A., Sereda T. Project development of a «smart» premise system for pig keeping. *E3S Web of Conferences*. 2021;254:08029. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125408029>
3. Довлатов И.М., Рудзик Э.С. Улучшение микроклимата в сельскохозяйственном помещении за счет обеззараживания воздуха ультрафиолетовым излучением // Инновации в сельском хозяйстве. 2018. № 3 (28). С. 47-52. EDN: YLSZET
4. Leliveld L.M.C., Riva E., Mattachini G., Lovarelli D., Provolo G. Dairy Cow Behavior Is Affected by Period, Time of Day and Housing. *Animals*. 2022;12(4):512. <https://doi.org/10.3390/ani12040512>
5. Довлатов И.М., Юрочка С.С. Разработка энергоэффективной системы микроклимата для беспривязного содержания дойного стада // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15, № 3. С. 73-80. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-3-73-80>
6. Иванов Ю.Г., Кирсанов В.В., Юрочка С.С. Исследования параметров микроклимата в зоостанции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева // Доклады ТСХА. Вып. 291. Ч. V. М.: Издательство РГАУ-МСХА, 2019. С. 115-118. EDN: IFYIGH
7. Assatbayeva G., Issabekova S., Uskenov R., Karymsakov T., Abdrakhmanov T. Influence of microclimate on ketosis, mastitis and diseases of cow reproductive organs. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*. 2022;10(3):2230. <http://dx.doi.org/10.31893/jabb.22030>
8. Lovarelli D., Riva E., Mattachini G., Guarino M., Provolo G. Assessing the effect of barns structures and environmental conditions in dairy cattle farms monitored in Northern Italy. *Journal of Agricultural Engineering*. 2021;52(4):12-29.
9. Мартынова Е.Н., Ястребова Е.А. Особенности микроклимата коровников с естественной системой вентиляции // Ветеринария, зоотехния и биотехнология. 2015. № 6. С. 52-56. EDN: TZUJER

References

1. Dovlatov I.M., Yuferev L.Yu. Increase in live weight of bred poultry during air purification with a combined recirculator. *Electrical engineering and electrical equipment in agriculture*. 2020;67:3:124-131. (In Rus.)
2. Kostarev S., Kochetova O., Ivanova A., Sereda T. Project development of a “smart” premise system for pig keeping. *E3S Web of Conferences*. 2021;254:08029. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125408029>
3. Dovlatov I.M., Rudzik E.S. Improvement of microclimate in agricultural premises due to disinfection of air with ultraviolet radiation. *Innovations in agriculture*. 2018;3:47-52. (In Rus.)
4. Leliveld L.M.C., Riva E., Mattachini G., Lovarelli D., Provolo G. Dairy Cow Behavior Is Affected by Period, Time of Day and Housing. *Animals*. 2022;12(4):512. <https://doi.org/10.3390/ani12040512>
5. Dovlatov I.M., Yurochka S.S. Development of an energy-efficient microclimate system for dairy herd loose keeping. *Agricultural machines and technologies*. 2021;15(3):73-80. (In Rus.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-3-73-80>
6. Ivanov Yu.G., Kirsanov V.V., Yurochka S.S. Studies of indoor climate parameters in the animal research station of Timiryazev Agricultural Academy. *Doklady TSKHA*. 2019;291(V):115-118. (In Rus.)
7. Assatbayeva G., Issabekova S., Uskenov R., Karymsakov T., Abdrakhmanov T. Influence of microclimate on ketosis, mastitis and diseases of cow reproductive organs. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*. 2022;10(3):2230. <http://dx.doi.org/10.31893/jabb.22030>
8. Lovarelli D., Riva E., Mattachini G., Guarino M., Provolo G. Assessing the effect of barns structures and environmental conditions in dairy cattle farms monitored in Northern Italy. *Journal of Agricultural Engineering*. 2021;52(4):12-29.
9. Martynova E.N., Yastrebova E.A. Features climate barns with natural ventilation system. *Veterinary, animal science and biotechnology*. 2015;6:52-56. (In Rus.)
10. Kochetova O.V., Kostarev S.N., Tatarnikova N.A., Sereda T.G. Development of microclimate control system in cattle barns for cattle housing in the Perm region. *IOP Conference Series: Earth*

10. Kochetova O.V., Kostarev S.N., Tatarnikova N.A., Sereida T.G. Development of microclimate control system in cattle barns for cattle housing in the Perm region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;839:032030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/3/032030>

11. Мартынова Е.Н., Ястребова Е.А. Физиологическое состояние коров в зависимости от микроклимата помещений // Достижения науки и техники АПК. 2013. № 8. С. 53-56. EDN: RAVXZX

12. Наливайко А.П. Система регулирования микроклимата на фермах и комплексах КРС // Научно-образовательный потенциал молодежи в решении актуальных проблем XXI века. 2017. № 6. С. 177-180. EDN: YLJLKT

13. Dovlatov I., Yuferev L., Pavkin D. Efficiency Optimization of Indoor Air Disinfection by Radiation Exposure for Poultry Breeding. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020;1072:177-189. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33585-4_18

Вклад авторов

В.В. Кирсанов – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, литературный анализ, обработка результатов исследования.

И.М. Довлатов – обработка результатов исследования, доработка текста и общих выводов.

С.С. Юрочка – литературный анализ, обработка результатов исследования.

И.В. Комков – верстка и формирование работы.

Конфликт интересов

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

Статья поступила в редакцию 29.11.2022; поступила после рецензирования и доработки 29.03.2023; принята к публикации 06.04.2023

and *Environmental Science*. 2021;839:032030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/3/032030>

11. Martynova E.N., Yastrebova E.A. Physiological state of cows depending on house microclimate. *Achievements of science and technology of the agro-industrial complex*. 2013;8:53-56. (In Rus.)

12. Nalivayko A.P. The system of climate control on farms and cattle complexes. *Youth scientific and educational potential in solving actual problems of the XXI century*. 2017;6:177-180. (In Rus.)

13. Dovlatov I., Yuferev L., Pavkin D. Efficiency Optimization of Indoor Air Disinfection by Radiation Exposure for Poultry Breeding. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020;1072:177-189. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33585-4_18

Contribution of the authors

V.V. Kirsanov – research supervision, formulating the main research tasks, literature review, processing research results.

I.M. Dovlatov – processing research results, finalizing the text and making general conclusions.

S.S. Yurochka – literature review, processing the research results.

I.V. Komkov – making the article layout and design

Conflict of interests

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

Received 29.11.2022; revised 29.03.2023; accepted 06.04.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 636.084.74

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-23-29

**Автоматические системы кормления КРС:
опыт эксплуатации и перспективы использования****Станислав Михайлович Михайличенко**, канд. техн. наук, старший научный сотрудникS.M. Mikhailichenko@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2305-2909>

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

Аннотация. Автоматические системы кормления не распространены в России. С целью поиска оптимального решения для реализации проекта по разработке роботизированного кормораздатчика на базе ФГБНУ ФНАЦ ВИМ проведен обзор научных трудов зарубежных ученых, посвященных изучению производственного опыта эксплуатации автоматических систем кормления и оценке их эффективности. Автоматические системы кормления (АСК) по сравнению с традиционной системой кормления на базе мобильных смесителей-раздатчиков кормов имеют ряд преимуществ. АСК позволяют в 2 раза снизить затраты труда на процесс приготовления и раздачу кормосмесей на фермах КРС; повысить точность кормления за счет разделения животных на большее количество технологических групп, получающих разные рационы кормления в зависимости от продуктивности, стадии лактации и т.д.; обеспечить кратность кормления КРС до 6...8 раз в сутки (что благоприятно влияет на его здоровье и молочную продуктивность). Автоматические системы кормления улучшают условия содержания животных и гигиену. Ширина кормового прохода на фермах с АСК почти в 2 раза меньше, чем на фермах с мобильными смесителями-раздатчиками кормов, что позволяет эффективнее использовать площадь коровника. Основным недостатком АСК является их высокая стоимость: в среднем 1230 €/гол. при средней стоимости реализации системы на базе мобильных смесителей-раздатчиков кормов 400 €/гол. В существующих АСК на долю бункеров-накопителей приходится большая часть инвестиционных затрат. Для снижения стоимости предложена концепция автоматической системы кормления на базе роботизированного кормораздатчика, в которой бункер-накопитель используется для промежуточного хранения уже готовых кормосмесей, а его загрузка осуществляется с помощью мобильного смесителя-раздатчика кормов.

Ключевые слова: КРС, кратность кормления, автоматические системы кормления, АСК, затраты труда, энергопотребление

Формат цитирования: Михайличенко С.М. Автоматические системы кормления КРС: опыт эксплуатации и перспективы использования // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 3. С. 23-29. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-23-29>.

© Михайличенко С.М., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Automatic systems for feeding cattle: operating experience and perspective for use**Stanislav M. Mikhailichenko**, CSc (Eng), Senior Research EngineerS.M. Mikhailichenko@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2305-2909>Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5, 1st Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract. Automatic feeding systems are not common in Russia. To find the optimal solution for the development of an automatic feed wagon on the basis of FSAC VIM, the authors made a review of the scientific works of foreign scientists describing the industrial experience of operating automatic feeding systems and evaluating their effectiveness. Automatic feeding systems (AFS) have a number of advantages as compared with the traditional feeding system based on mobile TMR feeder-mixers. AFS can double reduce labor costs of the preparation and distribution of feed mixtures on cattle farms; increase the accuracy of feeding by dividing animals into a larger number of technological groups receiving different feeding rations depending on productivity, lactation stage, etc.; ensure the frequency of feeding cattle up to six to eight times a day (which favorably affects their health and milk productivity). Automatic feeding systems improve animal welfare and hygiene. The feed alley on farms equipped with AFS is almost two times narrower than on farms using mobile TMR mixers, which makes it possible to use

the cowshed area more efficiently. The main disadvantage of AFS is their high cost – on average 1,230 €/head, with an average cost of using a system based on mobile TMR mixers of 400 €/head. In the existing AFS, storage containers account for most of the investment costs. To reduce the cost, the authors put forward the concept of an automatic feeding system based on an automatic feed wagon with a storage container for intermediate storage of ready-made feed mixtures. It can be loaded with a mobile TMR mixer.

Keywords: cattle, feeding frequency, automatic feeding systems, AFS, labor costs, energy costs

For citation: Mikhailichenko S.M. Automatic systems for feeding cattle: operating experience and perspective for use. *Agricultural Engineering* (Moscow), 2023;25(3):23-29. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-23-29>.

Введение. Развитие сельского хозяйства идет по пути автоматизации технологических процессов, что обусловливается требованиями повышения эффективности производства и проблемами нехватки трудовых ресурсов. С начала 90-х гг. на молочных фермах и комплексах активно применяются автоматические системы доения (АСД) или доильные роботы [1]. В последнее время внедрена концепция точного молочного скотоводства, основанная на взаимодействии животных и технологического оборудования посредством специальных датчиков (транспондеров) и программ управления стада [2].

С начала 2000-х гг. разработаны автоматические системы кормления (АСК) различных типов [3], а спустя 5-6 лет они внедрялись на фермы для выдачи полностью (*Total Mixed Ration – TMR*) или частично смешанных рационов (*Partial Mixed Ration – PMR*) [4, 5]. В 2015 г. по всему миру действовало свыше 1250 автоматических систем кормления [6]. Однако в России АСК, в отличие от доильных роботов, не получили широкого распространения. Известны единичные случаи внедрения данных систем в нашей стране: роботы DeLaval RA 135 (КФХ «Лопотов А.Н., Псковская обл.») [7]; система *Jeantil Automatic Feeding* (ЗАО Племенной завод «Ручьи», Ленинградская обл.¹); система *Lely Vector* (ООО «Родниковое Поле», Тульская обл.) [8].

В соответствии с приоритетом научно-технологического развития Российской Федерации, отраженно в Указе Президента РФ от 1 декабря 2016 г. № 642, деятельность научных организаций и субъектов экономики РФ должна обеспечивать переход к передовым цифровым и интеллектуальным производственным технологиям, использованию роботизированных систем в производственных циклах с применением систем обработки больших данных и максимальным уровнем импортозамещения [9, 10]. Очевидно, что при разработке отечественных роботизированных систем для кормления КРС необходимо учитывать

накопленный мировой опыт их эксплуатации, а также результаты исследований, посвященных оценке их эффективности.

Цель исследований: обзор научных трудов зарубежных ученых, посвященных изучению производственного опыта эксплуатации автоматических систем кормления и оценке их эффективности.

Материалы и методы. Основываясь на исследованиях иностранных авторов проведено сравнение традиционной системы кормления на базе мобильных смесителей-раздатчиков кормов (СРК) и автоматических систем кормления (АСК) с точки зрения эффективного использования площадей животноводческих помещений, эффективности кормления, ежедневных затрат труда, уровня капиталовложений в технику для кормления, средней молочной продуктивности и уровня энергопотребления.

Результаты и их обсуждение. Процесс кормления на молочных фермах КРС является наиболее трудоемким после процесса доения, и на его долю приходится примерно 25% от общих трудозатрат по обслуживанию животных [10]. Согласно информации, предоставленной производителями, автоматические системы кормления позволяют существенно снизить рабочую нагрузку, улучшить гигиену и снизить потери кормов.

Для оценки эффективности АСК сравнивались 14 молочных ферм Дании, Германии, Голландии и Швейцарии, на которых численность стада варьировалась в пределах 28...390 коров, средний удой составлял 8...9 тыс. кг/год, кратность кормления – 2...13 раз/сут. (на большинстве ферм – 8 раз/сут.).

На 6 фермах первая раздача кормосмеси осуществлялась в 03:00-05:00, а на 8 фермах – в 06:00-07:00. Последнее кормление приходилось на 17:00-02:00. На 8 фермах последний рацион выдавался в 21:00-22:00. Только на одной ферме кормление осуществлялось на протяжении всей ночи.

В ходе исследований выяснилось, что для фермеров главным поводом для установки АСК являлось снижение трудоемкости (экономия рабочего времени). В старых строениях пространство, высвобожденное в ходе реконструкции, часто служило для увеличения

¹ Дария Харитонова. Автономное кормление // Агровестник. 2016. URL: <https://agrovosti.net/lib/tech/feeding-tech/avtonomnoe-kormlenie.html> (дата обращения: 28.11.2022).

полезно используемой площади, что позволяло размещать в коровниках больше животных [7]. Также среди преимуществ отмечалось снижение затрат на строительство новых коровников в связи с уменьшением требуемой ширины кормового прохода до 2 м. Кроме того, за счет внедрения АСК у персонала появляется выбор при планировании работ. Также повысилась точность кормления стада за счет подразделения его на дополнительные технологические группы в зависимости от продуктивности, стадии лактации и других показателей. Многие управляющие фермами отметили снижение уровня стресса в стаде. По их мнению, животные более низкого ранга стали больше потреблять и дольше пережевывать корма благодаря тому, что раздача осуществлялась несколько раз (как правило, 8 раз/сут.). На некоторых фермах с АСК было зафиксировано увеличение количества доений – предположительно ввиду возросшей двигательной активности стада и более частого посещения животными кормового стола в связи с повышением кратности кормления.

Сравнительный анализ эффективности двух технологий (традиционной системы кормления на базе мобильных смесителей-раздатчиков кормов (СРК) и АСК) проводился с помощью моделирования. За основу выбирались два типоразмера ферм, рассчитанные на содержание 60 и 120 коров. Согласно полученным результатам при использовании АСК затраты труда составили соответственно 50,6 и 65 чел.·мин/сут., а при использовании мобильных СРК – 71,3 и 202,8 чел.·мин/сут. Таким образом, при обслуживании фермы, рассчитанной на содержание 120 коров, использование автоматической системы обеспечивает снижение трудозатрат на 112,5 мин в сутки. Другие ученые в своем исследовании пришли к аналогичному результату: для молочного стада в 150 гол. экономия рабочего времени при использовании АСК составила 100 мин в сутки [11].

Для сравнительной оценки двух систем кормления в Голландии проводилось исследование на 22 молочных фермах (на 12 фермах использовались АСК, на 10 – мобильные СРК) [12]. Сравнительный анализ показал, что средняя численность дойного стада составляла 88,9 гол. на фермах с АСК и 88,2 – на фермах с мобильными СРК. При этом количество коров, приходящихся на одного доильного робота, в среднем составляло соответственно 41,6 и 42,4 гол. На 85% ферм содержались животные голштино-фризской породы со средней молочной продуктивностью 8900 и 8705 кг/год соответственно для ферм с АСК и с мобильными СРК. Максимальная средняя молочная продуктивность (10000 кг/год) наблюдалась на 17% ферм с АСК и 10% ферм с мобильными СРК.

На фермах с мобильными СРК раздача кормосмесей осуществлялась 1...4 раза/сут. (в среднем 1,4) с выполнением операции подравнивания кормов в пределах 1...5 раз/сут. (в среднем 3,5), тогда как на фермах с АСК кормосмеси выдавались 5...11 раз в сутки (в среднем 7,8). Фермеры, использующие АСК, утверждали, что ввиду высокой кратности кормления (раздача осуществлялась в среднем каждые 3,1 ч) снизились остатки несъеденных кормов.

В планировке коровников зафиксировано существенное отличие: ширина кормового прохода на фермах с АСК приблизительно в 2 раза меньше, чем на фермах с мобильными СРК, и в среднем составляла 2715 ± 650 мм против 5353 ± 420 мм. Однако для ферм с АСК требовались дополнительные крытые помещения площадью 45...110 м² для размещения стационарного смесителя и/или бункеров-накопителей для компонентов рационов.

Согласно проведенному опросу наиболее распространенным поводом к установке АСК была необходимость в повышении эффективности труда (24% голосов). Варианты более эффективного использования площадей животноводческих помещений и лучшего взаимодействия между АСК и АСК набрали по 19% среди ответов фермеров. 15% фермеров отметили улучшение эффективности кормления: появилась возможность разделить стадо на большее количество технологических групп животных, получающих разные рационы кормления в зависимости от показателей продуктивности, стадии лактации и т.д.

На фермах с АСК ежедневные затраты труда на процесс кормления (составление рационов, приготовление и раздача кормосмесей, подравнивание кормов) почти в 2 раза меньше затрат на фермах, применяющих мобильные СРК. Однако уровень капиталовложений в технику для кормления на фермах с мобильными СРК в зависимости от их объема и типа (прицепной или самоходный) составлял 160...600 €/гол. (в среднем 400 €/гол.), тогда как на фермах с АСК в зависимости от технической сложности системы и объема сопутствующих строительных работ – 850...1650 €/гол. (в среднем 1230 €/гол.). Таким образом, высокая стоимость АСК является ключевым фактором, препятствующим их активному внедрению на животноводческих комплексах.

Важным преимуществом АСК является возможность выдачи рационов до 15 раз в сутки, что способствует повышению активности животных при кормлении и увеличению уровня потребления сухого вещества, а также позволяет создать для животных более естественные условия содержания [13].

Многочисленные исследования зарубежных ученых посвящены изучению влияния кратности

кормления на поведение животных, показатели их продуктивности и здоровья [14-20]. На практике чаще всего применяется 6- и 8-кратное кормление [21]. Исследования показывают, что раздача кормосмесей один или два раза в сутки приводит к схеме кормления, при которой пик посещения зоны кормления животными приходится на время, следующее сразу за раздачей (рис. 1).

Увеличение кратности кормления, напротив, способствует активному посещению зоны кормового стола животными, что приводит к более равномерной схеме кормления [22, 23], а также к более длительным по времени кормлениям. В результате повышается стабильность уровня рН рубца с достижением соответствующего положительного эффекта для здоровья животных и их продуктивности [24-26]. Кроме того, при повышении кратности кормления сокращается время нахождения кормов на кормовом столе, что в свою очередь ведет к снижению рисков их загрязнения и брожения [27].

Экспериментальное сравнение системы кормления с использованием мобильных СРК и АСК с точки зрения энерго- и трудозатрат проводилось итальянскими учеными на ферме с дойным стадом

в 90 коров (преимущественно голштино-фризской породы). Объем ежедневно выдаваемого рациона в обоих случаях составлял 10 м³.

Средняя молочная продуктивность коров на ферме составляла 8435 кг/гол. в год. Процесс доения осуществлялся доильными роботами фирмы SAC (Дания).

При использовании мобильного СРК объемом 10 м³ с одним вертикальным шнеком кормление осуществлялось один раз в сутки в 07:00. Для его работы использовался трактор мощностью 80 кВт (Same Deutz-Fahr Explorer, Италия), а также телескопический погрузчик мощностью 73 кВт (Manitou MVT, Франция).

При установке на ферме автоматической системы кормления DeLaval Optimat Master (Швеция) загрузка бункеров-накопителей осуществлялась раз в три дня. Для 4-кратного кормления использовался подвесной роботизированный кормораздатчик объемом 3 м³ (рис. 2).

Потребление дизельного топлива определялось путем полного заполнения бака после каждой операции. С учетом его стоимости соответствующие затраты составили 0,765 €/кг. При сравнении двух систем по критерию энергопотребления для дизтоплива

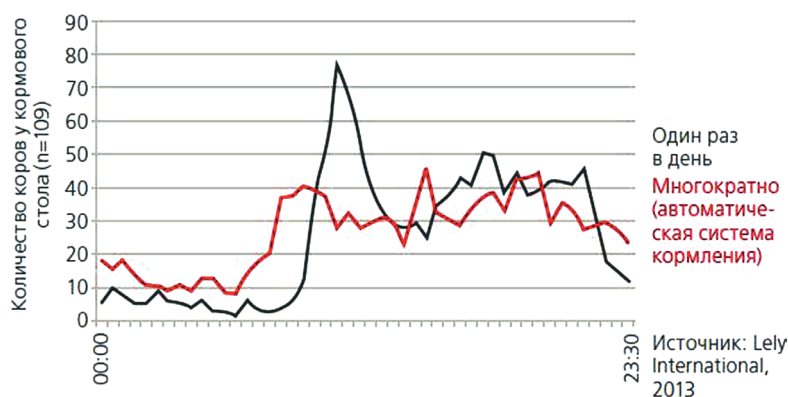


Рис. 1. Характер распределения животных вдоль кормового стола в зависимости от кратности кормления²

Fig. 1. Pattern of placing the animals along the feeding alley, depending on the feeding frequency²



Рис. 2. Состав автоматической системы кормления *DeLaval Optimat Master*: кормовая кухня (слева) и подвесной робот-кормораздатчик (справа) [28]

Fig. 2. Design of the DeLaval Optimat Master automatic feeding system: feeding center (left) and rail-guided feed wagon (right) [28]

² Lely: Веб-сайт. URL: <https://www.lely.com/ru/solutions/feeding/vector/> (дата обращения: 29.11.2022).

была принята удельная теплота сгорания 47,3 МДж/кг. Энергопотребление электродвигателей определялось путем умножения номинальной мощности на время их работы. С учетом тарифа на электроэнергию соответствующие затраты составили 0,18 €/кВт·ч.

Полученные результаты свидетельствуют о существенном снижении трудозатрат при использовании АСК до 1,02 ч/сут. по сравнению с 2,5 ч/сут., необходимых для работы мобильного СРК. Уровень энергопотребления АСК также оказался ниже: 68,05 кВт/сут. по сравнению с 246,64 кВт/сут. при использовании мобильного СРК. В целом энергозатраты, приходящиеся на процесс приготовления и раздачи кормосмесей, при использовании АСК составили 9,11 €/сут., при использовании мобильного СРК – 14,36 €/сут. [28].

Определение уровня энергопотребления автоматической системой кормления Lely Vector и сравнение затрат на процесс приготовления и раздачу кормосмесей данной системой по сравнению с использованием мобильного СРК проводились на молочной ферме в Северной Италии с поголовьем 500 коров голштинно-фризской породы [29]. Все животные доились при помощи роботов-дойеров от компании Lely (Нидерланды). При этом состав стада не изменился и объем кормосмеси остался на прежнем уровне.

Изначально на ферме использовался мобильный СРК Italmix (Италия) объемом 30 м³, оснащенный двумя вертикальными шнеками. Для кормления стада ежедневно за 7 ч готовилось и раздавалось 19000 кг кормосмеси, при этом затрачивалось 143 л, или 117 кг, дизельного топлива в сутки при его плотности 0,820 кг/л. Загрузка компонентов осуществлялась в среднем за 1,5 ч/сут. при помощи телескопического погрузчика. Энергопотребление при использовании мобильного СРК составляло 1387,62 кВт/сут., а затраты – 93,8 €/сут.

После внедрения системы Vector энергопотребление в среднем составляло 40,2 кВт/сут. с соответствующими затратами 9,25 €/сут. (без учета операции транспортирования компонентов рационов в кормовую кухню телескопическим погрузчиком).

Затраты труда при использовании мобильного СРК составляли около 7 ч/сут., что значительно больше 1,5 ч/сут., необходимых для заполнения кормовой кухни системы Vector.

Ежедневные расходы, приходящиеся на процесс приготовления и раздачи кормосмесей, определенные по стандарту ASABE Standard EP496.3, для мобильного СРК составляли 300,9 €/сут., для системы Vector – 202,79 €/сут. (–33%). Данный факт объясняется существенным энергосбережением (–97%) и снижением трудозатрат (–79%).

Энергопотребление автоматических систем кормления может варьироваться в широких пределах

в зависимости от их состава, степени автоматизации, используемой технологии и других факторов [30]. В ходе проведенных опытов на четырех фермах с АСК (на трех фермах использовались подвесные роботизированные кормораздатчики, на четвертой – ленточный) зафиксировано энергопотребление в пределах 8,8...52,6 кВт/сут. (или удельной величины 21,36...83,52 кВт/гол. в год). При этом сделан вывод о том, что при использовании АСК экономия затрат на электроэнергию может составлять до 40 €/гол. в год по сравнению с экономией при применении мобильных СРК.

Обобщая результаты исследований зарубежных ученых, можно сделать вывод о том, что автоматические системы кормления являются перспективным техническим решением для повышения качества процесса приготовления и раздачи кормосмесей на фермах КРС, эффективности производства молока и говядины в целом. В то же время необходимо отметить, что существующие АСК адаптированы для эксплуатации на европейских фермах с невысоким количеством обслуживаемых животных, когда численность стада часто составляет порядка 100 гол. При этом экономический эффект во многом достигается за счет сокращения затрат на оплату труда, которые в европейских странах являются относительно высокими, что оправдывает высокий уровень автоматизации. Например, в Италии на 2018 г. оплата труда механизатора составляла 15 €/ч, или 105 € (7800 руб. в ценах на 2023 г.) за 7-часовую смену [29].

В России ввиду относительно невысокого уровня оплаты труда приобретение данных систем экономически нецелесообразно, поскольку сокращение расходов на выплату заработной платы не покрывает затраты на приобретение и техническое обслуживание АСК.

В связи с вышесказанным первостепенной задачей является снижение стоимости автоматической системы кормления с сохранением функциональных возможностей, присущих более дорогостоящим системам. С этой целью предложена концепция автоматической системы кормления на базе роботизированного кормораздатчика, в которой бункер-накопитель используется для промежуточного хранения уже готовых кормосмесей, а его загрузка осуществляется с помощью мобильного смесителя-раздатчика кормов [31]. Поскольку в существующих АСК на долю бункеров-накопителей приходится большая часть инвестиционных затрат [32], данное решение позволит существенно снизить стоимость системы в целом.

Дальнейшим направлением исследования послужит сравнительный анализ предлагаемой системы и существующих АСК с точки зрения технико-экономической эффективности на примере крупного хозяйства.

Выводы

1. Автоматические системы кормления способствуют снижению трудоемкости кормления КРС и стоимости строительства новых животноводческих помещений, повышению гибкости выполняемых работ и точности кормления стада, снижению уровня стресса среди животных, улучшению гигиены и условий содержания животных, снижению уровня энергозатрат.

2. Автоматические системы кормления способны увеличить кратность кормления до 6...8 раз/сут., что

благоприятно повлияет на физиологические и поведенческие показатели животных.

3. Недостатком автоматических систем кормления является высокая стоимость, что обуславливает меньший экономический эффект от внедрения существующих типов АСК.

4. Для снижения стоимости автоматических систем кормления и возможности их эффективной эксплуатации на отечественных фермах и комплексах по обслуживанию крупного рогатого скота предложено использовать бункер-накопитель для промежуточного хранения готовых кормосмесей.

Список использованных источников / References

1. De Coning C.J.A.M. Automatic milking – common practice on dairy farms. Proc. of the First North American Conf. on Precision Dairy management, Toronto, Canada. 2010.

2. Bewley J. Precision dairy farming: advanced analysis solutions for future profitability. First North American conf. on precision dairy management, Toronto, Canada. 2010.

3. Купреенко А.И., Исаев Х.М., Михайличенко С.М. Автоматические системы кормления на молочных фермах КРС // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 3 (67). С. 32-37. EDN: UQJYLY

Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Mikhailichenko S.M. Automatic feeding systems in dairy farms. *Vestnik Bryanskoy GSKHA = Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy*. 2018;3(67):32-37. (In Rus.)

4. Belle Z., André G., Pompe J.C.A.M. Effect of automatic feeding of total mixed rations on the diurnal visiting pattern of dairy cows to an automatic milking system. *Biosystems Engineering*. 2012;1(111):33-39. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.10.005>

5. Alex Bach, Victor Cabrera. Robotic milking: Feeding strategies and economic returns. *Journal of Dairy Science*. 2017;100(9):7720-7728. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11694>

6. Oberschätzl-Kopp R., Haidn B., Peis R., Reiter K., Bernhardt H. Effects of an automatic feeding system with dynamic feed delivery times on the behaviour of dairy cows. Proc. of CIGR-AgEng Conference, Aarhus, Denmark. 2016. Pp. 1-8.

7. Купреенко А.И., Исаев Х.М., Михайличенко С.М. Эксплуатация автоматического кормового вагона на молочной ферме // Сельский механизатор. 2018. № 6. С. 32-33, 40. EDN: YNJOXZ

Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Mikhailichenko S.M. Operation of an automatic feeder on a dairy farm. *Selskiy Mekhanizator*. 2018;6:32-33, 40. (In Rus.)

8. Купреенко А.И., Исаев Х.М., Михайличенко С.М. Автоматизация приготовления и раздачи кормов на примере ООО «Родниковое поле» // Сб. материалов II Международной научно-практической конференции «Новые информационные технологии в образовании и аграрном секторе экономики»: Брянск. 2019. С. 49-54. EDN: IGNWYN

Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Mikhailichenko S.M. Automating the preparation and distribution of forages: the case of LLC "Rodnikovoye Pole". *Sbornik materialov II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Novye informatsionnye tekhnologii v obrazovanii i agrarnom sektore ekonomiki"*. Bryansk. 2019:49-54. (In Rus.)

9. Дорохов А.С., Никитин Е.А., Павкин Д.Ю. Колесные роботизированные технические средства: опыт и перспективы использования на животноводческих комплексах // Техника

и оборудование для села. 2022. № 4(298). С. 16-21. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-4-16-21>

Dorokhov A.S., Nikitin E.A., Pavkin D.Yu. Wheeled robotic technical tools: experience and prospects of use on livestock farms. *Machinery and equipment for rural area*. 2022;4(298):6-21. (In Rus.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-4-16-21>

10. Никитин Е.А., Дорохов А.С., Павкин Д.Ю. Совершенствование технологии приготовления кормовой смеси при реконструкции кормовых площадок // Техника и оборудование для села. 2019. № 11 (269). С. 32-34. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-11-32-34>

Nikitin E.A., Dorokhov A.S., Pavkin D.Yu. Improving the preparation of feed mixture during the reconstruction of feeding sites. *Machinery and equipment for rural area*. 2019;269(11):32-34. (In Rus.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-11-32-34>

11. Bisaglia C., Pirlo G., Capelletti M. A simulated comparison between investment and labour requirements for a conventional mixer feeder wagon and an automated total mixed ration system. *AgEng'008 – International Conference on Agricultural Engineering & Industry Exhibition*, Hersonissos, Crete. 2008.

12. Bisaglia C., Belle Z., Van den Berg G., Pompe J.C.A.M. Automatic vs. conventional feeding systems in robotic milking dairy farms: a survey in The Netherlands. *Proc. International Conference of Agricultural Engineering CIGR-AgEng*, Valencia, Spain. 2012. Pp. 100-104.

13. Bisaglia C., Nydegger F., Grothmann A., Pompe J.C.A.M. Automatic and frequency-programmable systems for feeding TMR: state of the art and available technologies. *XVII World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering CIGR*, Quebec, Canada. 2010.

14. Bava L., Tamburini A., Penati C., Riva E., Mattachini G., Provolo G., Sandrucci A. Effects of feeding frequency and environmental conditions on dry matter intake, milk yield and behaviour of dairy cows milked in conventional or automatic milking systems. *Italian Journal of Animal Science*. 2012;3(11):e42. <https://doi.org/10.4081/ijas.2012.e42>

15. Crossley R.E., Harlander-Mataushek A., DeVries T.J. Mitigation of variability between competitively fed dairy cows through increased feed delivery frequency. *Journal of Dairy Science*. 2018;101(1):518-529. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12930>

16. Hart K.D., McBride B.W., Duffield T.F., DeVries T.J. Effect of frequency of feed delivery on the behavior and productivity of lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2014;97(3):1713-1724. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7504>

17. Mattachini G., Pompe J., Finzi A., Tullo E., Riva E., Provolo G. Effects of feeding frequency on the lying behavior of dairy cows in a loose housing with automatic feeding and milking system. *Animals*. 2019;9(4):121. <https://doi.org/10.3390/ani9040121>

18. Silva Dias M.S., Ghizzi L.G., Marques J.A., Nunes A.T., Grigoletto N.T.S., Gheller L.S., Silva T.B.P., Silva G.G., Lobato D.N., Costa e Silva L.F., Rennó F.P. Effects of organic acids in total mixed ration and feeding frequency on productive performance of dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2021;104(5):5405-5416. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19419>
19. Niu M., Ying Y., Bartell P.A., Harvatine K.J. The effects of feeding time on milk production, total-tract digestibility, and daily rhythms of feeding behavior and plasma metabolites and hormones in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2014;97(12):7764-7776. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8261>
20. Oberschätzl-Kopp R., Haidn B., Peis R., Reiter K., Bernhardt H. Studies on dairy cow behaviour with automatic feeding in a herd milked by an AMS. *Landtechnik*. 2016;2(71):55-65. <https://doi.org/10.1515/lt.2016.3122>
21. Grothmann A., Moser L., Nydegger F., Steiner A., Zähler M. Influence of different feeding frequencies on the rumination and lying behaviour of dairy cows. In: *Proceedings International Conference of Agricultural Engineering, Zurich*. 2014. Pp. 1-6.
22. Oostra H.H., Stefanowska J., Sällvik K. The effects of feeding frequency on waiting time, milking frequency, cubicle and feeding fence utilization for cows in an automatic milking systems. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A – Animal Science*. 2005;55(4):158-165. <https://doi.org/10.1080/09064700500488985>
23. Riva E., Mattachini G., Bava L., Sandrucci A., Tamburini A., Provolo G. Influence of feed delivery frequency on behavioural activity of dairy cows in freestall barns. *Journal of Agricultural Engineering*. 2013; XLIV(2s): e39. <https://doi.org/10.4081/jae.2013.281>
24. DeVries T., von Keyserlingk M., Beauchemin K. Frequency of feed delivery affects the behavior of lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2005;88(10):3553-3562. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)73040-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)73040-X)
25. Mäntysaari P., Khalili H., Sariola J. Effect of feeding frequency of a total mixed ration on the performance of high-yielding dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2006;89(11):4312-4320. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72478-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72478-X)
26. Mattachini G., Riva E., Pompe J.C.A.M., Provolo G. Automatic monitoring of cow behaviour to assess the effects of variations in feeding delivery frequency. In: *7th European Conference on Precision livestock farming – Precision Livestock Farming '15*, Milan, Italy, 2015:473-481. <https://edepot.wur.nl/368325>
27. Wagner-Storch A.M., Palmer R.W. Feeding behavior, milking behavior and milk yields of cows milked in a parlor versus an automatic milking system. *Journal of Dairy Science*. 2003;86(4):1494-1502. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73735-7](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73735-7)
28. Pezzuolo A., Chiumenti A., Sartori L., Da Borso F. Automatic feeding systems: evaluation of energy consumption and labour requirement in north-east Italy dairy farm. *Engineering for Rural Development*. 2016;15:882-887.
29. Tangorra F.M., Calcante A. Energy consumption and technical-economic analysis of an automatic feeding system for dairy farms: Results from a field test. *Journal of Agricultural Engineering*. 2018;49(4):228-232. <https://doi.org/10.4081/jae.2018.869>
30. Oberschätzl R., Haidn B., Neiber J., Nesper S. Automatic feeding systems for cattle – a study of the energy consumption of the techniques. *Proc. of XXXVI CIOSTA CIGR V Conference*, Saint Petersburg, 2015, pp. 1-9.
31. Купреенко А.И., Исаев Х.М., Михайличенко С.М. Технологическая линия приготовления и раздачи кормосмесей на базе автоматического кормового вагона // *Сельский механизатор*. 2020. № 1. С. 14-15.
- Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Mikhaylichenko S.M. Production line for preparation and distribution of total mixed rations based on the use of an automatic feed wagon. *Selskiy mekhanizator*. 2020;1:14-15. (In Rus.)
32. Grothmann A., Nydegger F., Häußermann A., Hartung E. Automatic feeding system (AFS) – potential for optimisation in dairy farming. *Landtechnik*. 2010;65(2):129-131.

Автор несет ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 06.12.2022; поступила после рецензирования и доработки 17.01.2023; принята к публикации 23.01.2023

The author bears responsibility for plagiarism.

Received 06.12.2022; revised 17.01.2023; accepted 23.01.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.319.06

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-30-34



Обработка почвы и посев зерновых культур на склоновых полях

Николай Васильевич Алдошин✉, д-р техн. наук, профессор¹aldoshin@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>; Scopus Autor ID: 5719413129; Researcher ID: AAD-6548-2022**Фармон Муртозевич Маматов**, д-р техн. наук, профессор²fmamatov_50@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8916-4225>**Ибрагим Ильхомович Исмаилов**, канд. техн. наук, доцент²ismailov.ibrat85@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0681-9071>**Рустам Хужахмат Угли Тавашиев**, канд. техн. наук²<https://orcid.org/0000-0002-7266-7387>**Александр Сергеевич Васильев**, канд. с.-х. наук, доцент¹vasilevtgsha@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0936-2011>; Scopus Autor ID: 57204957260; Researcher ID: Q-2092-2017¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49² Каршинский инженерно-экономический институт; 180100, Узбекистан, Кашкадарьинская область, Карши, пр-т. Мустакиллик, 225

Аннотация. Деградация почв за счет водной эрозии, сопровождаемая потерей плодородия, приводит к снижению урожайности зерновых культур. Для предотвращения водной эрозии на склоновых полях во время проведения обработки почвы и посева зерновых культур предложены технология и комбинированное орудие. Агрегат осуществляет обработку почвы и полосовой посев с образованием мини-террас, ширина которых обусловлена установкой бороздообразователей на расстоянии друг от друга, соответствующем ширине посева 6 рядков семян. Комбинированные сошники осуществляют посев зерновых культур в двух рядках на поверхности почвы, в трех рядках – на глубину 6...8 см, в последнем рядке – на глубину 14...15 см. Бороздообразователи формируют противозерозионные бороздки глубиной до 9 см над рядками с семенами, высеванными на глубину 14...15 см, и образуют гребни над семенами, посеянными на поверхности. Гребни и бороздки предотвращают процессы водной эрозии на посевах склоновых полей. Гребнеобразователь устанавливается под углом 30...33° к направлению движения агрегата. Расстояние между рыхлительными лапами первого и второго рядов составляет не менее 45 см, а между рыхлительной лапой и гребнеобразователем – не менее 90 см. Предлагаемая технология и разработанное комбинированное орудие позволяют снизить прямые затраты энергии на обработку почвы и посев зерновых культур на 32%.

Ключевые слова: посев зерновых культур, комбинированное орудие для обработки почвы и посева, склоновые поля, водная эрозия

Формат цитирования: Алдошин Н.В., Маматов Ф.М., Исмаилов И.И., Тавашиев Р.Х.У., Васильев А.С. Обработка почвы и посев зерновых культур на склоновых полях // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 3. С. 30-34. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-30-34>.

© Алдошин Н.В., Маматов Ф.М., Исмаилов И.И., Тавашиев Р.Х.У., Васильев А.С., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Soil tillage and crop sowing in slope fields

Nikolay V. Aldoshin✉, DSc (Eng), Professor¹aldoshin@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>; Scopus Autor ID: 5719413129; Researcher ID: AAD-6548-2022**Farmon M. Mamatov**, DSc (Eng), Professor²fmamatov_50@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8916-4225>**Ibrat I. Ismailov**, CSc (Eng), Associate Professor²ismailov.ibrat85@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0681-9071>

Rustam Kh. Ugli Tavashov, DSc (Eng)²

<https://orcid.org/0000-0002-7266-7387>

Aleksandr S. Vasiliev, CSc (Ag), Associate Professor¹

vasilevtgsha@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0936-2011>; Scopus Autor ID: 57204957260; Researcher ID: Q-2092-2017

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

² Karshi Engineering Economics Institute; 225, av. Mustakillik, Karshi, Kashkadarya region, 180100, Republic of Uzbekistan

Abstract. Soil degradation due to water erosion accompanied by the loss of fertility results in reduced grain crop yields. To prevent water erosion on sloping fields during soil tillage and the sowing of grain crops, the authors offer an appropriate technology and a combined tool. The combine tool implements tillage and strip sowing by forming mini-terraces. Their width is determined by the installation of furrow formers at a distance from each other, which corresponds to the sowing width of six seed rows. Combined coulters sow cereals in two rows on the soil surface, in three rows – to a depth of 6 to 8 cm, in the last row – to a depth of 14 to 15 cm. Furrow shapers form anti-erosion furrows to a depth of 9 cm over the rows with seeds, sown to a depth of 14 to 15 cm and form ridges over the seeds sown on the surface. Ridges and furrows prevent water erosion on the slope crop fields. The ridge former is installed at an angle of 30 to 33° to the travel direction of the machine. The distance between ripper tines of the first and second rows shall be not less than 45 cm, and between cultivator teeth and the ridge former is not less than 90 cm. The proposed technology and the developed combined tool can reduce the direct energy consumption for tillage and the sowing of grain crops by 32%.

Keywords: sowing of cereal crops, combined tool for tillage and sowing, slope fields, water erosion

For citation: Aldoshin N.V., Mamatov F.M., Ismailov I.I., Tavashov R.Kh., Vasiliev A.S. Soil tillage and crop sowing in slope fields. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(3):30-34. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-30-34>.

Введение. За последние два века около 2 млрд га земель в мире утратили плодородные свойства. В настоящее время площадь всех распахиваемых территорий составляет 1,5 млрд га. Потеря плодородия ведет к снижению урожайности, наносит ущерб экономике, урон экологической обстановке и вызывает изменение климата нашей планеты. Причиной потери плодородия является ветровая и водная эрозия почв естественного и антропогенного характера [1, 2].

Деградация земель сельскохозяйственного назначения зависит от климата, растительного покрова, рельефа и геологии, характера использования земли [3, 4].

Рельеф – один из основных факторов, влияющих на степень деградации земель. Водная эрозия почв чаще наблюдается в рельефной местности, где верхний плодородный слой земли смывается талыми или ливневыми водами, что приводит к образованию вымоин и оврагов. В этом случае водная эрозия почв прямо зависит от выравнинности поля [5, 6]. Уклон местности в 2...4 град. увеличивает смыв полезных веществ почти в 2 раза по сравнению с ровной поверхностью. Рост уклона с 4 до 8 град. увеличивает смыв в 7,2 раза. Повышает риск смыва почвенного слоя и длина склона. Достаточно удвоить линию стока с 50 до 100 м, чтобы смылось в 3...3,7 раза больше гумуса. Слабосмытые почвы недодают 10...30%

урожая, среднесмытые – 30...50%, сильносмытые – 50...70% [7, 8]. Последствия водной эрозии представлены на рисунке 1.

В России деградации почв за счет водной эрозии подвержены около 36,5 млн га. Пашня из них



Рис. 1. Склоновые поля, подверженные водной эрозии

Fig. 1. Slope fields subject to water erosion

¹ Щитов С.В., Кузнецов Е.Е., Поликутина Е.С., Кузнецов О.А. Повышение продольно-поперечной устойчивости и снижение техногенного воздействия на почву колесных мобильных энергетических средств: Монография. Благовещенск: Изд-во ДальГАУ, 2020. 142 с. EDN: SRJMTL.

составляет 24,7 млн га. Эрозионные процессы вызываются таянием снегов и ливнями² [9].

Разрушительным процессам подвержены почвенные покровы и в других странах. Так, пострадали территории Канады, Китая, Австралии. Не избежали потерь африканские, европейские и азиатские страны. В течение 300 лет пустыня Сахара расширилась на 400 км на юг. В Соединенных Штатах Америки к середине прошлого века деградация затронула 40 млн га пашни. В настоящее время повреждено или полностью уничтожено до 115 млн га пахотных земель. Разной степени эрозии подвержены 313 млн га.

Цель исследований: предотвращение процессов водной эрозии посевов зерновых культур путем создания машин для работы на склонах.

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи разработаны технология и комбинированное орудие для посева зерновых культур на гребнях в условиях водной эрозии на склоновых почвах, способствующих снижению энергоемкости технологических процессов и предотвращению водной эрозии [10-12].

Технологию посева зерновых культур на склоновых полях осуществляют полосовыми мини-террасами, ширина которых обусловлена установкой бороздообразователей на расстоянии друг от друга, соответствующем ширине посева 6 рядков семян (рис. 2). Посев производят последовательно на трех уровнях: первые три рядка – на глубину 6...8 см (рис. 2, поз. 2), затем два рядка – на поверхности поля (поз. 1),

а последний ряд – на глубину 14...15 см (рис. 3, поз. 4). Бороздообразователи формируют бороздки глубиной 1...9 см над рядками 4 и образуют гребни 5 над двумя рядками 1 с семенами, высеванными на поверхности почвы (рис. 3). Гребни и бороздки предотвращают процессы водной эрозии на посевах склоновых полей.

Результаты и их обсуждение. В целях реализации рассматриваемой технологии предложено комбинированное орудие для обработки почвы и посева (рис. 4).

Комбинированное орудие состоит из рамы 1, емкости для семян 2, высевывающих аппаратов 3, передних комбинированных сошников 4 и 6 соответственно для высева семян на поверхность поля 5 и на глубину 7 ($a_2 = 6...8$ см), комбинированных сошников второго ряда 8, 9 и 10 соответственно для высева семян на поверхность поля 5, на глубину 7 ($a_2 = 6...8$ см) и глубину 11 (14...15 см). При этом за комбинированными сошниками 10, высевывающими рядки семян на глубину 14...15 см, установлены бороздообразователи 12, обеспечивающие формирование гребней над двумя рядками семян, высеванных на поверхности поля [8]. Бороздообразователи 12 установлены друг от друга на расстоянии B_m , соответствующем ширине 6 междурядий рядков высеванных семян. Комбинированные сошники установлены на расстояниях b_p друг от друга, а смежные сошники – в каждом ряду на расстоянии $2b_p$. Комбинированные сошники 4, 6, 8, 9 и 10 выполнены долотообразными с рыхлящими ножами 13. Нижняя кромка бороздообразователя 12

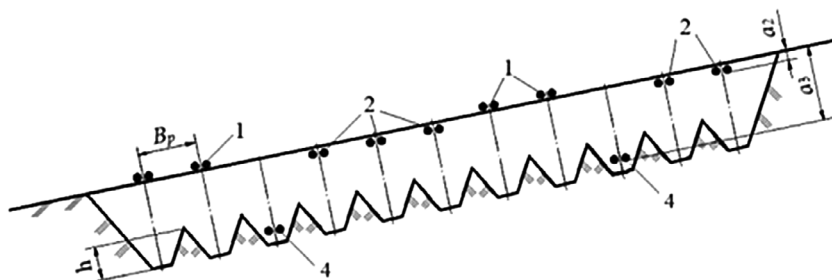


Рис. 2. Профиль поперечного сечения поля после посева семян на трех уровнях

Fig. 2. Cross-sectional profile of the field after sowing seeds on three levels

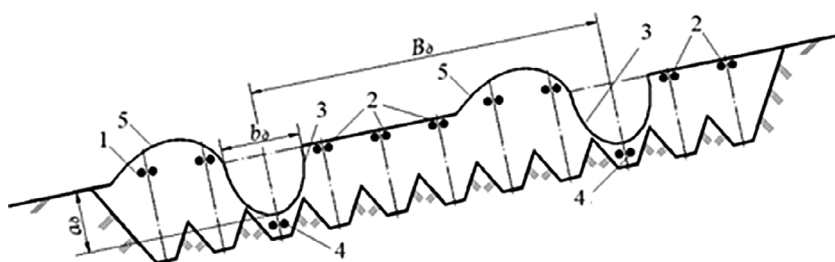


Рис. 3. Профиль поперечного сечения поля после прохода посевного орудия

Fig. 3. Profile of the field cross-section after the passage of the sowing tool

² Кузнецов Е.Е., Щитов С.В. Повышение эффективности использования мобильных энергетических средств в технологии возделывания сельскохозяйственных культур: Монография. Благовещенск: ДальГАУ, 2017. 200 с. EDN: XONHXY.

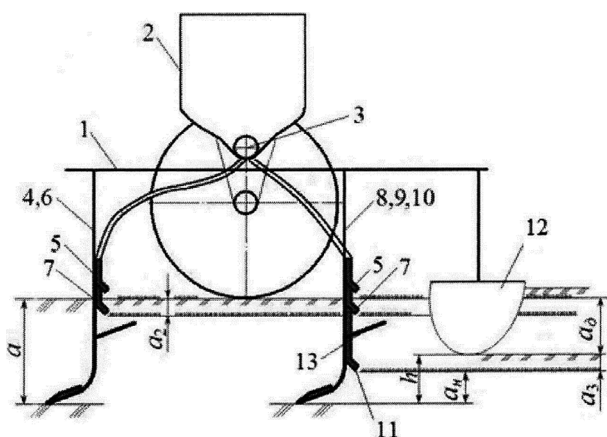


Рис. 4. Схема орудия для обработки почвы и посева зерновых культур на склоновых полях

Fig. 4. Scheme of the tool for tillage and sowing of grain crops on slope fields

установлена на глубину a_2 , что выше заделки семян соответствующих рядков: $a_3 = 6 \dots 8$ см.

Комбинированное орудие для обработки почвы и посева работает следующим образом. Комбинированные сошники 4 и 8 осуществляют посев семян на поверхности почвы; 6 и 9 – на глубину $a_2 = 6 \dots 8$ см; 10 – на глубину 14...15 см. Бороздообразователи 12 формируют бороздки над рядками семян, высеванных на глубину 14...15 см. Бороздообразователи 12, формируя противоэрозионные бороздки, присыпают почвой семена, посеянные на поверхности поля, и образуют над ними гребни. Гребни и бороздки предотвращают процессы водной эрозии на посевах на склоновых полях.

Испытания машины успешно прошли в предгорных районах Республики Узбекистан. Агрегат на базе комбинированного орудия в работе представлен на рисунке 5.

Машина оборудована двумя рядами рыхлительных лап с ножами, сошниками, расположенными на разной высоте, а также гребнеобразователями в виде полудисков. Гребнеобразователь устанавливается под углом $30 \dots 33^\circ$ к направлению движения. Расстояние между рыхлительными лапами первого и второго рядов составляет не менее 45 см, а между рыхлительной лапой и гребнеобразователем – не менее 90 см (рис. 5). Вид поля после прохода агрегата показан на рисунке 6.

Список использованных источников

1. Umurzakov U., Mamatov F., Aldoshin N., Mirzaev B. Exploration of tillage technologies in the Republic of Uzbekistan. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020;614:012168. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/614/1/012168>
2. Шорина И.В., Макарычев С.В. Особенности водного режима на склоновых землях и пути его регулирования // Вестник Алтайского государственного



Рис. 5. Комбинированное орудие для обработки почвы и посева, работающее на склоновом поле

Fig. 5. Combined tool for tillage and sowing, operating on a slope field



Рис. 6. Вид обработанного участка поля после прохода агрегата

Fig. 6. View of the cultivated field area after the passage of the unit

Предлагаемые технология и комбинированное орудие позволяют снизить прямые затраты энергии на обработку почвы и посев зерновых культур на 32%.

Выводы

Предлагаемые технология и комбинированное орудие для обработки почвы и посева зерновых культур на склоновых полях позволяют предотвратить процессы водной эрозии при снижении энергоёмкости выполняемых технологических процессов на 32%.

References

1. Umurzakov U., Mamatov F., Aldoshin N., Mirzaev B. Exploration of tillage technologies in the Republic of Uzbekistan. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020;614:012168. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/614/1/012168>
2. Shorina I.V., Makarychev S.V. Features of the water regime on slope lands and ways of its regulation. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2020;9:48-54. (In Rus.)

аграрного университета. 2020. № 9 (191). С. 48-54. EDN: KNGEBZ.

3. Аушев М.К., Плиева А.А. Обзор основных методов борьбы с водной эрозией на склоновых землях // Известия Дагестанского ГАУ. 2021. № 2 (10). С. 62-67. EDN: RJXLJZ.

4. Джибилов С.М., Гулуева Л.Р., Солдатова И.Э., Хохоева Н.Т., Гагиева С.С. Совершенствование средств механизации и агротехнологий в горных и предгорных районах Северного Кавказа // Аграрный вестник Урала. 2019. Т. 189, № 10. С. 9-16. https://doi.org/10.32417/article_5db43060bb87e6.86550212

5. Васильев С.А., Лопоткин А.М., Васильев А.А. Обоснование и выбор конструктивно-технологических параметров активной борона для контурной обработки почвы склоновых земель // Вестник НГИЭИ. 2019. № 6 (97). С. 106-116. EDN: EEZMGL.

6. Магомедов Н.Н., Магомедов Н.Р., Абдуллаев Ж.Н., Абдуллаев А.А., Тамазаев Т.И. Влияние способов обработки на формирование урожайности озимой пшеницы на склоновых землях // Горное сельское хозяйство. 2019. № 3. С. 61-63. <https://doi.org/10.25691/GSH.2019.3.010>

7. Тарчоков Х.Ш., Чочаев М.М., Кушхабиев А.З., Шогенов А.Х., Гажева Р.А. Противоэрозионная эффективность способов посева на склоновых землях Кабардино-Балкарской Республики // Вестник АПК Ставрополя. 2019. № 3 (35). С. 66-72. EDN: DVFEKK.

8. Алдошин Н.В., Васильев А.С., Голубев В.В. Модернизация сеялки для посева зерновых колосовых культур // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2022. № 31 (194). С. 82-92. EDN: NAYPLJ.

9. Шуравин А.А., Пономарев Н.В., Беляков Д.В., Панова Е.В., Кузнецов Е.Е., Щитов С.В. К вопросу стабилизации ходовой системы и повышения устойчивости против опрокидывания колесного энергетического средства // Дальневосточный аграрный вестник. 2022. Т. 16, № 4. С. 144-150. https://doi.org/10.22450/199996837_2022_4_144

10. Способ посева зерновых культур на склоновых полях: Патент RU2769724 C1 / Н.В. Алдошин, Ф.М. Маматов, И.И. Исмаилов, С.Ф. Маматов, Р.Х. Тавашов, Х.Т. Махамов. МПК A01C 7/00 (2006.01), заяв. № 2021119478 от 02.07.2021. EDN: EAOOSN.

11. Комбинированное посевное орудие для склоновых полей: Патент RU207802 U1 / Н.В. Алдошин, Ф.М. Маматов, И.И. Исмаилов, С.Ф. Маматов, Р.Х. Тавашов, Х.Т. Махамов. МПК A01C 7/00 (2006.01), заяв. № 2021119480 от 02.07.2021. EDN: OWYYUH.

12. Алдошин Н.В., Васильев А.С., Голубев В.В. Результаты лабораторных исследований комбинированного сошника для посева кормовых культур // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2020. № 23 (186). С. 111-122. EDN: UVJEQL.

Вклад авторов

Н.В. Алдошин – формулирование основной концепции исследования. Ф.М. Маматов – разработка методологии исследования. И.И. Исмаилов – табличное и графическое представление результатов, описание результатов и формирование выводов исследования. Р.Х. Тавашов – подготовка начального варианта текста, формирование выводов, анализ литературы, патентный анализ. А.С. Васильев – описание результатов и формирование выводов исследования, анализ литературы. Авторы предложили технологию, изготовили опытный образец орудия и выполнили экспериментальные исследования, на основании полученных результатов подготовили рукопись.

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. Aushev M.K., Plieva A.A. Overview of the main methods of water erosion control on slope fields. *Izvestiya Dagestanskogo GAU*. 2021;2:62-67. (In Rus.)

4. Dzhibilov S.M., Gulueva L.R., Soldatova I.E., Khokhoeva N.T., Gagieva S.S. Improvement of mechanization and agricultural technologies in the mountainous and foothill regions of the North Caucasus. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2019;10:9-16. (In Rus.) https://doi.org/10.32417/article_5db43060bb87e6.86550212

5. Vasilev S.A., Lopotkin A.M., Vasilev A.A. The rationale for the choice of constructive-technological parameters of the active harrows for contour tillage of sloping land. *Bulletin NGIEI*. 2019;6:106-116. (In Rus.)

6. Magomedov N.N., Magomedov N.R., Abdullaev Zh.N., Abdullaev A.A., Tamazaev T.I. Influence of processing methods on yield formation winter wheat on slope lands. *Gornoe selskoe khozyaystvo*. 2019;3:61-63. (In Rus.) <https://doi.org/10.25691/GSH.2019.3.010>

7. Tarchokov Kh.Sh., Chochaev M.M., Kushkhabiev A.Z., Shogenov A.Kh., Gazheva R.A. Anti-erosion efficiency of sowing methods on the slope lands of the Kabardino-Balkar Republic. *Agricultural Bulletin of Stavropol Region*. 2019;3:66-72. (In Rus.)

8. Aldoshin N.V., Vasilev A.S., Golubev V.V. Modernization of the seeder for sowing grain crops. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2022;31:82-92. (In Rus.)

9. Shuravin A.A., Ponomarev N.V., Belyakov D.V., Panova E.V., Kuznetsov E.E., Shitov S.V. On the issue of the running system stabilizing and the stability increasing against rollover of a wheeled power vehicle. *Dalnevostochniy agrarniy vestnik = Far Eastern Agrarian Bulletin*. 2022;16(4):144-150. (In Rus.) https://doi.org/10.22450/199996837_2022_4_144

10. Aldoshin N.V., Mamatov F.M., Ismailov I.I., Mamatov S.F., Tavashov R.Kh., Makhamov Kh.T. Method of sowing cereals on slope fields: Patent RF No. 2769724. МПК A01S7/00 (2006.01), No. 2021119478, 2022. (In Rus.)

11. Aldoshin N.V., Mamatov F.M., Ismailov I.I., Mamatov S.F., Tavashov R.Kh., Makhamov Kh.T. Combined seeding tool for operating on slope fields: Patent RF No. 207802. МПК A01S7/00 (2006.01), No. 2021119480, 2021. (In Rus.)

12. Aldoshin N.V., Vasilev A.S., Golubev V.V. Results of laboratory studies of the combined coulter for sowing forage crops. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2020;23(186):111-122. (In Rus.)

Contribution of the authors

N.V. Aldoshin – formulation of the basic research concept. F.M. Mamatov – development of the research methodology. I.I. Ismailov – tabular and graphical presentation of the results, description of the results and formation of the conclusions of the study. R.Kh. Tavashov – writing the initial version of the text, forming conclusions, literature review, and patent analysis. A.S. Vasiliev – description of the study results and formulation of the conclusions, literature review. The authors proposed the technology, produced a prototype of the tool and carried out experimental research, and prepared a manuscript based on the results.

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

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.354.2

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-35-40

**Сепарация очесанного зернового вороха
на решетчатом днище наклонной камеры комбайна****Виктор Николаевич Ожерельев**, д-р с.-х. наук, профессорvicoz@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2121-3481>**Виктор Васильевич Никитин**✉, д-р техн. наук, доцентviktor.nike@yandex.ru✉; <https://orcid.org/0000-0003-1393-2731>

Брянский государственный аграрный университет; 243365, Российская Федерация, Брянская обл., Выгоничский р-он, с. Кокино, ул. Советская, 26

Аннотация. Используя решетчатое днище наклонной камеры и направляя зерновой ворох на очистку, минуя молотильный аппарат, можно уменьшить энергоемкость уборочного процесса и снизить степень дробления зерна. Целью исследований являлось сопоставление двух вариантов исполнения решетчатого днища наклонной камеры комбайна: с продольными отверстиями конечной длины и поперечными перемычками между ними и при сплошных отверстиях без поперечных перемычек. Для предварительной оценки предложена теоретическая модель процесса сепарации, предполагающая соскальзывание слоев очесанного вороха, перемещаемого скребком транспортера, в отверстие под углом естественного откоса. Ранее предполагалось, что при контакте с поперечной перемычкой процесс соскальзывания соответствующего слоя вороха полностью прекращается и возобновляется только после преодоления кромки очередного отверстия, вследствие чего должна существенно уменьшаться скорость сепарации. В модернизированном варианте модели учтено действие на компоненты верхнего яруса соскальзывающего слоя вороха силы инерции, активизируемой силой трения по перемычке его нижней части. В результате суммарного воздействия скатывающей силы и силы инерции направление движения компонентов верхнего яруса слоя изменяется до близкого к горизонтальному, вследствие чего 50...60% объема рассматриваемого слоя без остановки соскальзывает в очередное отверстие. Согласно теоретической модели сепарация очесанного зернового вороха должна уменьшаться на 4...5% при наличии перемычек между продольными отверстиями длиной 120 мм и общей длине сепарирующей части решетчатой поверхности 800 мм. В результате лабораторного эксперимента на очесанном ворохе пшеницы сорта Московская 56 сепарация очесанного зернового вороха при наличии поперечных перемычек уменьшилась на 4,6%, что подтвердило адекватность теоретической гипотезы.

Ключевые слова: сепарация очесанного зернового вороха, интенсивность сепарации, днище наклонной камеры комбайна, сепарирующая поверхность, сила инерции

Формат цитирования: Ожерельев В.Н., Никитин В.В. Сепарация очесанного зернового вороха на решетчатом днище наклонной камеры комбайна // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 3. С. 35-40. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-35-40>.

© Ожерельев В.Н., Никитин В.В., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Grain heap separation at the grates of a combine feederhouse**Viktor N. Ozherelev**, DSc (Ag), Professorvicoz@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2121-3481>**Viktor V. Nikitin**✉, DSc (Eng), Associate Professorviktor.nike@yandex.ru✉; <https://orcid.org/0000-0003-1393-2731>

Bryansk State Agrarian University; 2b Sovetskaya Str., Kokino, Vygonichi district, Bryansk region, 243365, Russian Federation

Abstract. Using the grates of a combine feederhouse and directing the grain heap for cleaning, bypassing the threshing unit, we can reduce both the energy intensity of harvesting and the degree of grain crushing. The study purpose is to compare two variants of the combine feederhouse grates: with longitudinal holes of a finite length and transverse bars between them and with through holes without transverse bars. For a preliminary assessment,

a theoretical model of the separation process is proposed, which includes the slipping of combed heap layers moved by a conveyor scraper into the hole at the angle of repose. Previously, it was assumed that upon contacting with a transverse bar, the corresponding heap layer completely stops slipping and the process resumes only after overcoming the edge of the next hole. As a result, the separation rate should significantly decrease. The upgraded version of the model takes into account the inertia effect on the sliding upper heap layer, which is activated by the friction force of its lower part acting along the bar surface. As a result of the total effect of the rolling force and the inertia force, the flow direction of the upper layer components changes to become nearly horizontal, as a result of which 50 to 60% of the layer slides into the next hole without stopping. According to the theoretical model, the separation of combed grain heap should be reduced by 4 to 5% if there are 120 mm long bars between the longitudinal holes and the total length of the separating part of the grates surface is 800 mm. As a result of a laboratory experiment on the Moskovskaya 56 wheat variety, the separation of a combed grain heap decreased by 4.6% due to transverse bars, which confirmed the adequacy of the theoretical hypothesis.

Keywords: separation of combed grain heap, intensity of separation, combine feederhouse grates, separating surface, inertia force.

For citation: Ozherelev V.N., Nikitin V.V. Grain heap separation at the grates of a combine feederhouse. Agricultural Engineering (Moscow), 2023;25(3):35-40. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-35-40>.

Введение. Рост цен на уборочную технику и энергоносители способствуют развитию альтернативных технологий уборки зерна [1-3]. Больше внимания стало уделяться очесу растений на корню, оптимизации технологической схемы очесывателя и его параметров либо отдельных рабочих органов [4-8].

Уборка зерна путем его очеса на корню используется преимущественно в Казахстане [9]. Проблема прохождения очесанного вороха, содержащего до 80% свободного зерна, через молотильное устройство комбайна обусловлена непригодностью молотилки традиционной конструкции к работе с ворохом такого состава, в связи с чем значительно увеличивается дробление зерна и нерационально расходуется мощность двигателя [10]. Наиболее очевидным решением проблемы является предварительная сепарация очесанного вороха до его поступления в молотильное устройство и направление большей части свободного зерна непосредственно на очистку, минуя молотилку [11-13].

Предпочтительным вариантом представляется снабжение наклонной камеры решетчатым днищем, на котором может быть осуществлено надежное выделение из вороха свободного зерна [13]. При этом варианты конструкции могут отличаться по исполнению решетчатого днища [14]. В связи с этим целесообразно сравнить имеющиеся конструктивные варианты по степени эффективности осуществления ими процесса сепарации. В частности, полезно установить, как на скорость сепарации зерна влияют наличие или отсутствие между продольными отверстиями днища наклонной камеры поперечных перемычек [15].

Цель исследований: теоретически обосновать степень влияния поперечных перемычек между продольными отверстиями решетчатого днища наклонной камеры на процесс сепарации свободного зерна

и подтвердить гипотезу результатами экспериментального исследования.

Материалы и методы. Объектом исследований являются два варианта исполнения сепарирующих поверхностей (рис. 1).

Первый вариант получен путем вырезания из листа металла (заменяющего днище наклонной камеры комбайна) прямоугольных отверстий l длиной L и шириной B . При этом между отверстиями остаются продольные перемычки 2 шириной b_2 и поперечные перемычки 3 шириной b_1 (рис. 1а). Вторая сепарирующая поверхность разделена продольными перемычками 5 на сплошные отверстия 4, близкие по длине к ее максимальному размеру (рис. 1б).

Предметом исследований является сепарирующая способность двух типов поверхностей. При этом теоретическая часть исследований заключается

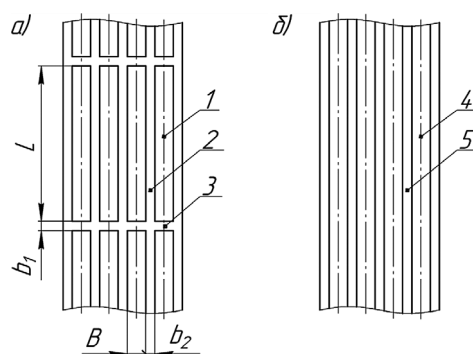


Рис. 1. Сепарирующая поверхность с продолговатыми отверстиями конечной длины (а) и сплошными отверстиями по всей длине (б):

1 – отверстие продолговатое; 2, 5 – перемычка продольная; 3 – перемычка поперечная; 4 – отверстие сплошное

Fig. 1. Separating surface with elongated holes of finite length (a) and through holes along the entire length (b):

1 – elongated hole; 2, 5 – longitudinal bar; 3 – transverse bar; 4 – through hole

в модернизации модели взаимодействия соскальзывающего слоя очесанного зернового вороха с поперечной перемычкой сепарирующей поверхности.

Экспериментальная часть исследований заключалась в сравнении сепарирующей способности двух типов поверхностей при фиксированном угле их наклона 45° . Выбор величины угла наклона обусловлен имитацией экспериментальной установкой работы сепарирующего устройства в составе наклонной камеры зерноуборочного комбайна.

Установка была изготовлена на базе колосового элеватора комбайна КЗС-1218 (рис. 2). Одна из стенок корпуса 1 элеватора была удалена, а вместо нее вмонтировали соответствующую сменную решетку 3 с размерами отверстий согласно плану опыта. Скорость скребкового транспортера 2 регулировалась изменением частоты вращения его ведущего вала посредством частотного преобразователя «Веспер» Е2-8300. Секундная подача вороха в нижнюю часть корпуса 1 соответствовала пропускной способности молотилки серийного комбайна КЗС-1218 (в пересчете на ширину элеватора).

В качестве функции цели принят проход вороха ($\Pi_{\text{зер}}, \%$) сквозь отверстия сепарирующей поверхности 3 длиной 0,8 м. При этом в первом варианте

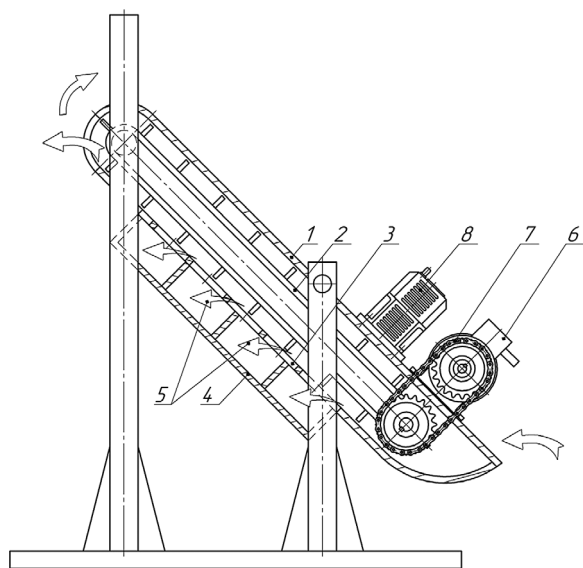


Рис. 2. Схема экспериментальной установки, выполненной на базе колосового элеватора комбайна КЗС-1218:

- 1 – корпус элеватора; 2 – транспортер скребковый;
- 3 – решетка сменная; 4 – емкости съемные для свободного зерна; 5 – выделенное зерно;
- 6 – электродвигатель; 7 – передача цепная;
- 8 – преобразователь частотный «Веспер» Е2-8300

Fig. 2. Scheme of the experimental installation made on the basis of the tailings elevator of the KZS-1218 combine:

- 1 – elevator body; 2 – scraper conveyor;
- 3 – replaceable grate;
- 4 – removable containers for free grain; 5 – selected grain;
- 6 – electric motor; 7 – chain transmission;
- 8 – frequency converter “Vesper” E2-8300

опыта была использована решетка с отверстиями длиной L , равной 120 мм, и шириной B , равной 8 мм. Во втором варианте опыта была использована решетка со сплошными отверстиями по всей ее длине ($L = 800$ мм) при той же их ширине $B = 8$ мм (рис. 16). Выбор ширины отверстий обусловлен оптимальной сепарирующей способностью решетчатой поверхности [9]. Длина продольных отверстий, соответствующая 120 мм, позволяет получить максимум суммарной ширины перемычек при той же длине решетки, что повышает степень достоверности различий между вариантами опыта.

В опыте использовался очесанный ворох пшеницы «Московская-56» влажностью порядка 12%. Скорость скребкового транспортера 2 устанавливалась на уровне 3 м/с.

Каждый вариант опыта выполнялся в пятикратной повторности. Учитывалась суммарная масса вороха 5, прошедшего сквозь отверстия решетки 3, путем взвешивания и суммирования прохода из четырех секций съемной емкости 4. При этом фиксировалась и масса схода с поверхности решетки 3.

Результаты и их обсуждение. Принято считать, что зерна способны перемещаться относительно друг друга аналогично частицам жидкости. Это свойство обеспечивает зерну сыпучесть, вследствие чего оно заполняет самотеком емкости различной формы и вытекает из них при наличии соответствующего отверстия [13].

Механические свойства сыпучих материалов впервые исследовались Кулоном и Навье. По оценке Кулона, сопротивление τ -частиц сдвигу по плоскости определяется линейным соотношением:

$$\tau = \sigma \cdot f + \tau_0, \quad (1)$$

где σ – нормальное давление на площадке, по которой происходит сдвиг; f – коэффициент внутреннего трения; τ_0 – сцепление или сопротивление сдвигу, не зависящее от нормального давления.

Для идеально сыпучего материала $\tau_0 = 0$. Наибольшая сыпучесть характерна для проса, зерна которого близки к шаровидной форме и покрыты гладкой чешуей. Сыпучесть очесанного вороха дополнительно ограничивается солоmistыми частицами и легкими компонентами (половы) с высокой парусностью, тормозящих взаимное перемещение составляющих вороха [10]. Свойства этого материала изучены недостаточно полно, но углы естественного откоса установлены, и теоретически найдена ориентировочная скорость движения соскальзывающего слоя вороха, близкая к экспериментальным значениям указанного параметра [12]. В связи с этим можно условно считать, что слои очесанного зернового вороха 5...8, перемещаемые скребком 4 вверх по наклонной поверхности

решетчатого днища наклонной камеры, соскальзывают в отверстия 1 и 3 под некоторым углом φ к горизонту (рис. 3). В качестве указанного угла принимаем угол естественного откоса, который варьируется в широких пределах даже для чисто зернового вороха (32...34° для пшеницы и 28...48° – для ячменя)¹. Примем для дальнейших расчетов угол $\varphi = 33^\circ$.

Наружный слой 8 соскальзывает в отверстие 3 по направлению стрелки 9 до тех пор, пока его нижний ярус не достигнет поверхности поперечной перемычки 2 (рис. 3).

При соскальзывании должно поддерживаться равновесие между скатывающей силой $F_{ск}$ и силой трения между слоями $F_{мп}$, то есть

$$G \cdot \cos \varphi = G \cdot \sin \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (2)$$

где G – вес соскальзывающего слоя.

Сформулированная ранее модель процесса предполагала, что как только соскальзывающий слой 8 вступит в контакт с поверхностью поперечной перемычки 2, его движение полностью прекращается и возобновляется только после выхода нижнего яруса слоя на следующее отверстие 1 (рис. 3). Однако при этом не были учтены силы инерции слоя, перемещающегося вдоль поверхности решетчатого днища с достаточно высокой скоростью скребка 4 ($V_{скр} = 3$ м/с). При скольжении нижней части слоя 8 по поверхности поперечной перемычки 2 возникает сила трения зерна по стали $F_{мп1}$,

которая тормозит движение и уплотняет нижние ярусы слоев 5...8, тогда как верхний ярус слоя 8 подвергается действию силы инерции $F_{ин}$, направленной параллельно скорости $V_{скр}$ и поверхности решетчатого днища.

Сила инерции, воздействующая на верхний ярус соскальзывающего слоя 8, реализуется только благодаря торможению его нижнего яруса, поэтому правомерно принять, что $F_{ин} = F_{мп1}$. Чтобы оценить величину указанной силы, будем иметь в виду, что угол трения зерна пшеницы по гладкому металлу равен 17...20°, а ячменя – 20...25°. Следовательно, если исходить из пропорций между углами естественного откоса и углом трения зерна по стали, то сила инерции должна быть меньше исходной силы трения и соответствующей ей силы скатывания, то есть $F_{ин} = 0,7F_{мп}$.

Для нахождения результирующей силы P_Σ , действующей на зерна в верхней части слоя 8, выполним векторное сложение силы инерции и исходной скатывающей силы (рис. 3):

$$\vec{P}_\Sigma = \vec{F}_{ин} + \vec{F}_{ск}. \quad (3)$$

В результате изменения направления силового воздействия на компоненты верхнего яруса слоя 8 они должны изменить направление движения и начать скольжение по новой поверхности 11 в направлении стрелки 10. При этом верхние 50...60% объема слоя 8 должны без остановки продолжить процесс прохода через отверстие 1, начав его, прежде чем кромки

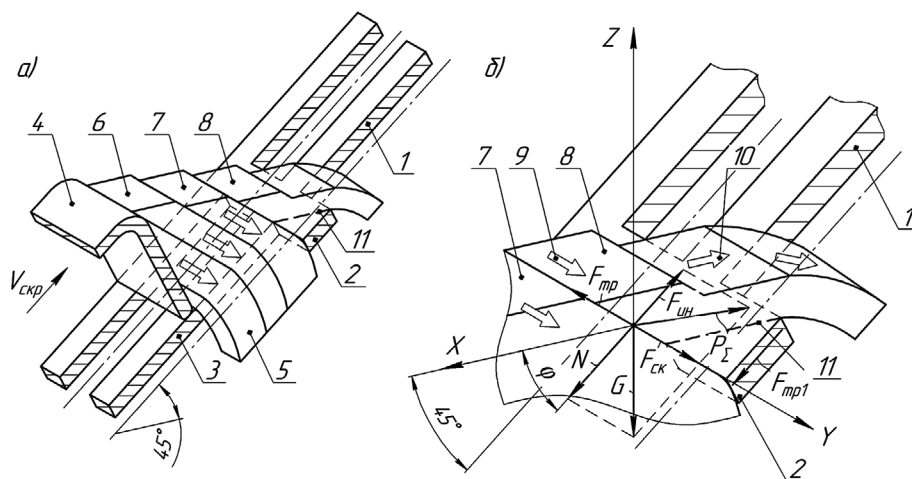


Рис. 3. Схема взаимодействия очесанного зернового вороха с поперечной перемычкой решетки:

а) общий вид; б) силы, действующие на ворох при преодолении поперечной перемычки;

1, 3 – отверстия продольные; 2 – перемычка поперечная; 4 – скребок транспортера;

5...8 – слои соскальзывающего в отверстие вороха; 9 – исходное направление движения соскальзывающего слоя вороха;

10 – измененное направление движения слоя после его контакта с поперечной перемычкой;

11 – поверхность скольжения вороха после его контакта с поперечной перемычкой

Fig. 3. Scheme of interaction of a combed grain heap with a transverse bar of the grate:

a) general view; b) forces acting on a heap when overcoming the transverse bar;

1, 3 – longitudinal holes; 2 – transverse bar; 4 – conveyor scraper; 5 to 8 – heap layers sliding into the hole;

9 – initial flow direction of the sliding heap layer; 10 – changed flow direction of the layer after its contact with the transverse bar;

11 – sliding surface of the heap after its contact with the transverse bar

¹ Юдаев Н.В. Элеваторы, склады, зерносушилки. СПб.: Гиорд, 2008. 128 с.

указанного отверстия достигнут нижние 40...50% слоя δ , то есть соскальзывание вороха будет осуществляться не вниз (как в исходном процессе), а близко к горизонтальному направлению. За аналог процесса можно принять известную в теоретической механике задачу о движении лыжника по склону с его последующим выходом на горизонтальную поверхность. В обоих случаях движение продолжается за счет расходования кинетической энергии, накопленной в предшествующей фазе процесса².

Несмотря на сохранение соскальзывающим слоем набранной линейной скорости, интенсивность сепарации заметно уменьшается, поскольку направление движения (по стрелке 10) сориентировано под углом порядка 45° по отношению к поверхности решетчатого днища. Следовательно, реальная интенсивность сепарации, выражаемая величиной, перпендикулярной по отношению к поверхности днища составляющей скорости движения соскальзывающего слоя, составит порядка 0,71 от исходного значения (V_{cen}). С учетом того, что движение по инерции сохраняет только 50...60% слоя, интенсивность сепарации в зоне

поперечной перемычки уменьшается до 0,36...0,43 от исходного значения V_{cen} . Если принять, что длина отверстия $L = 120$ мм, а ширина поперечной перемычки $b_1 = 10$ мм, то перемычка составляет порядка 8% от длины отверстия, а поскольку на перемычке локальное снижение интенсивности сепарации достигает 57...64%, то ее общая потеря должна находиться на уровне 4,56...5,12%.

Теоретический расчет в целом подтверждается результатами эксперимента, приведенными в таблице. Поперечные перемычки снижают интенсивность сепарации. При втором варианте величина сепарации близка к расчетной.

Несмотря на то, что интенсивность сепарации очесанного зернового вороха в сравниваемых вариантах, различающихся исполнением решетчатой поверхности днища наклонной камеры, отличается на 4...5% при достигнутом уровне совершенствования уборочной техники и жесткой конкуренции между ее производителями, пренебрегать возможностью получения дополнительных конкурентных преимуществ было бы недальновидным.

Величина прохода зерна сквозь отверстия шириной 8 мм с поперечными перемычками и без них, %

Таблица

Amount of grain passing through 8 mm wide holes with and without transverse bars, %

Table

Показатель <i>Indicators</i>	Вариант решетки / <i>Variant of the grate</i>	
	1 (с перемычками) $L = 120$ мм	2 (без перемычек) $L = 800$ мм
Проход зерна, % / <i>Grain passage, %</i>	65,6	68,59
Относительная величина прохода зерна, % / <i>The ratio of the passage, %</i>	104,6	

² Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики: Учебник для вузов. 20-е изд., стер. М.: Высшая школа, 2010. 416 с.

Выводы

1. Теоретическая модель сепарации очесанного зернового вороха через решетчатое днище наклонной камеры комбайна адекватно отражает технологический процесс сепарации.

2. На поперечной перемычке не происходит полного затормаживания соскальзывающего слоя очесанного зернового вороха в связи с воздействием на его верхний ярус силы инерции, переориентирующей направление движения последнего в близкое к горизонтальному.

Список использованных источников

1. Lachuga Yu.F., Buryanov A.I., Pakhomov V.I., Chervyakov I.V. Adaptation of threshing devices to physical and mechanical characteristics of harvested crops. *Russian Agricultural Sciences*. 2020;46(2):198-201 (In Eng.) <https://doi.org/10.3103/S1068367420020111>
2. Федин М.А., Кухарев О.Н., Кухмазов К.З., Семов И.Н., Федина Т.О. Результаты лабораторных исследований

3. В отсутствие поперечных перемычек между продольными отверстиями решетчатого днища интенсивность сепарации очесанного зернового вороха увеличивается на 4...5% при условии, что перемычки (при их наличии) составляют до 8% от длины продольных отверстий.

4. Целесообразно, чтобы сепарирующая поверхность днища наклонной камеры комбайна выполнялась со сплошными продольными отверстиями без поперечных перемычек.

References

1. Lachuga Yu.F., Buryanov A.I., Pakhomov V.I., Chervyakov I.V. Adaptation of threshing devices to physical and mechanical characteristics of harvested crops. *Russian Agricultural Sciences*. 2020;46(2):198-201. <https://doi.org/10.3103/S1068367420020111>
2. Fedin M.A., Kuharev O.N., Kuhmazov K.Z., Semov I.N., Fedina T.O. Results of laboratory tests on the determination

по определению оптимальных конструктивных и режимных параметров ротора // Нива Поволжья. 2018. № 4 (49). С. 169-174. EDN: VQCIJZ

3. Жалнин Э.В. Уборка с очесом на корню: за и против // Сельский механизатор. 2013. № 8. С. 10-12. EDN: RCFKAZ

4. Жалнин Э.В. Основные задачи внедрения очесывающих жаток «ОЗОН» // Сельский механизатор. 2018. № 5. С. 10-11. EDN: XWCSEH

5. Бурьянов М.А., Бурьянов А.И., Червяков И.В., Горячев Ю.О. Разработка и совершенствование методов обоснования технологии комбайновой уборки зерновых колосовых культур очесом // Вестник аграрной науки Дона. 2017. № 38. С. 59-72. EDN: ZVKDAZ

6. Buryanov A.I., Chervyakov I.V. Using combines for cleaning grain crops by non-traditional technologies. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019;59(3):27-32 (In Eng.)

7. Савин В.Ю. Зависимость степени дробления зерна пшеницы от частоты вращения очесывающего устройства // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2018. № 3. С. 98-102. <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2018.3.98>

8. Савин В.Ю. Исследование очесывающего аппарата устройства для уборки зерновых культур как колебательной системы // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 3. С. 403-413. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.403-413>

9. Chaplygin M.E., Pekhalskiy I.A., Tronev S.V. The choice of combine harvesters and their adapters for the conditions of Northern Kazakhstan. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;51(3):74-76 (In Eng.)

10. Ожерельев В.Н., Никитин В.В., Алакин В.М., Становов С.Н. Исследование параметров очесанного зернового вороха // Техника в сельском хозяйстве. 2013. № 1. С. 7-9. EDN: TZNNGD

11. Ozherelyev V.N., Nikitin V.V., Belous N.M., Torikov V.V. Perspectives of grain pile separation before it enters the thresh-ER. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*. 2018;7(2.13):114-116. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.13.11622> (In Eng.)

12. Ожерельев В.Н., Никитин В.В. Результаты адаптации конструкции комбайна к работе с очесывающей жаткой // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 2. С. 190-206. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.190-206>

13. Ожерельев В.Н., Никитин В.В., Синяя Н.В., Чаплыгин М.Е., Федина Т.О. Очес растений на корню с предварительной сепарацией свободного зерна // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 1. С. 73-79. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-100849>

14. Наклонная камера зерноуборочного комбайна: SU1687078 A1 / А.В. Дементьев, В.И. Скорик, Б.К. Пастухов, Ж.С. Садыков, Б.И. Андрусенко. Заяв. № 4689013 от 12.05.1989; опубл. 30.10.1991, Бюл. № 40. 5 с. EDN: APWJMQ

15. Наклонная камера зерноуборочного комбайна: Пат. RU2577892 C1, A01D41/12 / В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин. Заяв. № 2014145875/13 от 14.11.2014, опубл. 20.03.16, Бюл. № 8. EDN: ZENWZN

Вклад авторов

В.Н. Ожерельев – выполнил теоретические исследования и подготовил рукопись.

В.В. Никитин – подготовил и выполнил экспериментальные исследования и участвовал в формулировании теоретической гипотезы.

Конфликт интересов

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

Статья поступила в редакцию 09.01.2023; поступила после рецензирования и доработки 22.03.2023; принята к публикации 23.03.2023

of the optimal constructive and operating parameters of a rotor. *Niva Povolzhya*. 2018;4(49):169-174. (In Rus.)

3. Zhalnin E.V. Cleaning with feathering on the vine: pros and cons. *Selskiy mekhanizator*. 2013;8:10-12. (In Rus.)

4. Zhalnin E.V. Main objectives of the introduction of the “Ozone” comb. *Selskiy mekhanizator*. 2018;5:10-11. (In Rus.)

5. Buryanov A.I., Chervyakov I.V., Goryachev Yu.O. Developing and improving the technology of combine harvesting of cereals by combing. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2017;38:59-72. (In Rus.)

6. Buryanov A.I., Chervyakov I.V. Using combines for cleaning grain crops by non-traditional technologies. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019;59(3):27-32. <https://doi.org/10.35633/INMATEH-59-03>

7. Savin V.Yu. Relationship between the degree of wheat grain damaging and the speed of a rotary comb. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2018;3:98-102. (In Rus.) <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2018.3.98>

8. Savin V.Yu. Study of a comb for grain harvesting as a vibrating system. *Engineering Technologies and Systems*. 2021;31(3):403-413. (In Rus.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.403-413>

9. Chaplygin M.E., Pekhalskiy I.A., Tronev S.V. The choice of combine harvesters and their adapters for the conditions of Northern Kazakhstan. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;51(3):74-76.

10. Ozherelyev V.N., Nikitin V.V., Alakin V.M., Stanovov S.N. Study of the parameters of combed grain heap. *Tekhnika v selskom khozyaystve*. 2013;1:7-9. (In Rus.)

11. Ozherelyev V.N., Nikitin V.V., Belous N.M., Torikov V.V. Perspectives of grain pile separation before it enters the thresh-ER. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*. 2018;7(2.13):114-116. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.13.11622>

12. Ozherelyev V.N., Nikitin V.V. Results of the combine design adaptation to work with a comb. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):190-206. (In Rus.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.190-206>

13. Ozherelyev V.N., Nikitin V.V., Sinyaya N.V., Chaplygin M.E., Fedina T.O. Combing the standing crops with preliminary separation of loose grains. *Traktory i selkhoz mashiny*. 2022;89(1):73-79. (In Rus.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-100849>

14. Dementiev A.V., Skorik V.I., Pastukhov B.K., Sadykov Zh.S., Andrusenko B.I. Feederhouse of a grain combine: SU1687078 SSSR. No. 4689013/15, 1991. (In Rus.)

15. Ozherelyev V.N., Nikitin V.V. Feederhouse of a grain combine: Pat. RU2577892 C1, A01D41/12. Application No. 2014145875/13, 2016. (In Rus.)

Contribution of the authors

V.N. Ozherelyev carried out theoretical research and prepared the manuscript.

V.V. Nikitin prepared and carried out the experimental research and participated in the formulation of the theoretical hypothesis.

Conflict of interests

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

Received 09.01.2023; revised 22.03.2023; accepted 23.03.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.363

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-41-48



Оптимизация настроечных параметров пассивного измельчителя при приготовлении ржаной патоки

*Владимир Николаевич Нечаев, канд. техн. наук, доцент*nechaev-v@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7566-6013>

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет; 606340, Российская Федерация, г. Княгинино, ул. Октябрьская, 22

Аннотация. Восполнить дефицит легкоусвояемых углеводов в рационе коров позволяет зерновая патока. Лучшим сырьем является рожь. Патоку можно производить в хозяйствах непосредственно перед скормливанием. Совершенствование технологии и технических устройств для производства зерновой патоки является сегодня актуальным. Исследования проведены с целью определения оптимальных значений настроечных параметров пассивного измельчителя (угла наклона решётки и диаметра отверстий решётки) путем оценки их влияния на критерий оптимизации – удельные энергозатраты. При этом определялись качественные показатели: количество целых зерен и остаток на сите с размером стороны ячейки 3 мм. Дробление целого зерна (озимая рожь сорта «Графиня») осуществлялось с помощью пассивного измельчителя, конструкцией которого предусмотрены изменение угла наклона решёток от 30 до 90° и установка их с разными диаметрами отверстий (3, 6 и 9 мм). Реализована матрица полного факторного эксперимента 3^2 и получена адекватная функция отклика. Дана оценка профиля желательности и графика Парето для изучаемых факторов. На первом этапе исследований установлено, что на снижение удельных энергозатрат большое влияние оказывает увеличение значения диаметра отверстий решётки. Построена поверхность отклика и определен антиградиент функции. На втором этапе выбран шаг в сторону увеличения значения диаметра отверстий до 9 мм и реализована матрица планирования дробного факторного эксперимента. Для полученной функции отклика определена экстремальная точка с минимум значения функции. В натуральном виде при угле наклона решётки 60,6° и диаметре отверстий решётки 6,57 мм удельные энергозатраты составляют 55,56 Вт·ч/кг. В качестве настроечных параметров рекомендуются значения 60° и 6 мм, при которых удельные энергозатраты находятся в области минимума и составляют 56,4 Вт·ч/кг, что на 1,3% больше расчётных значений.

Ключевые слова: зерновая патока, рожь, пассивный измельчитель, удельные энергозатраты

Формат цитирования: Нечаев В.Н. Оптимизация настроечных параметров пассивного измельчителя при приготовлении ржаной патоки // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25, № 3. С. 41-48. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-41-48>.

© Нечаев В.Н., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Optimising the setting parameters of a passive grinder used for rye molasses preparation

*Vladimir N. Nechaev, CSc (Eng), Associate Professor*nechaev-v@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7566-6013>

Nizhniy Novgorod State Engineering-Economic Institute; 22A, Oktyabrskaya Str., Knyaginino, Nizhniy Novgorod region, 606340, Russian Federation

Abstract. Grain molasses can compensate the deficiency of easily digestible carbohydrates in a cow's ration. The best raw material to produce molasses is rye. Molasses can be produced on farms directly before feeding. Today it is highly promising to improve the technology and technical devices for the production of grain molasses. The research was conducted to determine optimum values of adjustment parameters of a passive shredder (the grate angle and the diameter of grate apertures) by estimating their influence on the optimization criterion – specific energy consumption. The author determined quality indicators: the number of whole grains and the residue amount on the sieve with a mesh side size of 3 mm. Whole grains (the “Grafinya” winter rye variety) were crushed with a passive shredder. According to its design, the grate angle is changed from 30 to 90° and the grates have different hole diameters (3, 6, and 9 mm).

The author made a matrix of complete factor experiment 3^2 and obtained an adequate response function. They also evaluated the desirability profile and Pareto plot for the studied factors. At the first stage of the research, it was found that the reduction of specific energy consumption is greatly influenced by increasing the value of the grate aperture diameter. The response surface was plotted and the antigradient of the function was determined. At the second stage, a pitch towards increasing the hole diameter to 9 mm was selected and the planning matrix of the fractional factor experiment was made. An extremum point with the minimum value of the function was defined for the resulting response function. In the natural form, the specific energy cost is 55.56 Wh/kg with a grate angle of 60.6° and a grate hole diameter of 6.57 mm. The values of 60° and 6 mm with specific power inputs being in the area of minimum and amounting to 56.4 Wt-h/kg are recommended as adjustment parameters, which is 1.3 per cent higher than the calculated values.

Keywords: grain molasses, rye, passive grinder, specific energy input

For citation: Nechaev V.N. Optimising the setting parameters of a passive grinder used for rye molasses preparation. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(3):41-48. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-41-48>.

Введение. Обеспечение продовольственной безопасности¹ нашей страны в современных условиях отвечает ее национальным интересам. В международном рейтинге по данной проблеме Россия занимает 43-е место среди 113 стран². Научные исследования и разработки в области устойчивого развития молочного животноводства и кормовой базы позволяют улучшить это положение.

В настоящее время во многих хозяйствах наблюдается дефицит легкоусвояемых углеводов в рационе коров, что приводит к сокращению срока продуктивного долголетия животных, снижению надоев и ухудшению качества молока и молочных продуктов³ [1-2].

Зерновая патока – лучший источник легкоусвояемых углеводов с точки зрения физиологии жвачных животных [3]. Научно доказано, что включение в рацион зерновой патоки позволяет увеличить надой молока за период лактации на 2,1%, увеличить жирность и белок соответственно на 0,17 и 0,07%. По сравнению со свекловичной патокой зерновая патока безопасна и доступна, ее можно производить в хозяйствах непосредственно перед скормливанием. Ранее установлено, что лучшим сырьем для производства зерновой патоки является рожь. В ржаной патоке сахаров в 5,8 раза больше, чем в ячменной, и в 4,4 раза больше, чем в пшеничной патоке [4]. В связи с этим разработка и совершенствование технологии и технических устройств производства зерновой патоки являются актуальной задачей.

Цель исследований: определение значений параметров пассивного измельчителя, обеспечивающих минимальные удельные энергозатраты процесса приготовления ржаной патоки.

Материалы и методы. Объектом исследований выступала установка по производству жидких сахаристых кормов (рис. 1). С целью интенсификации рабочего процесса на выходе из нагнетательного трубопровода установлен пассивный измельчитель (рис. 2). От удара и истирания зерна о решётку (пластину) сокращается время процесса приготовления сахаристых кормов и соответственно увеличивается срок эксплуатации центробежного насоса [5]. Конструкцией пассивного измельчителя предусмотрены изменение угла наклона от 30 до 90° и установка решёток с разными диаметрами отверстий (рис. 3).

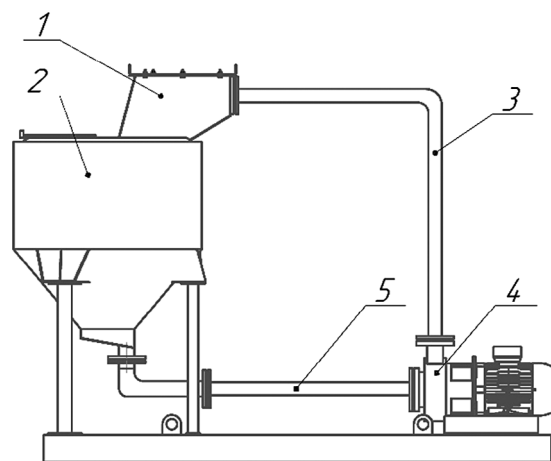


Рис. 1. Конструктивно-технологическая схема установки для приготовления жидких сахаристых кормов:

1 – пассивный измельчитель; 2 – ёмкость;
3, 5 – нагнетательный и всасывающий трубопроводы;
4 – центробежный насос

Fig. 1. Structural and technological scheme of the installation for the preparation of liquid sugary feed:

1 – passive grinder; 2 – capacity;
3 and 5 – discharge and intake (suction) pipelines;
4 – centrifugal pump

¹ Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации от 21 января 2020 г. № 20. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45106> (дата обращения: 23.12.2022).

² Global Food Security Index. [Электронный ресурс]. URL: <https://impact.economist.com/sustainability/project/food-security-index/Country/Details#Russia> (дата обращения: 23.12.2022).

³ Мотовилов К.Я., Мотовилов О.К., Аксенов В.В. Нанобиотехнологии в производстве зерновых патоки для животноводства: Монография. Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2015. 134 с. EDN: VROMAF.

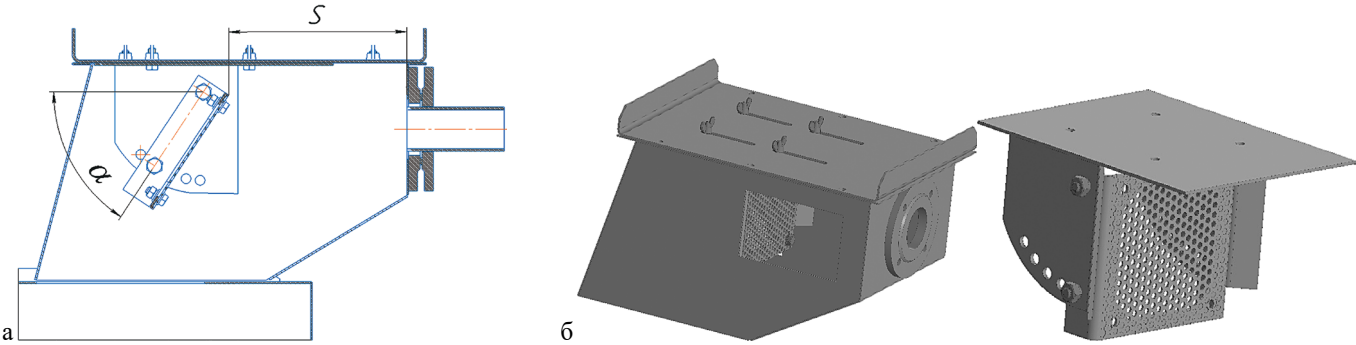


Рис. 2. Пассивный измельчитель:
схема (а) и 3D-модель пассивного измельчителя и механизма регулировки (б)

Fig. 2. Passive grinder:
scheme (a), 3D model of passive grinder and adjustment mechanism (б)

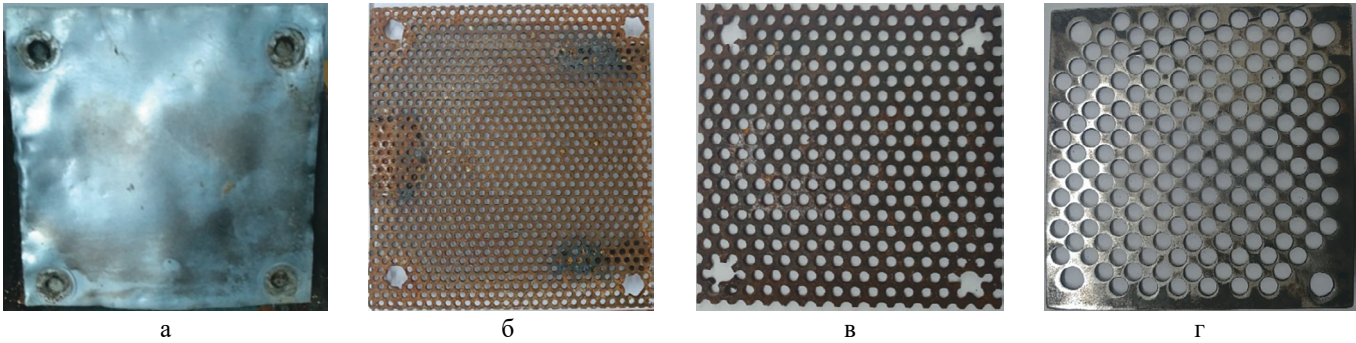


Рис. 3. Общий вид сменных решёток:
пластина (а); пластина с отверстиями диаметром 3 мм (б), 6 мм (в); 9 мм (г)

Fig. 3. General view of replaceable grates with hole diameters:
a – 0 mm (plate); b – 3 mm, c – 6 mm; g – 9 mm

Коэффициент «живого» сечения связывает количество отверстий с площадью решетки:

$$k = \frac{S_o}{S_p} = \frac{S_o \cdot N_o}{a_p \cdot b_p}, \tag{1}$$

где S_o – площадь отверстий решётки, мм²; S_p – площадь решётки, мм²; S_o – площадь одного отверстия решётки, мм²; N_o – количество отверстий, шт.; a_p , b_p – длина и ширина решётки, мм.

Геометрическая характеристика сменных решеток представлена в таблице 1.

В ходе предыдущих исследований нам не удалось выяснить оптимальные значения количества отверстий и площади решётки.

Для определения оптимального сочетания изучаемых факторов применялись теория планирования эксперимента⁴ и пакет программ статистического анализа Statgraphics и Statistica.

⁴ Асанова Н.В. Планирование эксперимента. [Электронный ресурс]: Учебное пособие / Н.В. Асанова, О.Ю. Соловьева, Т.Е. Кожанова; ВолгГТУ. Волгоград: ВолгГТУ, 2018. 93 с.

Таблица 1
Геометрическая характеристика решёток пассивного измельчителя

Table 1
Geometric characteristics of the passive grinder grates

Параметры <i>Parameters</i>	Решётка 155×155×3 / <i>Grate 155×155×3</i>		
Диаметр отверстий, мм <i>Diameter of holes, mm</i>	3	6	9
Коэффициент «живого сечения» <i>Coefficient of «live section»</i>	0,3	0,38	0,44

Результаты и их обсуждение. Ранее проведенные исследования установки для приготовления ржаной патоки путем реализации поисковых экспериментов позволили определить оптимальное значение расстояния S (рис. 2а), равное 205 мм [6], при различных сочетаниях угла наклона решётки α и диаметра ее отверстий d , оказывающих влияние на ее рабочий процесс.

На первом этапе исследований с целью определения оптимальных значений исследуемых факторов и их взаимного влияния на рабочий процесс установки реализована матрица полного факторного эксперимента 3^2 (табл. 2, 3). Во всех опытах матрицы

Таблица 2

Интервалы и уровни их варьирования

Table 2

Intervals and levels of variation

Факторы <i>Factors</i>		Уровни / Levels		
		Верхний (+) / Upper (+)	Основной (0) / Main (0)	Нижний (–) / Lower (–)
Угол наклона решётки α , град. <i>Angle of inclination of a grille, deg</i>	x_1	75	60	45
Диаметр отверстий решётки d , мм <i>Diameter of grate holes d, mm</i>	x_2	6	3	0

планирования было 3 параллельных опыта. В качестве критерия оптимизации (y) принято среднее значение удельных энергозатрат (E , Вт·ч/кг), которое имеет физический смысл и легко вычисляется из частных значений времени приготовления и средней потребляемой мощности.

Согласно зоотехническим требованиям, предъявляемым к комбикормам-концентратам для КРС (ГОСТ 9268-2015), также определялись качественные показатели: количество целых зерен и остаток на сите с размером стороны ячейки 3 мм. Данные показатели фиксировались в пробах через каждые 7,5 мин до достижения температуры смеси 60°C. По данным рисунка 4 можно наблюдать изменения целого исходного зерна (озимая рожь сорт «Графиня») и зерноводяной смеси в процессе приготовления зерновой патоки при угле наклона решетки $\alpha = 60^\circ$, диаметре отверстий решетки $d = 6$ мм, расстоянии решетки $S = 205$ мм. Благодаря многократному взаимодействию зерноводяной смеси с рабочим органом

Таблица 3

Матрица плана 3^2 и результаты исследований рабочего процесса установки для приготовления патоки из зерна ржи

Table 3

Plan matrix 3^2 and the results of performance studies of the installation for molasses preparation from rye grain

Опыты <i>Experiments</i>	Факторы <i>Factors</i>		Критерий оптимизации <i>Optimization criterion</i>
	x_1	x_2	
1	-	-	63,68
2	0	-	58,95
3	+	-	62,47
4	-	0	62,70
5	0	0	58,25
6	+	0	61,20
7	-	+	58,19
8	0	+	56,40
9	+	+	57,60

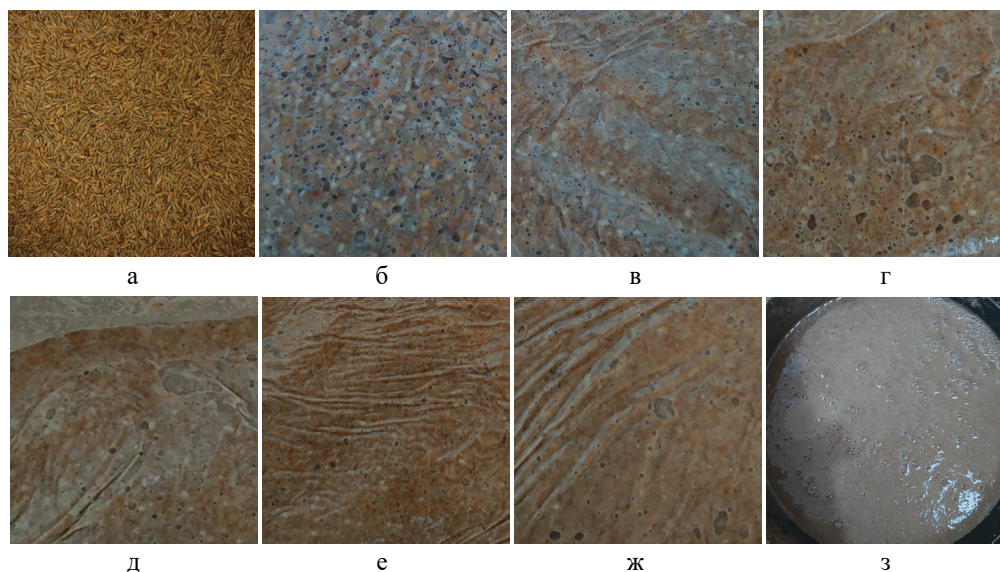


Рис. 4. Вид зерна ржи в процессе приготовления зерновой патоки в зависимости от времени измельчения: начало процесса – исходное зерно (а); 7,5 мин (б); 15 мин (в); 22,5 мин (г); 30 мин (д); 37,5 мин (е); 45 мин (ж); готовая ржаная патока (з)

Fig. 4. General view of rye grain in the initial state and during the preparation of molasses:

a – initial grain; b – 7.5 min; c – 15 min; g – 22.5 min; d – 30 min; f – 37.5 min; f – 45 min; h – finished rye molasses

насоса и решёткой пассивного измельчителя происходит разрушение зерновок до образования однородной суспензии. Это свидетельствует о том, что во всех пробах готового продукта количество целых зерен и остаток на сите с размером стороны ячейки 3 мм практически были равны нулю. Поэтому в качестве критериев оптимизации данные показатели не рассматриваются.

После реализации матрицы плана и обработки экспериментальных данных в программе Statgraphics получена функция отклика:

$$y = 58,6456 - 0,55 \cdot x_1 - 2,15167 \cdot x_2 + 3,10667 \cdot x_1^2 + 0,155 \cdot x_1 \cdot x_2 - 1,16833 \cdot x_2^2 \quad (2)$$

Коэффициент детерминации R^2 или квадрат коэффициента корреляции Пирсона, показывающий влияние изучаемых факторов на долю дисперсии результативного признака, равен 94,9%. По шкале Чеддока [7] для полученного значения можно отметить высокое значение причинно-следственной связи между переменными. Это позволяет применять полученную функцию для описания изучаемого процесса.

Для оценки однородности дисперсии функции отклика (2) применялся критерий Кохрена⁵ при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Для рассматриваемой функции отклика опытное значение критерия Кохрена составило $G_{\text{оп}} = 0,17$, критическое значение – $G_{\text{т}} = 0,6333$. В связи с этим гипотеза об однородности дисперсий измерения функции отклика при трёх параллельных опытах не отвергается, так как выполняется условие $G_{\text{оп}} < G_{\text{т}}$. Следовательно, в результатах эксперимента грубых ошибок нет.

Проверка модели по критерию Фишера при заданном уровне значимости $\alpha = 0,05$ показала, что опытное

значение критерия составило $F_{\text{оп}} = 1,42$, критическое значение – $F_{\text{теор}} = 2,66$, так как $F_{\text{оп}} < F_{\text{теор}}$. Это значит, что функцию отклика (2) можно считать адекватной.

Анализ функции отклика (2) и диаграммы Парето (рис. 5а) показывает, что фактор x_2 (диаметр отверстий решётки) имеет большую значимость, чем x_1 (угол наклона решётки). С увеличением диаметра отверстий решётки ($b_2 = -2,15167$) удельные энергозатраты E снижаются.

Анализ поверхности отклика (рис. 5б) показывает, что минимум значения критерия оптимизации наблюдается при $x_1 = 0$ и $x_2 = 1$, то есть при $\alpha = 60^\circ$ и $d = 6$ мм.

Решение оптимизационной задачи возможно путём построения профиля желательности (Desirability Profiles) в среде статистического анализа Statistica (рис. 6). Предварительно указав для критерия оптимизации y границы желательности от 0 (очень нежелательно) со значением 63,68 Вт·ч/кг до 1 (очень желательно) 56,4 Вт·ч/кг и имея среднее геометрическое для функции желательности, получили последовательные графики для каждого независимого фактора x_1 и x_2 . Графически проецируя функцию желательности, обозначенную в правом верхнем углу (рис. 6), определили наиболее желаемый отклик для критерия оптимизации y (зависимой переменной) при следующих значениях исследуемых факторов.

Как видим, общая желательность процесса составляет 0,69, что соответствует оценке «Удовлетворительно». Для фактора x_1 функция желательности имеет перегиб, показывающий, что при 60° получается наилучшая желательность или что при таком фиксированном значении достигается оптимальное

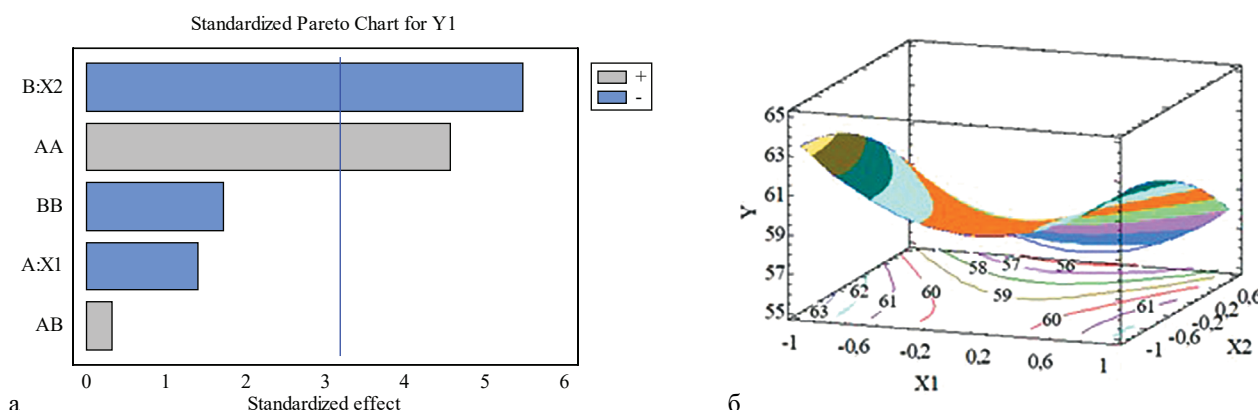


Рис. 5. Влияние угла наклона решётки (x_1) и диаметра отверстий решётки (x_2) на удельные энергозатраты (y): а – диаграмма Парето; б – поверхность отклика и сечение поверхности отклика критерия оптимизации y

Fig. 5. Influence of the inclination angle of the grate x_1 and the hole diameter of the grate x_2 on the criterion for optimizing the passive grinder:

a – Pareto diagram for the optimization criterion y ; b – response surface and a cross-section of specific energy consumption response y

⁵ Гайдар С.М. Планирование и анализ эксперимента: Учебник. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2015. 548 с.

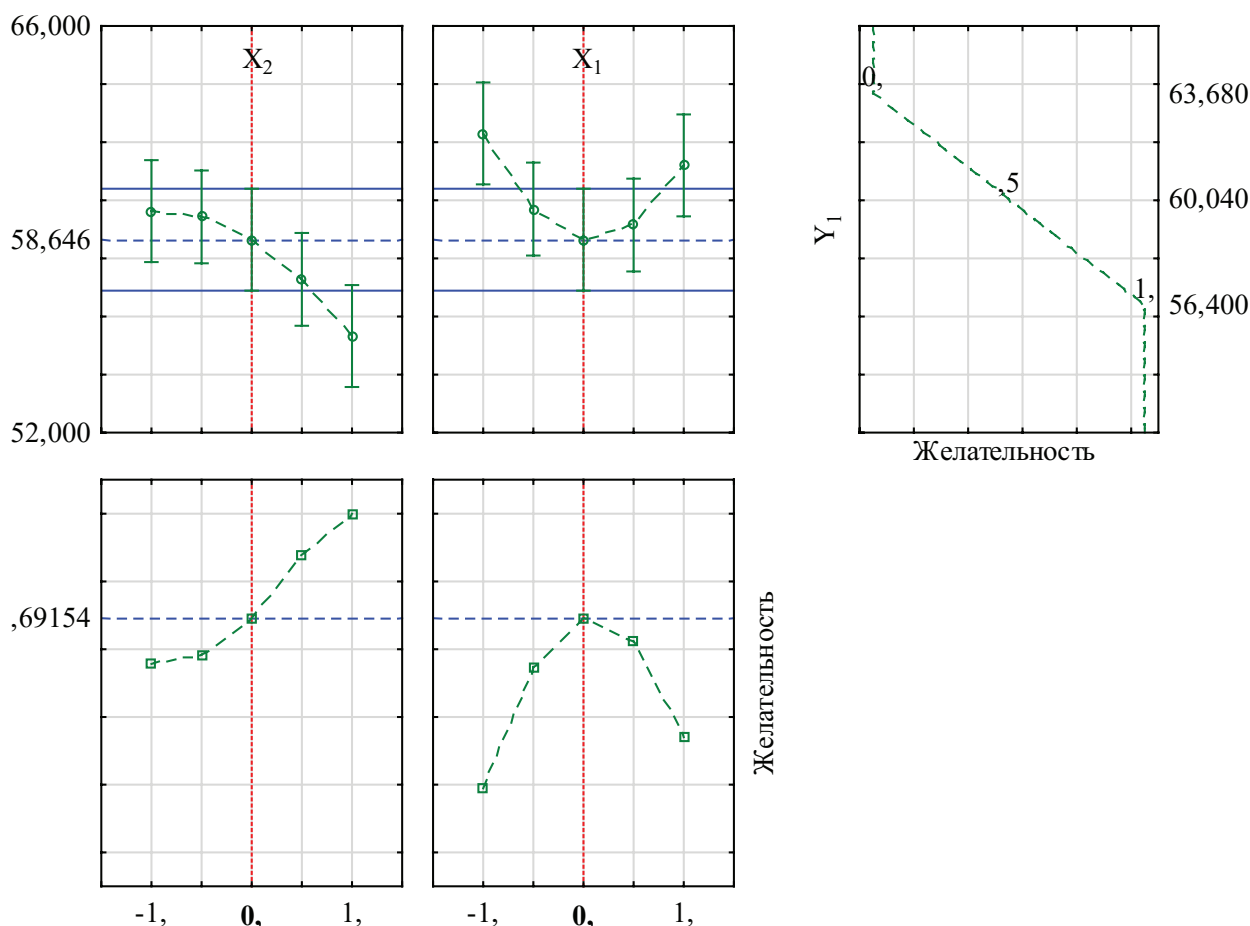


Рис. 6. Профили предсказанных значений и функции желательности для критерия оптимизации y

Fig. 6. Predicted value profiles and desirability function for the optimization criterion y

значение отклика для критерия оптимизации y . При других значениях фактора x_1 желательность процесса минимальна. Для фактора x_2 функция желательности практически имеет монотонно возрастающую зависимость. При значениях диаметра отверстий решётки ниже среднего значения функция желательности имеет худший вариант, и наоборот, с увеличением диаметров отверстий решётки значение желательности близко к единице, то есть это идеальный вариант, при котором удельные энергозатраты процесса приготовления патоки будут минимальными. Чем больше x_2 , тем меньше y .

Исходя из анализа поверхности отклика (рис. 5б) и профилей желательности (рис. 6) принято решение провести проверку полученных зависимостей и дальнейшего поиска оптимального значения фактора x_2 при значении фактора $x_1 = 0$. По результатам исследований на экстремум функции отклика (2) не выявлена экстремальная точка.

Чтобы достичь минимума функции отклика, шар, условно обозначенный на рисунке 7, должен скатиться вниз и занять самое нижнее положение. В настоящее время градиентный метод широко используется в системах машинного обучения и искусственного

интеллекта при поиске низких ошибок или глобальных минимумов [8].

Поведение функции (2) определяет ее антиградиент в значениях веса, отличных от значений факторов на основном уровне в виде частных производных первого порядка:

$$\nabla Y(x_1, x_2) = \left[\frac{\partial y}{\partial x_1}, \frac{\partial y}{\partial x_2} \right] \rightarrow Y_{min}. \quad (3)$$

Определенный антиградиент функции указывает, что скорость достижения функцией минимума или крутизна спуска (рис. 7) в большей степени зависят от x_2 , увеличение значения которого приведет к скорейшему достижению минимума. В области определения функции отклика (2) минимум достигается при $x_2 = 1$. Необходимо выяснить будет ли еще меньше значение критерия оптимизации при изменении границы фактора? В связи с этим принято решение расширить область определения фактора x_2 путем увеличения диаметра отверстий решетки до 9 мм (рис. 3г). Перестроена матрица плана (табл. 3), в которой заменены уровни варьирования фактора: нижний – 3 мм; основной – 6 мм;

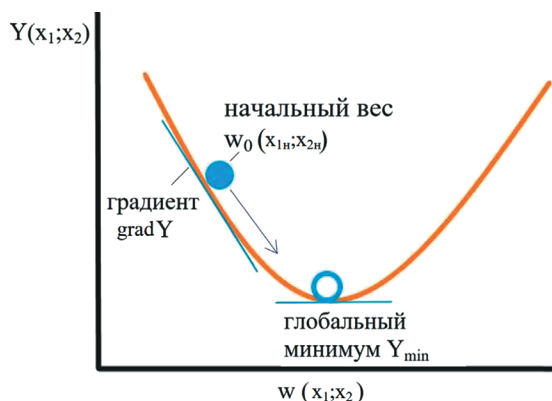


Рис. 7. Схема градиентного спуска

Fig. 7. Gradient descent diagram

верхний – 9 мм. В целях минимизации ресурсов проведен один опыт, № 7 (табл. 4), при угле наклона решётки $\alpha = 60^\circ$ и диаметре отверстий $d = 9$ мм.

В результате реализации матрицы планирования дробного факторного эксперимента получена функция отклика:

$$y = 55,665 - 0,295 \cdot x_1 - 0,9325 \cdot x_2 + 2,5975 \cdot x_1^2 + 0,455 \cdot x_1 \cdot x_2 + 2,3875 \cdot x_2^2. \quad (4)$$

Опытный коэффициент Фишера составил $F_{\text{оп}} = 1,13$, критический $F_{\text{теор}} = 2,93$. $F_{\text{оп}} < F_{\text{теор}}$, значит, функцию отклика (4) можно считать адекватной.

Исходя из анализа поверхности отклика, можно определить область оптимума (рис. 8). Минимум функции отклика наблюдается при значениях факторов x_1 и x_2 равным чуть выше основного уровня. Решение частных производных функции двух переменных позволяет определить численные значения экстремальной точки Y_{min} :

$$Y_{\text{min}} = \begin{vmatrix} \frac{\partial y}{\partial x_1} = 0 \\ \frac{\partial y}{\partial x_2} = 0 \end{vmatrix}. \quad (5)$$

По результатам расчетов получены значения факторов $x_1 = 0,04$ и $x_2 = 0,19$, при которых экстремум функции составляет $Y_{\text{min}} = E = 55,56$ Вт·ч/кг. Условие достаточности существования экстремума функции двух переменных в виде неравенства частных производных второго порядка (6) выполняется как

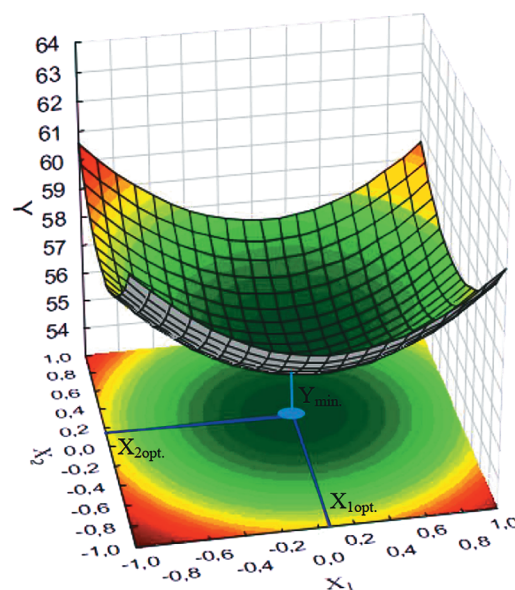
$$\frac{\partial^2 y}{\partial x_1^2} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial (x_1 x_2)^2} - \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x_2^2} \right)^2 > 0 \text{ и } \frac{\partial^2 y}{\partial x_1^2} > 0. \quad (6)$$

При переводе в натуральные значения факторов получается, что угол наклона решётки составляет $\alpha = 60,6^\circ$, а диаметр отверстий решётки $d = 6,57$ мм. По технологическим соображениям настроечными параметрами пассивного измельчителя при приготовлении зерновой патоки из ржи приняты $\alpha = 60^\circ$

Таблица 4
Матрица плана неполного факторного эксперимента

Incomplete factorial experiment design matrix

Опыты Experiments	Факторы / Factors		Критерий оптимизации Optimization criterion y
	x_1	x_2	
1	-	-	62,70
2	0	-	58,25
3	+	-	61,20
4	-	0	58,19
5	0	0	56,40
6	+	0	57,60
7	0	+	57,12

Рис. 8. Поверхность отклика и карта линий уровня критерия оптимизации y при определении оптимальных значений факторов x_1 и x_2 Fig. 8. Response surface and line map of optimization criterion level y when determining optimal values of factors x_1 and x_2

и $d = 6$ мм, так как при таких параметрах удельные энергозатраты находятся в области минимального значения и отличаются от определенных теоретически не более чем на 1,3%.

Выводы

С использованием методики планирования активного эксперимента решена задача по оптимизации параметров пассивного измельчителя. Определены его оптимальные настроечные параметры: угол наклона решётки $\alpha = 60^\circ$ и диаметр отверстий решётки $d = 6$ мм. При таких значениях удельные энергозатраты процесса приготовления зерновой патоки из ржи будут составлять 56,4 Вт·ч/кг.

Список использованных источников

1. Перевозчиков А.В., Воробьева С.Л., Березкина Г.Ю. Влияние зерновой патоки в рационах коров на качественные характеристики сырого молока и продуктов его переработки // Аграрный вестник Урала. 2019. № 7 (186). С. 51-58. https://doi.org/10.32417/article_5d52af4470c055.81551465
2. Передня В.И., Башко Ю.А., Хруцкий В.И., Романович А.А. Обоснование устройств для глубокой переработки зернофуража в низкомолекулярные легкоусвояемые корма // Вестник ВНИИМЖ. 2018. № 4 (32). С. 57-63. EDN: YNVDTN.
3. Приловская Е.И. Эффективность использования в кормлении коров кормового продукта «Патока зерновая» // Зоотехническая наука Беларуси. 2019. Т. 54, № 2. С. 46-55. EDN: EXSBAB.
4. Булатов С.Ю., Сизова Ю.В., Нечаев В.Н. Приготовление зерновой патоки из зерна // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2021. № 4 (67). С. 143-146. EDN: NSVEJV.
5. Сергеев А.Г., Савиных П.А., Булатов С.Ю., Нечаев В.Н., Шамин А.Е. Малозатратная установка для производства зерновой патоки // Сельский механизатор. 2020. № 5-6. С. 26-27. EDN: BWPXHD.
6. Булатов С.Ю., Нечаев В.Н., Семенов С.В., Сергеев А.Г., Зыкин А.А. Результаты исследований работы установки для приготовления жидких сахаристых кормов из зерна ржи // Техника и технологии в животноводстве. 2022. № 4 (48). С. 51-55. <https://doi.org/10.51794/27132064-2022-4-51>
7. Кравченко К.И., Минеева Т.А. Использование линейного коэффициента корреляции для определения характера связи между переменными // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 82-2. С. 26-30. <https://doi.org/10.18411/trnio-02-2022-41>
8. Янишевская Н.А., Болодурина И.П. Применение технологий компьютерного зрения для разработки модели распознавания поражений культурных растений // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2021. Т. 21, № 3. С. 5-13. <https://doi.org/10.14529/ctcr210301>

Автор несет ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 12.01.2023; поступила после рецензирования и доработки 05.04.2023; принята к публикации 06.04.2023

References

1. Perevozchikov A.V., Vorobieva S.L., Berezkina G. Yu. Influence of grains molasses in cows rations on qualitative characteristics of raw milk and products of its treatment. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2019;7:51-58. (In Rus.) https://doi.org/10.32417/article_5d52af4470c055.81551465
2. Perednya V.I., Bashko Yu.A., Khrutsky V.I., Romanovich A.A. Designing devices for deep processing of grain fodder into low molecular weight easily digestible feed. *Vestnik vsereossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva*. 2018;4:57-63. (In Rus.)
3. Prilovskaya E.I. Efficiency of feed product "Grain molasses" in cows feeding. *Zootekhnicheskaya nauka Belarusi*. 2019;54(2):46-55. (In Rus.)
4. Bulatov S.Y., Sizova Yu.V., Necheaev V.N. Preparation of grain molasses. *Bulletin of Michurinsk State Agrarian University*. 2021;4:143-146. (In Rus.)
5. Sergeev A.G., Savinykh P.A., Bulatov S.Yu., Nechaev V.N., Shamin A.E. Low-cost plant for the production of molasses. *Selskiy mekhanizator*. 2020;5-6:26-27. (In Rus.)
6. Bulatov S.Yu., Nechaev V.N., Semenov S.V., Sergeev A.G., Zysin A.A. Study results describing the operation of the Installation for liquid sugary feed preparation from rye grain. *Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve = Machinery and technologies in livestock*. 2022;4:51-55. (In Rus.) <https://doi.org/10.51794/27132064-2022-4-51>
7. Kravchenko K.I., Mineeva T.A. Using the linear correlation coefficient to determine the nature of the relationship between variables. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya = Trends in the Development of Science and Education*. 2022;82-2:26-30. (In Rus.)
8. Yanishevskaya N.A., Bolodurina I.P. Application of computer vision technologies for the development of a model to recognize lesions of cultivated plants. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technologies, automatic control, radio electronics*. 2021;21(3):5-13. (In Rus.) <https://doi.org/10.14529/ctcr210301>

The author bears responsibility for plagiarism.

Received 12.01.2023; revised 05.04.2023; accepted 06.04.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК: 631.171:004

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-49-56



Интеллектуальная система управления сельскохозяйственными роботами: формирование структуры

Иван Александрович Старостин, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

starwan@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8890-1107>

Светлана Александровна Давыдова, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник

davidova-sa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1219-3335>

Александр Вадимович Ещин✉, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

eschin-vim@yandex.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-9368-7758>

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

Аннотация. Цифровые технологии, внедряемые в сельское хозяйство, направлены на повышение эффективности производства сельскохозяйственной продукции. Сельскохозяйственные роботы, осуществляющие технологические операции, мониторинг состояния поля, посевов или урожайности культур при географической удаленности от облачного хранилища, низкой пропускной способности и ненадежности сети, значительных задержках и сбоях в передаче информации, могут снижать свою производительность, качество выполнения работ и безопасность эксплуатации. С целью повышения производительности агрегатов в составе с беспилотными роботизированными техническими средствами сельскохозяйственного назначения, обеспечения высокого качества выполнения ими технологических операций, а также их безопасной эксплуатации предложена интеллектуальная система управления с применением технологий граничных вычислений на базе Edge Computing. При проведении исследований применялись методы комплексного структурно-динамического анализа и экспертно-аналитический способ обработки информации. В результате проведенных исследований предложена структурно-функциональная схема интеллектуальной системы управления сельскохозяйственными агрегатами в составе с роботизированными техническими средствами, позволяющая централизованно контролировать технологический процесс. Сельскохозяйственные машины осуществляют настройку рабочих органов и корректировку их работы с помощью встроенных автономных систем контроля, передающих данные в систему управления для выработки команд. Реализация концепции Edge Computing в цифровом сельском хозяйстве позволит снизить объем передаваемой информации и нагрузку на сеть передачи данных без снижения качества проведения технологического процесса при сбоях в работе сельскохозяйственной машины и встроенных систем.

Ключевые слова: цифровое сельское хозяйство, цифровые технологии, интеллектуальная система управления, система управления, система контроля, граничные вычисления, Edge Computing, сеть передачи данных

Формат цитирования: Старостин И.А., Давыдова С.А., Ещин А.В. Интеллектуальная система управления сельскохозяйственными роботами: формирование структуры // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 3. С. 49-56. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-49-56>.

© Старостин И.А., Давыдова С.А., Ещин А.В., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Intelligent agricultural robot control system: structure formation

Ivan A. Starostin, CSc (Eng), Senior Research Engineer

starwan@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8890-1107>

Svetlana A. Davydova, CSc (Eng), Lead Research Engineer

davidova-sa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1219-3335>

Aleksandr V. Eshchin✉, CSc (Eng), Senior Research Engineer

eschin-vim@yandex.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-9368-7758>

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

Abstract. Digital technologies introduced into agriculture are aimed at improving the efficiency of agricultural production. Agricultural robots carrying out technological operations, monitoring the field, crops, or crop yields

may reduce their productivity, quality and safety of operation due to the geographical distance from the cloud storage, low bandwidth and network unreliability, significant delays and failures in data transmission. To increase the performance of units with unmanned robotic technical means for agricultural purposes, to ensure the high quality of their technological operations, as well as their safe operation, an intelligent control system using edge computing technologies based on Edge Computing is proposed. During the research, the authors used methods of complex structural-dynamic analysis and an expert-analytical method of information processing. As a result of the research, a structural and functional diagram of an intelligent control system for agricultural units with robotic technical means has been proposed to ensure centralized control of the technological process. Agricultural machines adjust the working tools and their operation process using built-in autonomous control systems that transmit data to the control system to generate commands. The operation of the working tools is adjusted in case of serious failures in the unit operation. The implementation of the Edge Computing concept in digital agriculture will reduce the amount of transmitted information and the load on the data transmission network, without reducing the technological process quality in case of failures in the operation of farm machines and embedded systems.

Keywords: digital agriculture, digital technologies, intelligent control system, control system, monitoring system, edge computing, Edge Computing, data communication network

For citation: Starostin I.A., Davydova S.A., Eshchin A.V. Intelligent agricultural robot control system: structure formation. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(3):49-56. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-49-56>.

Введение. В современном сельскохозяйственном производстве сохраняется ряд проблем, связанных со снижением темпов роста урожайности сельскохозяйственных культур, производительности труда, низким уровнем энергоэффективности и экологичности производства, которые до настоящего времени не удалось эффективно решить. Большие надежды возлагаются на цифровые технологии, которые должны способствовать повышению эффективности производства сельскохозяйственной продукции и стать драйвером развития агропромышленного комплекса [1]. Ожидается, что комплексное применение цифровых технологий в сельском хозяйстве позволит обеспечить условия для максимальной реализации продукционного потенциала сельскохозяйственных культур, обеспечения наивысшего качества получаемой продукции и экологической безопасности производства, оптимизировать издержки производства, повысить производительность и улучшить условия труда [2].

С целью интенсификации и систематизации процесса цифровой трансформации сельского хозяйства Минсельхозом России разработан ведомственный проект «Цифровое сельское хозяйство», который предусматривает комплекс мероприятий по внедрению цифровых, информационных и интеллектуальных технологий в АПК с помощью модуля «Агрорешения». Проектом планируется создание подсистем сбора и хранения данных о землях сельскохозяйственного назначения, семенах, удобрениях, сельскохозяйственных машинах и т.д. Базовыми технологиями для развития данных подсистем выступают дистанционное зондирование, радиочастотная идентификация, интернет вещей (IoT), облачные

технологии, инструменты обработки больших данных «Big Data», искусственный интеллект (AI) и роботизация рутинных процессов.

Одной из главных задач разрабатываемой платформы является автоматизация производственных процессов за счет внедрения цифровых и интеллектуальных систем контроля и управления технологическими процессами производства сельскохозяйственной продукции. Реализация проекта по цифровой трансформации сельского хозяйства приведет к значительному росту потока передаваемых данных, в том числе от устройств и сельскохозяйственной техники, расположенных непосредственно в поле, что увеличит нагрузку на сельские мобильные сети, которые имеют невысокую скорость передачи данных и недостаточную зону покрытия [3, 4].

Учеными прогнозируется, что дальнейшее развитие сельского хозяйства и сельскохозяйственной техники будет базироваться на применении искусственного интеллекта и роботизированных систем, внедрении «умных» и «подключенных» машин, которые в дальнейшем позволят реализовать автономное выполнение технологических операций. Искусственный интеллект будет выполнять функции управления на основе прогнозирования и планирования хозяйственной деятельности, а также контроля и управления производством [5]. Сельскохозяйственные машины в свою очередь будут выполнять технологические операции в соответствии с принятыми управленческими решениями, собирать и передавать необходимые данные.

Большой массив информации о текущих параметрах технологического процесса, окружающей среде и состоянии биологических сельскохозяйственных

объектов может усугубить вышеописанную проблему передачи информации. Низкая скорость передачи данных, их задержка или потеря при эксплуатации автономных роботов могут негативно отразиться на качестве выполнения технологических операций, производительности агрегата и безопасности его эксплуатации [6], поэтому целесообразно учитывать возможность возникновения данной проблемы, ее последствия и пути решения на этапе формирования цифровых систем управления технологическими процессами.

Расширение зоны покрытия сельской местности мобильным интернетом и повышение скорости передачи данных требуют финансовых затрат на модернизацию существующего или установку нового оборудования, что может оказаться экономически нецелесообразным при обеспечении функционирования автономных сельскохозяйственных роботов. Одним из путей решения может стать разработка интеллектуальной системы управления роботизированными техническими средствами сельскохозяйственного назначения с применением технологий граничных вычислений [7].

Цель исследований: разработка структуры интеллектуальной системы управления с применением технологий граничных вычислений, которая позволит повысить производительность агрегатов в составе с беспилотными роботизированными техническими средствами сельскохозяйственного назначения, обеспечить наивысшее качество выполнения ими технологических операций, а также их безопасную эксплуатацию.

Материалы и методы. При проведении анализа основных технологий управления технологическими процессами производства сельскохозяйственной продукции применялись методы комплексного структурно-динамического анализа и экспертно-аналитический способ обработки информации.

Результаты и их обсуждение. С целью цифровизации сельского хозяйства исследователями предлагается создание отраслевых цифровых платформ управления с применением информационно-управляющих систем. При реализации данного подхода информация со всех средств мониторинга (метеостанции, полевые датчики, средства мониторинга окружающей среды, технологического процесса и технического состояния сельскохозяйственной техники и др.) собирается в облачной геоинформационной системе, формирующей единую базу данных, хранящую информацию обо всех проведенных на каждом участке технологических операциях, параметрах и качестве их реализации [8]. При этом необходимо обеспечить возможность сельскохозяйственных машин принимать,

собирать, обрабатывать и передавать данные в общую систему, а также осуществлять обмен данными между собой [9].

Реализация данного подхода в растениеводстве требует серьезного развития сельскохозяйственных машин. Они должны совершить переход от простых технических средств, осуществляющих технологические операции, к дистанционно управляемым сельскохозяйственным роботам и автономным роботизированным машинно-тракторным агрегатам [10].

Существующие системы управления сельскохозяйственной техникой включая системы параллельного вождения разрабатываются исходя из условия наличия оператора технического средства, осуществляющего, как минимум, контроль за движением и протеканием технологического процесса. При этом генерируемые таким техническим средством данные без существенной обработки собираются и передаются на удаленный терминал [11]. Переход к роботизированному сельскохозяйственному производству предусматривает применение интеллектуальной системы управления, анализирующей поступающие в облачное хранилище данные, которая берет на себя функции контроля и управления техническими средствами, а роль человека ограничивается удаленным контролем за выполнением работ.

Энергетические средства автономных роботизированных систем должны выполнять несколько функций: как тяговое или приводное средство для сельскохозяйственной машины, как устройство управления параметрами технологического процесса и как средство мониторинга состояния поля, посевов или урожайности культур.

Таким образом, применяющиеся в сельском хозяйстве технические средства должны оснащаться большим количеством устройств мониторинга (датчики, сенсоры, чипы и т.п.), становиться элементами общей сети интернета вещей, взаимодействующими как между собой, так и с окружающей средой [12]. При этом для корректного функционирования интеллектуальной системы управления и роботизированных технических средств возникает необходимость передачи, хранения и обработки достаточно больших объемов информации. Эти данные могут включать в себя параметры протекания технологического процесса, данные о местоположении, траектории, скорости движения, информацию с лидаров, камер, средств мониторинга и т.д. [13].

При создании информационно-управляющих систем предусматривается прямое взаимодействие между расположенной на облачном сервере системой управления и сельскохозяйственным роботом, передающим необработанные данные в облачный сервер

для дальнейшего анализа. В результате формируется большой объем информации, который зачастую необходимо проанализировать в режиме реального времени и выработать оптимальные управленческие решения. Однако ввиду географической удаленности сельскохозяйственной техники от системы управления (облачного сервера), ограниченной пропускной способности и низкой надежности сельской сети (особенно при одновременном обслуживании нескольких полевых устройств) могут возникать значительные задержки и сбои в передаче информации, ввиду чего время отклика управляющей системы существенно увеличивается (рис. 1) [14, 15]. Вследствие этого безопасная эксплуатация роботизированной сельскохозяйственной техники становится затруднительной.

Решить обозначенные проблемы можно с помощью периферийной концепции Edge Computing («Граничные вычисления»), дополняющей существующую облачную модель использования данных. Суть ее заключается в сборе данных средствами мониторинга и передаче на устройство обработки данных (локальный узел), расположенное непосредственно рядом с этими средствами, – например, на самой сельскохозяйственной машине или энергосредстве. Локальный узел обрабатывает поступающую информацию, анализирует сценарии развития, выдает корректирующие команды, обработанную информацию передает

на облачный сервер и получает от него обновленные управляющие команды [16].

Реализация концепции Edge Computing в цифровом сельском хозяйстве позволяет повысить уровень безопасности передачи данных; защитить информацию от потери, так как при потере соединения с облачным сервером локальные узлы продолжают собирать и обрабатывать информацию; снизить объемы передаваемой информации, трафик и нагрузку на мобильную сеть передачи данных [14-16].

В сельскохозяйственном производстве технологическая операция посева является одной из наиболее ответственных и требующих контроля множества параметров, поэтому в качестве примера выбран агрегат для посева. При реализации технологий Edge Computing граничные вычисления осуществляются непосредственно в вычислительных узлах посевного комплекса и роботизированного технического средства, в которые поступают данные как от отдельных узлов машин, так и от других технических средств и устройств (рис. 2).

Рассмотрим структурно-функциональную схему предлагаемой интеллектуальной системы управления и алгоритм ее работы на примере роботизированного посевного агрегата (РА), состоящего из роботизированного мобильно-энергетического средства (РМЭС) и посевного комплекса, оснащенных системами контроля и управления технологическим процессом, устройствами сбора, обработки и передачи информации (рис. 3). Предлагаемая структура интеллектуальной системы управления роботизированным посевным агрегатом включает в себя облачную интеллектуальную систему управления – систему верхнего уровня; систему управления (вычислительный узел) роботизированного мобильно-энергетического средства – систему среднего уровня; систему управления (вычислительный узел) посевного комплекса – систему нижнего уровня. Интеллектуальная система управления имеет доступ к базе данных и способна на основании результатов обработки, имеющихся в базе и вновь поступающих данных, строить прогностические модели и вырабатывать оптимальные управляющие сигналы.

Предлагаемая структура интеллектуальной системы управления функционирует следующим образом. Осуществив анализ данных, интеллектуальная система управления выдает решение о проведении технологической операции «Посев». Для роботизированного посевного агрегата задаются следующие данные: координаты поля, на котором необходимо засеять определенную культуру; состав агрегата с указанием конкретных формирующих РА технических средств (с указанием индивидуальных номеров

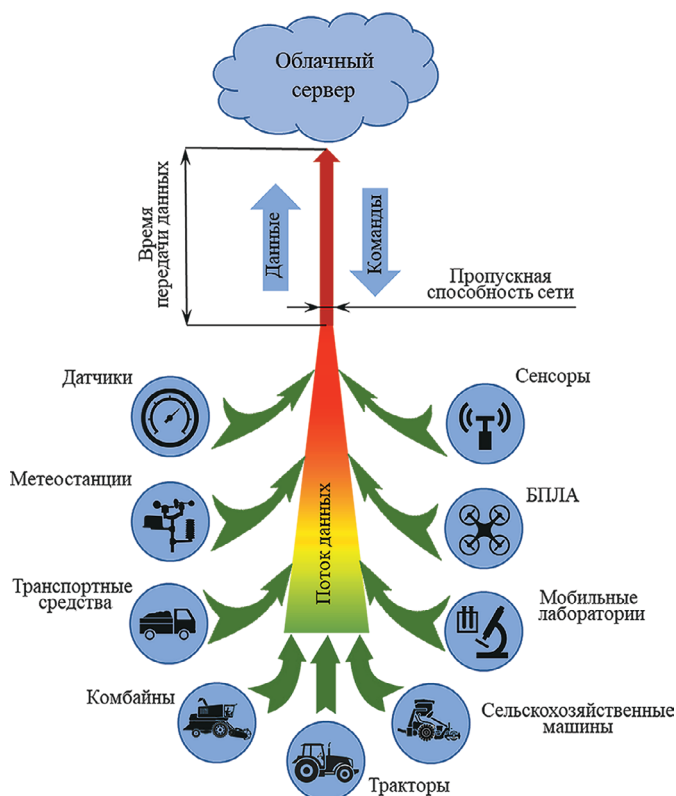


Рис. 1. Схема передачи необработанных данных в систему управления

Fig. 1. Diagram of raw data transfer to the control system

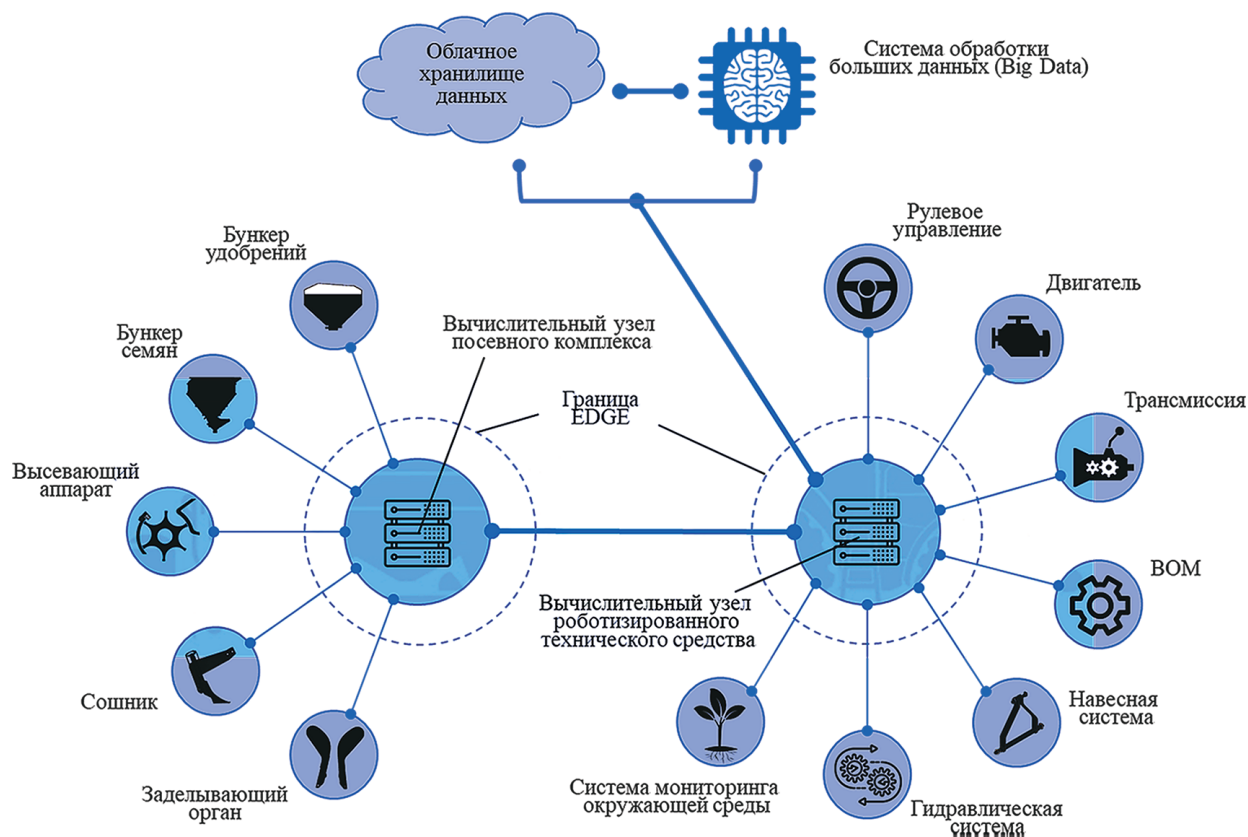


Рис. 2. Принципиальная схема реализации технологий Edge Computing в управлении роботизированными сельскохозяйственными агрегатами на примере посевного агрегата

Fig. 2. Schematic diagram of implementation of Edge Computing technologies in controlling robotic agricultural unit as exemplified by a seeding unit

машин); норма высева семян; глубина высева семян; норма внесения удобрений; рабочая скорость, траектория движения и т.д. В систему приема и обработки управляющих сигналов РМЭС передается команда о комплектовании агрегата.

Система комплектования и предоперационной подготовки агрегата осуществляет диагностику РМЭС. При исправном состоянии комплекса и возможном агрегатировании РМЭС направляется к посевному комплексу для формирования посевного агрегата. Сформированный посевной агрегат далее направляется на склад для загрузки семян или непосредственно в поле, двигаясь по заданному управляющей системой маршруту. При этом РМЭС должно быть оснащено собственной системой управления, корректирующей маршрут, траекторию и скорость движения в случае непредвиденных ситуаций, возникающих как в полевых условиях, так и на дорогах общего пользования.

По прибытии на заданное поле управляющая система дает команду о начале выполнения технологической операции. Система приема и обработки управляющих сигналов РМЭС передает в системы управления параметрами технологического процесса и контроля технологического процесса РМЭС

информацию о заданных траекториях и скорости движения; о включении и отключении высевающего аппарата или отдельных секций на разворотных полосах и определенных участках поля. В систему приема и обработки управляющих сигналов посевного комплекса поступает информация о заданной норме высева семян, глубине высева, норме внесения удобрений, включении и отключении высевающего аппарата или отдельных секций в процессе работы. Система контроля технологического процесса РМЭС сравнивает поступившую информацию с параметрами, заданными управляющей системой, и в случае отклонения передает корректирующий сигнал в систему управления технологическим процессом. Дополнительно эта система осуществляет мониторинг уровня семян и удобрений в бункерах.

Система управления режимом работы агрегатов РМЭС обеспечивает оптимальную загрузку двигателя и минимальный расход топлива при осуществлении технологической операции. Система контроля технического посевного комплекса осуществляет постоянную диагностику технического состояния его узлов и агрегатов.

Автономно функционирует система мониторинга окружающей среды, которая собирает

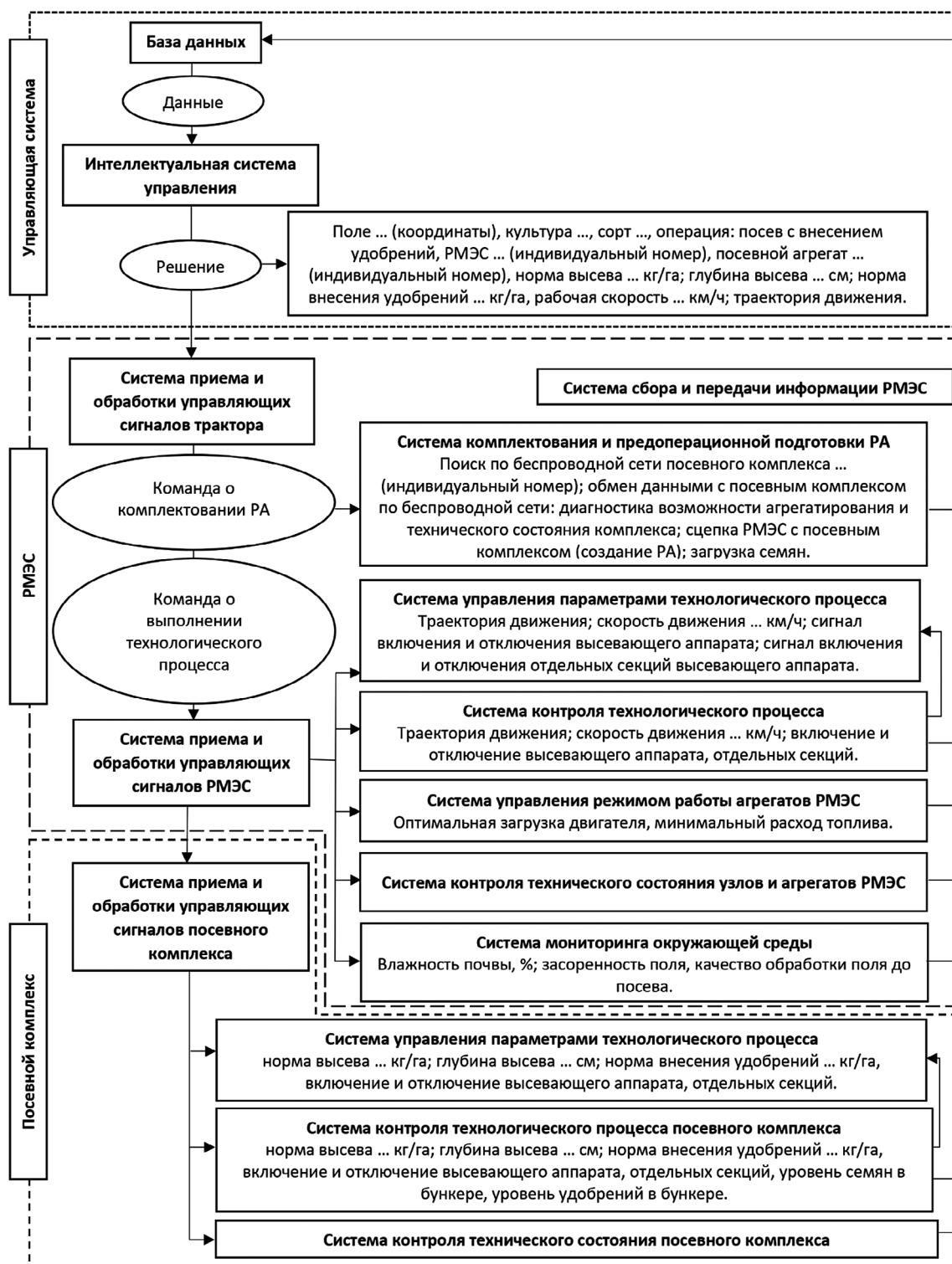


Рис. 3. Интеллектуальная система управления роботизированным посевным агрегатом.

Структурно-функциональная схема:

PMЭC – роботизированное мобильно-энергетическое средство; РА – роботизированный посевной агрегат

Fig. 3. Intelligent control system for a robotic seeding unit. Schematic diagram:

PMЭC – robotized mobile energy vehicle; РА – robotized seeding unit

информацию о влажности почвы, засоренности поля, качестве подготовки поля, фитосанитарном состоянии и т.д. Собранная информация через систему сбора и передачи информации PMЭC передается в базу данных.

Система приема и обработки управляющих сигналов посевного комплекса передает через систему приема и обработки управляющих сигналов PMЭC информацию о заданных параметрах технологического процесса (норма высева семян, глубина высева,

норма внесения удобрений, включение и отключение высевающего аппарата или отдельных секций) и направляет ее в системы управления параметрами технологического процесса, контроля технологического процесса посевного комплекса и контроля технического состояния посевного комплекса. Корректировка работы рабочих органов осуществляется за счет встроенных автономных систем (системы контроля), которые передают данные в систему управления для выработки команд только в случае существенных отклонений.

Реализация интеллектуальной системы управления сельскохозяйственными роботами требует разработки как отдельных элементов формируемой сети передачи данных, так и протокола обмена информацией между интеллектуальной системой управления, роботизированным мобильным энергетическим средством, рабочей машиной и их внутренними системами с целью обеспечения быстрой, беспрепятственной и защищенной передачи данных и для согласования их работы.

В дальнейших исследованиях при разработке протокола передачи данных необходимо определить основные типы пользовательских данных и режимы их передачи, требуемую скорость и дальность передачи, допустимое время задержки и время передачи, объем передаваемой информации. Следует

заложить функциональные возможности обнаружения и устранения неисправностей, синхронизации времени между устройствами, обеспечить необходимый уровень защищенности и отказоустойчивости системы, ее доступность, гибкость, масштабируемость и т.д. [17].

Предлагаемый подход позволяет снизить объем передаваемой информации и нагрузку на сеть передачи данных без снижения качества проведения технологических операций при сбоях в работе сельскохозяйственной машины и встроенных систем.

Выводы

Интеллектуальная система управления сельскохозяйственными роботами, базирующаяся на применении технологий граничных вычислений, позволяет исключить возможные простои техники и возникновение чрезвычайных ситуаций, связанных с задержками и сбоями в передаче информации, увеличением времени отклика управляющей системы. Применение интеллектуальной системы управления системой дает возможность снизить объем передаваемой информации и нагрузку на сеть передачи данных, обеспечить безопасную эксплуатацию сельскохозяйственных роботов, добиться повышения качества выполнения технологических операций и увеличения производительности сельскохозяйственных агрегатов.

Список использованных источников

1. Измайлов А.Ю. Интеллектуальные технологии и роботизированные средства в сельскохозяйственном производстве // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89, № 5. С. 536-538. <https://doi.org/10.31857/S0869-5873895536-538>
2. Сибирев А.В., Дорохов А.С., Аксенов А.Г. Цифровизация машинной технологии уборки лука искусственными нейронными сетями // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2019. Т. 20, № 1. С. 84-91. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.1.84-91>
3. Цимбал В.А., Тоискин В.Е., Потапов С.Е., Шуточкин Е.А., Бонкин И.Д. Концепция применения программно-конфигурируемых сетей для управления мобильными объектами // Известия Института инженерной физики. 2016. № 1 (39). С. 25-30. EDN: VJSPJH
4. Гаврилов А.В. Проблемы цифровизации сельского хозяйства развивающихся стран // Наука без границ. 2021. № 7 (59). С. 38-45. EDN: ZHUGQG
5. Young S.N., Kayacan E., Peschel J.M. Design and field evaluation of a ground robot for high-throughput phenotyping of energy sorghum. *Precision Agric.* 2019;20:697-722. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9601-6>
6. Шелковников С.А., Петухова М.С., Алексеев А.А. Теоретические основы управления сельскохозяйственным производством на основе цифровых технологий // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Экономика». 2020. Т. 28, № 1. С. 137-145. <https://doi.org/10.22363/2313-2329-2020-28-1-137-145>
7. Moysiadis V., Tsolakis N., Katikaridis D., Sørensen C.G., Pearson S., Bochtis D. Mobile robotics in agricultural operations:

References

1. Izmaylov A.Y. Smart technologies and robotic means in agricultural production. *Vestnik Rossiyskoy Akademii Nauk = Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2019;89(5):536-538. (In Rus.) <https://doi.org/10.31857/S0869-5873895536-538>
2. Sibiriev A.V., Dorokhov A.S., Aksenov A.G. Digital transformation of machine technology for onion harvesting using the theory of artificial neural networks. *Agricultural Science of Euro-North-East*. 2019;20(1):84-91. (In Rus.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.1.84-91>
3. Tsimbal V.A., Toiskin V.Y., Potapov S.E., Shutochkin E.A., Bonkin I.D. Concept of the use of software configurable network to control mobile objects. *Izvestiya instituta inzhenernoj fiziki*. 2016;1(39):25-30. (In Rus.)
4. Gavrilov A.V. Challenges of digitalization of agriculture in developing countries. *Science without borders*. 2021;7(59):38-45. (In Rus.)
5. Young S.N., Kayacan E., Peschel J.M. Design and field evaluation of a ground robot for high-throughput phenotyping of energy sorghum. *Precision Agric.* 2019;20:697-722. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9601-6>
6. Shelkovnikov S.A., Petukhova M.S., Alekseev A.A. Theoretical bases of managing agricultural production based on digital technologies. *RUDN Journal of Economics*. 2020;28(1):137-145. (In Rus.) <https://doi.org/10.22363/2313-2329-2020-28-1-137-145>
7. Moysiadis V., Tsolakis N., Katikaridis D., Sørensen C.G., Pearson S., Bochtis D. Mobile robotics in agricultural operations: A narrative review on planning aspects. *Appl. Sci.* 2020;10(10):3453. <https://doi.org/10.3390/app10103453>

A narrative review on planning aspects. Appl. Sci. 2020;10(10):3453. <https://doi.org/10.3390/app10103453>

8. Меденников В.И. Интеграция цифровых платформ управления сельским хозяйством России и Казахстана // *Endless Light in Science*. 2022. № 3-3. С. 17-24. EDN: NXMEZO

9. Кондратьева О.В., Федоров А.Д., Слинько О.В. О перспективах развития цифровизации в растениеводстве // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2018. № 4 (29). С. 321-329. EDN: YQVPAD

10. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15, № 4. С. 6-10. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>

11. Головинов Е.Э., Аминев Д.А., Захаров А.В., Бакштанин А.М. Отечественный агромонитор для контроля работы сельскохозяйственной техники // *Природообустройство*. 2016. № 1. С. 52-57. EDN: VVWIVV

12. Starostin I.A., Belyshkina M.E., Chilingaryan N.O., Alipichev A.Yu. Digital technologies in agricultural production: implementation background, current state and development trends. *Agricultural engineering*. 2021;3(103):4-10. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-3-4-10>

13. Gao X. et al. Review of wheeled mobile robots' navigation problems and application prospects in agriculture. *IEEE Access*. 2018;6:49248-49268. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2868848>

14. Петухова Н.В., Фархадов М.П., Качалов Д.Л. Разгрузка и консолидация вычислительных ресурсов в среде туманных и граничных вычислений // *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*. 2020. № 50. С. 123-129. <https://doi.org/10.17223/19988605/50/15>

15. Винничек Е.В. Облачные, граничные и туманные вычисления. Анализ и прогноз развития технологий обработки данных // *Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта*. 2018. № 1 (5). № 4. С. 239-244. EDN: YWZWXH

16. Воробьев С.П., Широкова С.Н., Евсин В.А. Модель обмена системы распределенного реестра облачных, туманных и граничных вычислений // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2022. № 2. С. 11-21. <https://doi.org/10.14357/20718632220202>

17. Olenov V.L. Analysis of requirements for modern spacecraft onboard network protocols. *Information and Control Systems*. 2021;1:8-16. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-1-8-16>

Вклад авторов

И.А. Старостин – руководство исследованием, концептуализация, методология, администрирование проекта;

С.А. Давыдова – формальный анализ, проведение исследования, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

А.В. Ещин – проведение исследования, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование, визуализация.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 17.02.2023; поступила после рецензирования и доработки 17.04.2023; принята к публикации 20.04.2023

8. Medennikov V.I. Integration of digital agricultural management platforms in Russia and Kazakhstan. *Endless Light in Science*. 2022;3-3:17-24. (In Rus.)

9. Kondratyeva O.V., Fedorov A.D., Slinko O.V. About the prospects of planting digitalization. *Innovatsii v selskom khozyaystve*. 2018;4(29):321-329. (In Rus.)

10. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(4):6-10 (In Rus.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>

11. Golovinov E.E., Aminev D.A., Zakharov A.V., Bakshatin A.M. Domestic agromonitor for control of agricultural machinery operation. *Prirodoobustroystvo*. 2016;1:52-57. (In Rus.)

12. Starostin I.A., Belyshkina M.E., Chilingaryan N.O., Alipichev A.Yu. Digital technologies in agricultural production: implementation background, current state and development trends. *Agricultural Engineering*. 2021;3(103):4-10. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-3-4-10>

13. Gao X. et al. Review of wheeled mobile robots' navigation problems and application prospects in agriculture. *IEEE Access*. 2018;6:49248-49268. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2868848>

14. Petukhova N.V., Farkhadov M.P., Kachalov D.L. Unloading and consolidation of computing resources in the environment of fog and boundary computing. *Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 2020;50:123-129. (In Rus.) <https://doi.org/10.17223/19988605/50/15>

15. Vinnichuk E.V. Cloud computing, edge computing, fog computing: analysis and forecast of the development of data processing. *Sovremennye innovatsionnye tekhnologii podgotovki inzhenernykh kadrov dlya gornoy promyshlennosti i transporta*. 2018;1(5):239-244. (In Rus.)

16. Vorobyev S.P., Shirobokova S.N., Evsin V.A. Exchange model of a distributed registry system for cloud, fog and edge computing. *Journal of Information Technologies and Computing Systems*. 2022;2:11-21. (In Rus.) <https://doi.org/10.14357/20718632220202>

17. Olenov V.L. Analysis of requirements for modern spacecraft onboard network protocols. *Information and Control Systems*. 2021;1:8-16. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-1-8-16>

Contribution of the authors

I.A. Starostin – research supervision, conceptualization, methodology, project administration

S.A. Davydova – formal analysis, research, creation of a draft of the manuscript, creation of the final version (revision) of the manuscript and its editing

A.V. Eshchin – conducting research, creating a draft of the manuscript, creating the final version (refinement) of the manuscript and its editing, visualization

Conflict of interests

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

Received 17.02.2023; revised 17.04.2023; accepted 20.04.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 635-151:635.21

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-57-64

**Классификация ротационных рабочих органов
сельскохозяйственных машин и их траектории движения****Владимир Федорович Первушин** , д-р техн. наук, профессор¹pervushin54@mail.ru ; <https://orcid.org/0000-0003-0572-2080>**Александр Григорьевич Левшин**, д-р техн. наук, профессор²alev200151@rambler.ru <https://orcid.org/0000-0001-8010-4448>**Марат Зуфарович Салимзянов**, канд. техн. наук, доцент¹salimmar@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0877-4372>**Алексей Геннадьевич Ипатов**, канд. техн. наук, доцент¹Ipatow.al@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2637-4214>**Владимир Иванович Широбоков**, канд. техн. наук, доцент¹vlh150@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5091-1190>¹ Удмуртский государственный аграрный университет; Российская Федерация, Удмуртская Республика, 426059, г. Ижевск, ул. Студенческая, 11² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Российская Федерация, 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. Применяемые ротационные машины и орудия для возделывания сельскохозяйственных культур не в полной мере отвечают агротехническим требованиям. Для обоснования параметров рабочих органов выполнены исследования абсолютной траектории их движения и предложена классификация ротационных рабочих органов сельскохозяйственных машин по расположению оси вращения в пространстве, распределяющая их на 4 группы и 7 подгрупп: А – первая группа роторов с горизонтально-поперечной осью вращения; Б – вторая группа роторов с вертикальной осью вращения; В – третья группа роторов с продольной осью вращения; Г, Д, Е, Ж – четвертая группа роторов с расположением оси вращения в пространстве относительно системы координат OXYZ под углами α , β и γ . Представлены результаты кинематического анализа ротационных рабочих органов для классов Г, Д, Е, Ж, имеющих сложное расположение оси вращения в пространстве. В результате анализа расчетов координат траектории движения ротационных рабочих органов установлено, что в группе роторов класса Г, Д, Е траектория движения соответствует сжатой циклоиде, а для ротора класса Ж траектория представляет собой геликоиду. Полученные траектории движения материальных точек ротационных рабочих органов позволяют оценить процесс взаимодействия рабочих органов с почвой и растительным материалом, обосновать геометрические параметры рабочих органов, частоту вращения ротора, поступательную скорость сельскохозяйственной машины.

Ключевые слова: классификация ротационных рабочих органов, скорость машины, траектория движения, ротор

Формат цитирования: Первушин В.Ф., Левшин А.Г., Салимзянов М.З., Ипатов А.Г., Широбоков В.И. Классификация ротационных рабочих органов сельскохозяйственных машин и их траектории движения // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 3. С. 57-64. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-57-64>.

© Первушин В.Ф., Левшин А.Г., Салимзянов М.З., Ипатов А.Г., Широбоков В.И., 2023

ORIGINAL ARTICLE

**Classification of rotary cultivation tools of agricultural machines
and their motion trajectories****Vladimir F. Pervushin** , DSc (Eng), Professor¹pervushin54@mail.ru ; <https://orcid.org/0000-0003-0572-2080>**Aleksandr G. Levshin**, DSc (Eng), Professor²alev200151@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8010-4448>**Marat Z. Salimzyanov**, CSc (Eng), Associate Professor¹salimmar@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0877-4372>

Aleksei G. Ipatov, CSc (Eng), Associate Professor¹

ipatow.al@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2637-4214>

Vladimir I. Shirobokov, CSc (Eng), Associate Professor¹

vlh150@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5091-1190>

¹Udmurt State Agrarian University; Russian Federation, Udmurt Republic, 426059, Izhevsk, Studencheskaya Str., 11

²Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow 127434, Russian Federation

Abstract. The rotary machines and implements used for the cultivation of agricultural crops do not fully meet the agrotechnical requirements. To determine the parameters of the working tools, the authors studied the absolute trajectory of their movement and classified rotary working tools of agricultural machines according to the special location of their rotation axis, dividing them into four groups and seven subgroups: A – the first group of rotors with a horizontal-transverse axis of rotation; B – the second group of rotors with a vertical axis of rotation; C – the third group of rotors with a longitudinal axis of rotation; D, D, E and F are the fourth group of rotors with the axis of rotation located in space relative to the coordinate system XYZ at angles α , β , and γ . The article presents kinematic analysis results for rotary working tools of classes G, D, E, W having a complex location of the axis of rotation in the space. The analysis of calculating the coordinates of the motion trajectory of rotary working tools showed that for the group of rotors of class G, D, E, the motion trajectory corresponds to a compressed cycloid, and for a rotor of class G, the trajectory represents a helicoid. The obtained motion trajectories of material points of rotary working tools can be used to evaluate the process of interaction of working tools with the soil and plant material, to determine the geometric parameters of working tools, the rotor speed, and the translational speed of an agricultural machine.

Keywords: classification of rotating tools, machine speed, trajectory, rotor

For citation: Pervushin V.F., Levshin A.G., Salimzyanov M.Z., Ipatov A.G., Shirobokov V.I. Classification of rotary cultivation tools of agricultural machines and their motion trajectories. Agricultural Engineering (Moscow), 2023;25(3):57-64. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-57-64>.

Введение. Пассивные рабочие органы почвообрабатывающих машин и орудий движутся по прямолинейной траектории, поэтому интенсивность деформации и рыхления почвы недостаточна и зависит в основном от их геометрической формы. Для повышения интенсивности рыхления почвы и уничтожения сорняков используют активные (ротационные) устройства¹ [1-3].

Основными параметрами, характеризующими ротационные рабочие органы, являются вид траектории движения, величина и направление скорости рабочих элементов ротора, а в ряде случаев – величина и направление ускорения. Интенсивность деформации почвы и уничтожения сорняков ротационными рабочими органами в большей степени определяется траекторией их движения [4-8].

Цель исследований: провести анализ траектории движения материальных точек ротационных рабочих органов сельскохозяйственных машин.

Материалы и методы. Траектория движения материальных точек ротационных рабочих органов сельскохозяйственных машин определялась на основе их классификации, учитывающей расположение оси

вращения в пространстве ротационных рабочих органов, подразделяющей их на 4 группы и 7 подгрупп:

А – первая группа роторов с поперечно-горизонтальной осью вращения;

Б – вторая группа роторов с вертикальной осью вращения;

В – третья группа роторов с продольно-горизонтальной осью вращения;

Г, Д, Е, Ж – четвертая группа роторов, у которых оси вращения располагаются относительно системы координат OXYZ под углами α , β , γ [9-13].

К первой группе роторов А следует отнести рабочий орган машины для удаления ботвы картофеля с расположением оси вращения в поперечно-горизонтальной плоскости, то есть совпадающей с направлением оси координат У (рис. 1).

Ко второй группе роторов класса Б можно отнести, например, ротор ботводробителя с вертикальной осью вращения (рис. 2).

Третья группа роторов класса В имеет ось вращения, совпадающую с направлением поступательной скоростью машины. К этой группе роторов относится рабочий орган картофелекопателя КТН-1Б (рис. 3).

Четвертая группа роторов класса Г, Д, Е, Ж – с осью вращения, расположенной под углом α , β и γ относительно трехмерной системы координат OXYZ. К этой группе роторов относится ротационный рыхлитель культиватора для ухода за растениями картофеля (рис. 4).

¹ Бицоев Б.А., Гаспарян И.Н., Левшин А.Г., Щиголов С.В. Обоснование параметров и режимов работы устройства для декапитации: Монография. М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2021. 112 с. EDN: EFSLRA

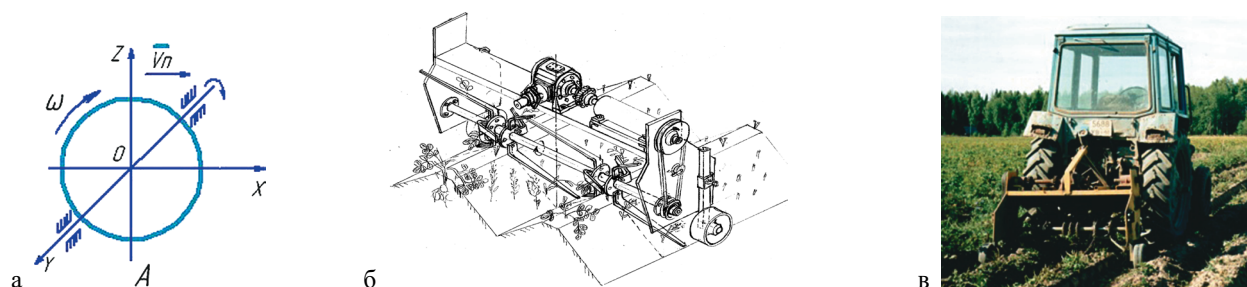


Рис. 1. Рабочий орган ботводроителя с горизонтально-поперечной осью вращения по отношению к направлению движения агрегата (первая группа роторов):
а – схема кинематическая; б – схема технологическая; в – общий вид

Fig. 1. Working tool of the haulm shredder with a horizontal-transverse rotation axis in relation to the direction of the unit's motion (the first group of rotors):

а – kinematic scheme; б – technological scheme; в – general view

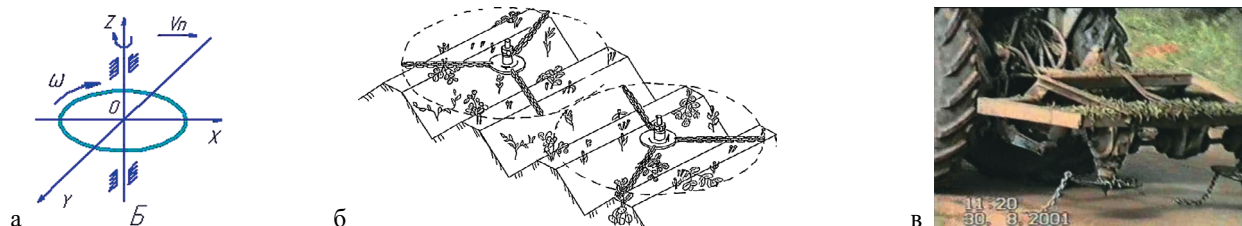


Рис. 2. Ботводроитель с вертикальной осью вращения (вторая группа роторов):
а – схема кинематическая; б – схема технологическая; в – общий вид цепного ботводроителя (РЛЗ-4)

Fig. 2. Haulm shredder with a vertical rotation axis (the second group of rotors):
а – kinematic scheme; б – technological scheme; в – general view of the chain haulm shredder (RLZ-4)

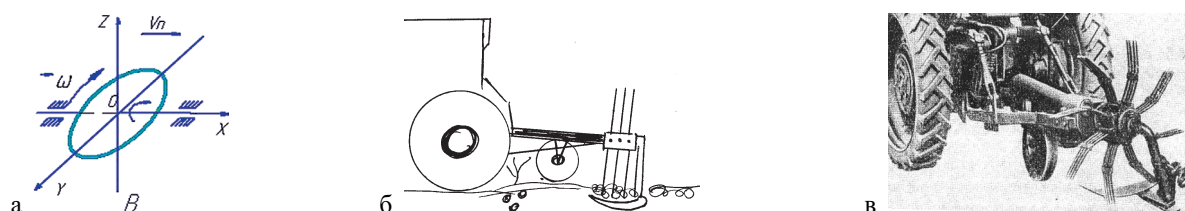


Рис. 3. Картофелекопатель КТН-1Б с горизонтальной осью вращения ротора, совпадающей с направлением движения агрегата (класс В, третья группа роторов):
а – схема кинематическая; б – схема технологическая; в – общий вид картофелекопателя

Fig. 3. Potato digger KTN-1B with a horizontal rotation axis of the rotor coinciding with the direction of the unit's motion (class B, the third group of rotors):

а – kinematic scheme; б – technological scheme; в – general view of the potato digger

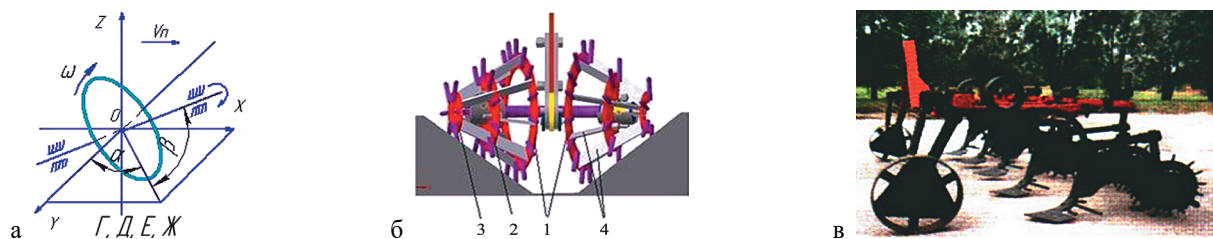


Рис. 4. Культиватор для ухода за растениями картофеля с ротационным рыхлителем, расположенным под углом наклона α , β , γ относительно трехмерной системы координат OXYZ (четвертая группа роторов):
а – кинематическая схема; б – технологическая схема; в – общий вид культиватора

Fig. 4. Potato cultivator with a rotary ripper located at an angle of inclination α , β and γ relative to the three-dimensional coordinate system OXYZ (the fourth group of rotors):

а – kinematic scheme; б – technological scheme; в – general view of the cultivator

В зависимости от расположения оси вращения ротора в пространстве первые две группы роторов класса А и Б совершают плоско-параллельное движение

и их абсолютная траектория движения описывается на плоскости, перпендикулярной оси вращения ротора, в виде циклоид, которые характеризуются показателем

кинематического режима работы λ и могут быть удлиненными при $\lambda > 1$, обыкновенными при $\lambda = 1$ (что характерно для катков и опорно-приводных колес сельскохозяйственных машин), укороченными $\lambda < 1$ (что характерно для борон ротационно-реактивного типа [4-6]).

Для четвертой группы роторов класса Г, Д, Е, Ж, расположенных под углом наклона α, β, γ относительно трехмерной системы координат $OXYZ$, кинематика и абсолютная траектория движения в настоящее время недостаточно изучены.

Кинематический анализ роторов класса Г, Д, Е, Ж проведен относительно неподвижной прямоугольной системы координат $OXYZ$. Уравнения абсолютной траектории движения материальной точки получены на основе пакета Matcad 11.

Результаты и их обсуждение. Описание кинематики ротора начнём с рассмотрения движения точки, принадлежащей ротору и расположенной на расстоянии радиуса r , вращающегося с постоянной угловой скоростью $\omega = 2\pi n/60$ вокруг оси ротора

в неподвижной системе координат $OXYZ$ с поступательной скоростью машины V_m вдоль оси OX .

Любая точка ротора в относительном движении за время t_i поворачивается на угол $\varphi_i = \omega \cdot t_i$, а в переносном движении ротор перемещается поступательно вдоль оси абсцисс на расстояние $V_m \cdot t_i$ или $V_m \cdot \varphi_i / \omega$. Поэтому координаты траектории движения точки рабочего органа складываются из относительного и переносного движения. За начало отсчета траектории движения материальной точки принимаем нижнее вертикальное положение в пространстве относительно плоскости OXY при $t = 0$ [7-13].

Расчеты и построение траекторий движения выполнены при следующих исходных данных:

- обороты ротора $n = 180 \text{ мин}^{-1}$;
- угол поворота ротора $\varphi = 0, \pi/12 \dots 2\pi k$;
- число оборотов $k = 3$;
- поступательная скорость машины $V_m = 3 \text{ м/с}$;
- углы наклона оси вращения ротора относительно положительных осей координат OX, OY, OZ $\alpha = \beta = \gamma = \pi/6$ (рис. 5-8).

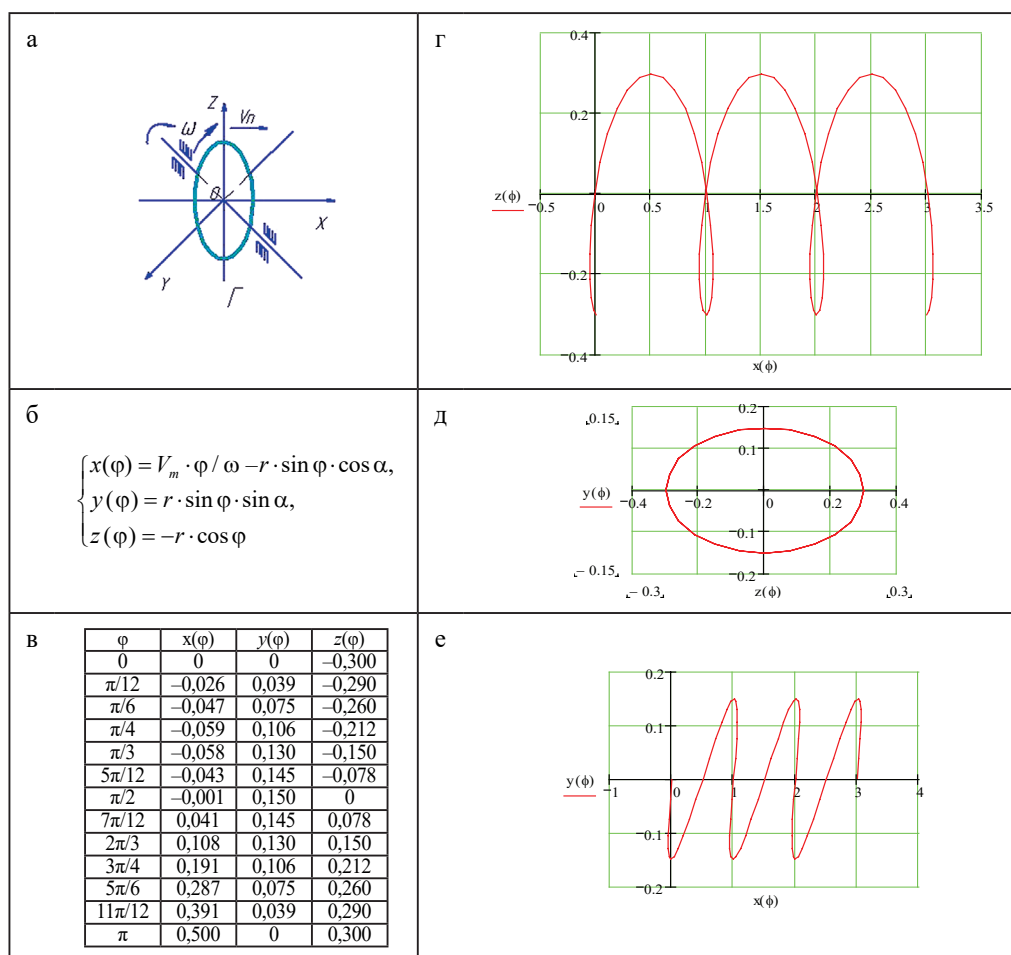


Рис. 5. Результаты кинематического анализа ротационного рабочего органа класса Г:

а – схема ротора класса Г; б – система уравнений абсолютной траектории движения точки; в – результаты расчета; г, д, е – проекции траектории на прямоугольные плоскости системы координат $OXYZ$

Fig. 5. Kinematic analysis results for a rotary working tool of class G:

a – diagram of a class G rotor; b – system of equations for the absolute trajectory of the point; c – calculation results; d, e, f – projections of the trajectory on rectangular planes of the $OXYZ$ coordinate system

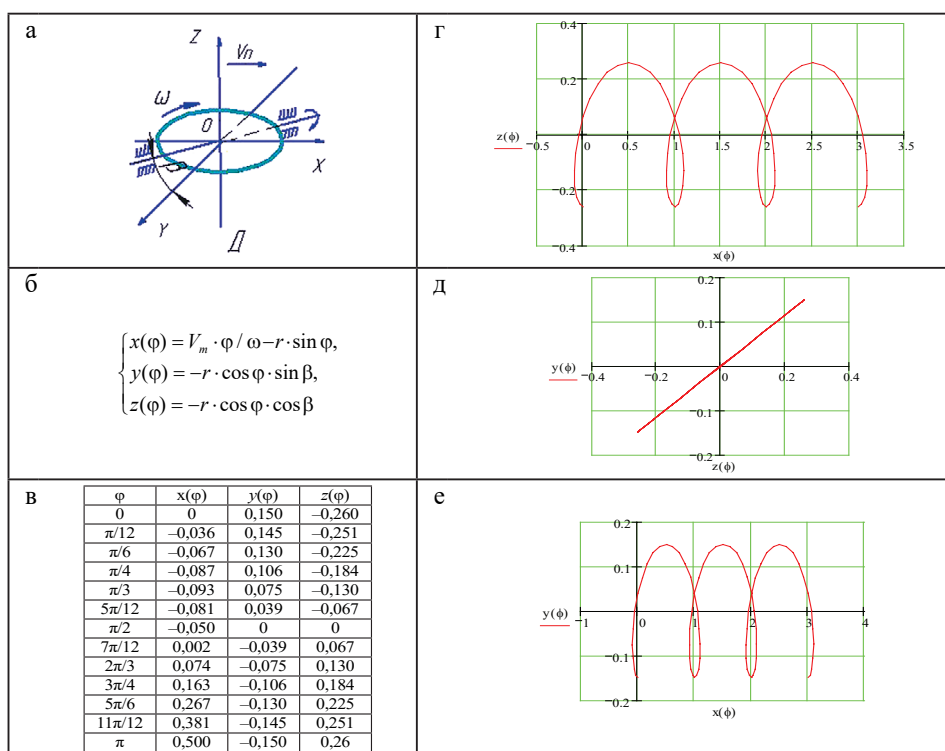


Рис. 6. Результаты кинематического анализа ротационного рабочего органа класса Д:

а – схема ротора класса Д; б – уравнения абсолютной траектории движения точки; в – результаты расчета; г, д, е – проекции траектории на прямоугольные плоскости системы координат OXYZ

Fig. 6. Kinematic analysis results for a rotary working tool of class D:

а – diagram of a class D rotor; б – equations of the absolute trajectory of the point; в – calculation results; г, д, е – projections of the trajectory on rectangular planes of the OXYZ coordinate system

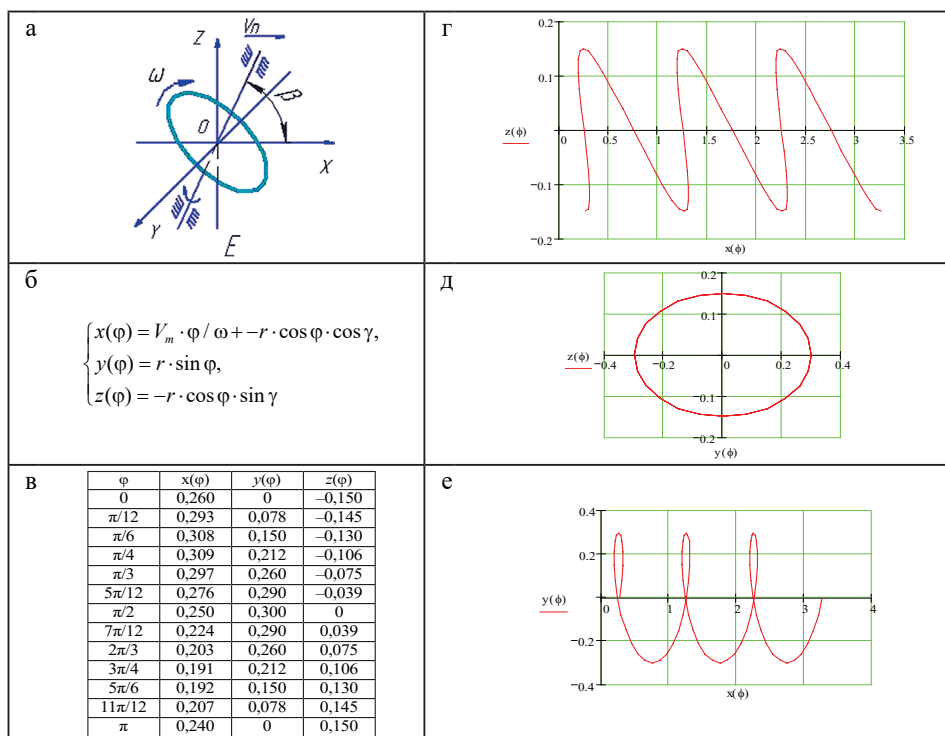


Рис. 7. Результаты кинематического анализа ротационного рабочего органа класса Е:

а – схема ротора класса Е; б – уравнения абсолютной траектории движения точки; в – результаты расчета; г, д, е – проекции траектории на прямоугольные плоскости системы координат OXYZ

Fig. 7. Kinematic analysis results for a rotary working tool of class E:

а – diagram of the rotor of class E; б – equations of the absolute trajectory of the point; в – calculation results; г, д, е – trajectory projections on rectangular planes of the OXYZ coordinate system

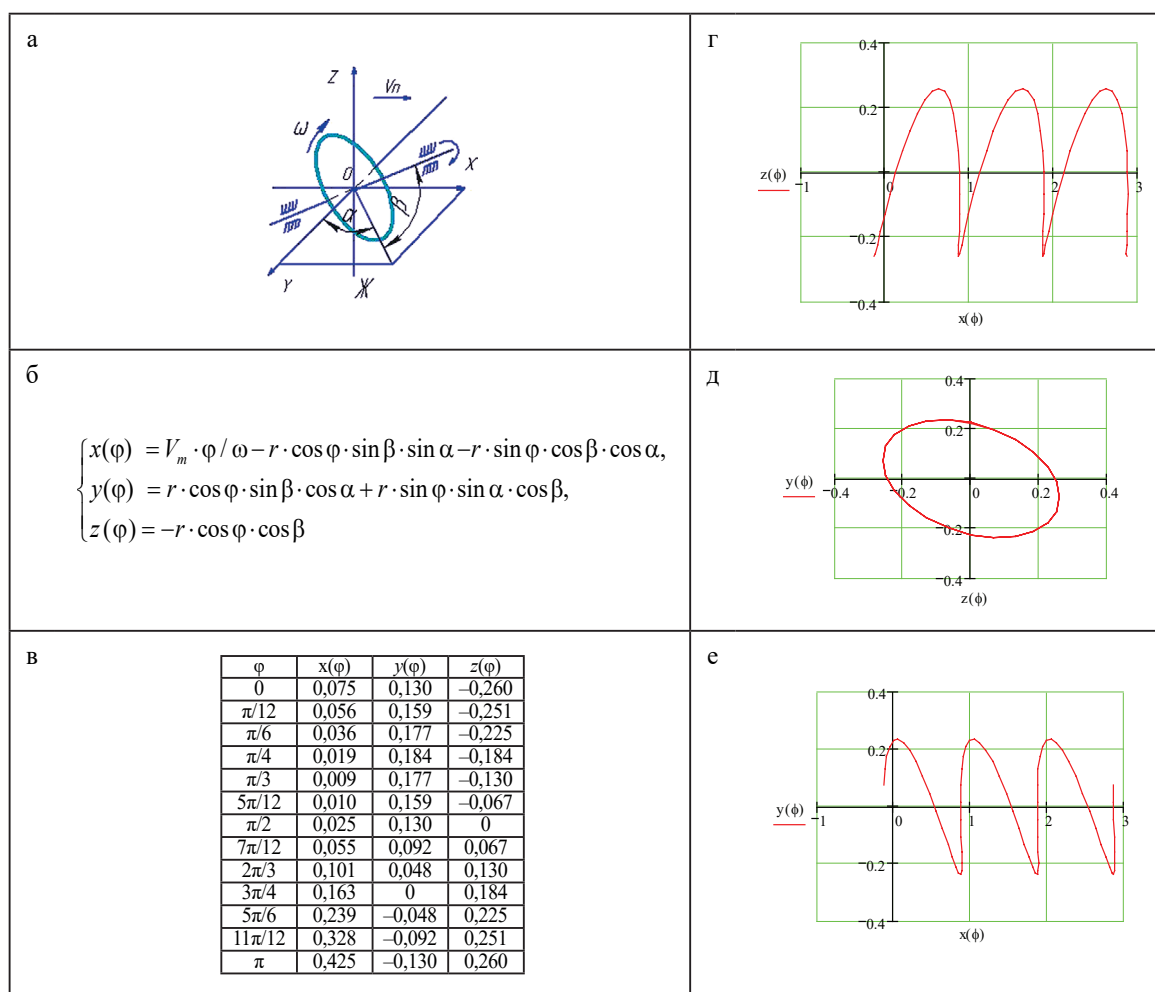


Рис. 8. Результаты кинематического анализа ротационного рабочего органа класса Ж:

а – схема ротора класса Ж; б – уравнения абсолютной траектории движения точки; в – результаты расчета; г, д, е – проекции траектории на прямоугольные плоскости системы координат OXYZ

Fig. 8. Kinematic analysis results for a rotary working tool of class G:

а – diagram of a rotor of class G; б – equations of the absolute trajectory of the point; в – calculation results; д, е, ф – projections of the trajectory on rectangular planes of the OXYZ coordinate system

Выводы

1. Предложенная классификация ротационных рабочих органов сельскохозяйственных машин охватывает всю совокупность возможного расположения оси вращения роторов в пространстве и таким образом облегчает систематизировать теорию по представленным группам машин.

2. Для группы роторов, у которых ось вращения располагается в пространстве относительно системы

координат OXYZ под углами α , β и γ , траектория движения материальных точек соответствует сжатой циклоиде (класс Г, Д, Е) и геликоиду (класс Ж).

3. Полученные траектории движения материальных точек ротационных рабочих органов позволяют оценить процесс взаимодействия рабочих органов с почвой и растительным материалом, обосновать геометрические параметры рабочих органов, частоту вращения ротора, поступательную скорость сельскохозяйственной машины.

Список использованных источников

1. Исследование кинематического режима работы ротационного рыхлителя для междурядной обработки почвы / В.Ф. Первушин, М.З. Салимзянов, Н.Г. Касимов и др. // Развитие производства и роль агроинженерной науки в современном мире: Материалы Международной научно-практической конференции, Ижевск, 16-17 декабря 2021 г. Ижевск: Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, 2021. С. 259-264. EDN: WFDXQL
2. Ротационный рыхлитель: Патент на полезную модель RU177399 U1, МПК A01B21/00 / В.Ф. Первушин, А.Г. Левшин, М.З. Салимзянов, И.Ю. Лебедев, И.Ш. Фатыхов. № 2017120112: заявл. 07.06.2017: опубл. 21.02.2018. EDN: MKBKTI
3. Левшин А.Г., Алсанкари А. Проверка методики экспресс-анализа буксования // Всероссийская с международным участием научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 155-летию со дня рождения Н.Н. Худякова: Материалы Всероссийской с международным участием научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 155-летию со дня рождения Н.Н. Худякова, Москва, 7-9 июня 2021 г. Т. 1. М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2021. С. 164-168. EDN: QGEQHO
4. Первушин В.Ф., Салимзянов М.З., Касимов Н.Г., Кузнецов А.Н., Калимуллин М.Н. Исследование кинематического режима работы ротационного рыхлителя для междурядной обработки почвы // Развитие производства и роль агроинженерной науки в современном мире: Материалы Международной научно-практической конференции, Ижевск, 16-17 декабря 2021 г. Ижевск: Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, 2021. С. 259-264. EDN: WFDXQL
5. Бодалев А.П., Иванов А.Г., Костин А.В., Шкляев К.Л., Шкляев А.Л., Дерюшев И.А. Взаимодействие пружинных рабочих органов тяжелых зубковых борон с почвой // Вестник НГИЭИ. 2020. № 1 (104). С. 16-30. EDN: FKELCU
6. Дерюшев И.А., Костев В.В., Луценко Н.А., Васильева О.П. Пути снижения воздействия ходовых систем сельскохозяйственной техники на структуру и свойства почвы // Развитие производства и роль агроинженерной науки в современном мире: Материалы Международной научно-практической конференции, Ижевск, 16-17 декабря 2021 г. Ижевск: Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, 2021. С. 59-63. EDN: KFJNBN
7. Дерюшев И.А., Галицын Д.А., Костев В.В. Перспективные способы посева овощных культур в открытом грунте // Вклад молодых ученых в реализацию приоритетных направлений развития аграрной науки: Материалы Национальной научно-практической конференции молодых ученых, Ижевск, 17-19 ноября 2021 г. Ижевск: Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, 2021. С. 8-11. EDN: IMZIDC
8. Шкляев К.Л., Шкляев А.Л., Михеева Е.А. Комплекс машин для возделывания и уборки корнеплодов // Современные достижения селекции растений – производство: Материалы Национальной научно-практической конференции, Ижевск, 15 июля 2021 г. Ижевск: Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, 2021. С. 311-316. EDN: YTEKMY
9. Первушин В.Ф., Салимзянов М.З., Касимов Н.Г., Шакиров Р.Р., Марков Д.А. Экспериментальная установка для удаления ботвы картофеля // Сельский механизатор. 2022. № 5. С. 6-7. EDN: WSTGGF
10. Первушин В.Ф., Салимзянов М.З., Лебедев И.Ю. и др. Обоснование конструкции ротационной бороны для ухода

References

1. Pervushin V.F., Salimzyanov M.Z., Kasimov N.G. et al. Study of the kinematic mode of operation of a rotary ripper for inter-row tillage. *Razvitie proizvodstva i rol agroinzhenernoy nauki v sovremennom mire: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, December 16-17, 2021. Izhevsk, Izhevsk State Agricultural Academy, 2021:259-264. (In Rus.)
2. Pervushin V.F., Levshin A.G., Salimzyanov M.Z., Lebedev I. Yu., Fatykhov I.Sh. Rotary ripper: Utility model patent RU177399 U1, IPC A01B21/00. No. 2017120112, 2018. (In Rus.)
3. Levshin A.G., Alsankari A. Verification of the method of express analysis of slipping. *Vserossiyskaya s mezhdunarodnym uchastiem nauchnaya konferentsiya molodykh uchenykh i spetsialistov, posvyashchennaya 155-letiyu so dnya rozhdeniya N.N. Khudyakova: Materialy Vserossiyskoy s mezhdunarodnym uchastiem nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov, posvyashchennoy 155-letiyu so dnya rozhdeniya N.N. Khudyakova*, June 7-9, 2021. Moscow, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2021;1:164-168. (In Rus.)
4. Pervushin V.F., Salimzyanov M.Z., Kasimov N.G., Kuznetsov A.N., Kalimullin M.N. Study of the kinematic mode of operation of a rotary cultivator for inter-row tillage. *Razvitie proizvodstva i rol agroinzhenernoy nauki v sovremennom mire: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, December 16-17, 2021. Izhevsk, Izhevsk State Agricultural Academy, 2021:259-264. (In Rus.)
5. Bodalev A.P., Ivanov A.G., Kostin A.V., Shklyayev K.L., Shklyayev A.L., Deryushev I.A. Interaction of spring operating part of heavy tine harrows with soil. *Bulletin NGIEI*. 2020;1(104):16-30. (In Rus.)
6. Deryushev I.A., Kostev V.V., Lutsenko N.A., Vasil'eva O.P. Ways to reduce the impact of running systems of agricultural machinery on the structure and properties of the soil. *Razvitie proizvodstva i rol agroinzhenernoy nauki v sovremennom mire: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, December 16-17, 2021. Izhevsk, Izhevsk State Agricultural Academy, 2021:59-63. (In Rus.)
7. Deryushev I.A., Galitsyn D.A., Kostev V.V. Promising methods of sowing vegetable crops in open ground. *Vklad molodykh uchenykh v realizatsiyu prioritetnykh napravleniy razvitiya agrarnoy nauki: Materialy Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh*, Izhevsk, November 17-19, 2021. Izhevsk, Izhevsk State Agricultural Academy, 2021:8-11. (In Rus.)
8. Shklyayev K.L., Shklyayev A.L., Mikheeva E.A. A complex of machines for cultivating and harvesting root crops. *Sovremennye dostizheniya selektsii rasteniy – proizvodstvu: Materialy Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Izhevsk, July 15, 2021. Izhevsk, Izhevsk State Agricultural Academy, 2021:311-316. (In Rus.)
9. Pervushin V.F., Salimzyanov M.Z., Kasimov N.G., Shakhmurov R.R., Markov D.A. Justification of the design of the rotary harrow for the care of potato plantings. *Selskiy mekhanizator*. 2022;5:6-7. (In Rus.)
10. Pervushin V.F., Salimzyanov M.Z., Lebedev I. Yu., Fedotov A.A., Dubovtsev S.A. Justification of the design of the rotary harrow for the care of potato plantings. *Selskiy mekhanizator*. 2020;10:14-15. (In Rus.)
11. Kalimullin M.N., Salimzyanov M.Z., Pervushin V.F., Latypov R.M., Ayugin N.P., Shakhmurov R.R. Development and theoretical study of the impact of the working body on the soil. BIO Web of Conferences: International Scientific-Practical Conference «Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources». 2022;52:00056.

за посадками картофеля // Сельский механизатор. 2020. № 10. С. 14-15. EDN: BNEJQJ

11. Kalimullin M.N., Salimzyanov M.Z., Pervushin V.F., Latypov R.M., Ayugin N.P., Shakirov R.R. Development and theoretical study of the impact of the working body on the soil. BIO Web of Conferences: International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources". 2022;52:00056. EDN: UDWMKX

12. Salimzyanov M., Pervushin V., Kasimov N., Kalimullin M. Substantiation of design and parameters of rotary harrow for preemployment processing ridge planting of potatoes. Engineering for Rural Development: 19, Jelgava, 2020. Pp. 1431-1436. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF359>

13. Salimzyanov M., Pervushin V., Shakirov R., Kalimullin M. Improvement of technology and machines for growing potatoes in agriculture. Engineering for Rural Development: 19, Jelgava, 2020. Pp. 1423-1430. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF356>

Вклад авторов

В.Ф. Первушин – концептуализация, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование.

А.Г. Левшин – методология.

М.З. Салимзянов – программное обеспечение.

А.Г. Ипатов – проведение исследования.

В.И. Широбоков – верификация данных.

Конфликт интересов

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

Статья поступила в редакцию 30.03.2023; поступила после рецензирования и доработки 13.04.2023; принята к публикации 21.04.2023

12. Salimzyanov M., Pervushin V., Kasimov N., Kalimullin M. Substantiation of design and parameters of rotary harrow for preemployment processing ridge planting of potatoes. Engineering for Rural Development: 19, Jelgava, 2020. Pp. 1431-1436. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF359>

13. Salimzyanov M., Pervushin V., Shakirov R., Kalimullin M. Improvement of technology and machines for growing potatoes in agriculture. Engineering for Rural Development: 19, Jelgava, 2020. Pp. 1423-1430. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF356>

Contribution of the authors

V.F. Pervushin – conceptualisation, finalizing of the manuscript and editing.

A.G. Levshin – methodology.

M.Z. Salimzyanov – software.

A.G. Ipatov – carrying out the research.

V.I. Shirobokov – data verification

Conflict of interests

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

Received 30.03.2023; revised 13.04.2023; accepted 21.04.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.372

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-65-71



Аспекты наследия академика В.П. Горячкина

Владимир Васильевич Шаров, канд. техн. наукsharov_vv56@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7659-9978>

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. Владея глубокими знаниями по математике и общей механике, В.П. Горячкин применил их к анализу и расчёту сельскохозяйственных машин, положив тем самым в начале XX в. появление новой научной дисциплины, названной им как «Земледельческая механика». В рамках этой науки он решал и некоторые теоретические вопросы по трактору. Конструкцией тракторной техники и рекомендациями по ее развитию он занимался при многочисленных испытаниях на возглавляемой им машиноиспытательной станции и в рамках работы правительственной комиссии. Целью исследований стало выявление теоретического и практического вклада В.П. Горячкина в создание науки о тракторе и в становление отечественного тракторостроения. В результате проведенных исследований методами, принятыми в истории науки и техники, установлено, что В.П. Горячкин разработал теорию ведущего и ведомого колеса трактора, обосновал предложения по совершенствованию характеристики двигателя и расположению его продольной оси относительно хода трактора, установил зависимость мощности трактора от рабочей скорости, решил конструктивные и мощностные вопросы агрегатирования трактора с плугом, сформулировал рекомендации по совершенствованию механических движителей и двигателей. Проводя многочисленные испытания тракторов в 1920-е гг. и участвуя в работе правительственной комиссии, В.П. Горячкин являлся участником становления тракторной отрасли. Благодаря его рекомендациям во многом определялись темпы и направления развития тракторостроения в СССР. На основании проведенных исследований можно констатировать, что теоретические изыскания и практические дела В.П. Горячкина явились значительным событием в истории становления отечественного тракторостроения, и его имя необходимо упоминать наряду с другими зачинателями тракторного дела в нашей стране.

Ключевые слова: земледельческая механика, наука, теория, трактор, двигатель, движитель, испытания, методология

Формат цитирования: Шаров В.В. Аспекты наследия академика В.П. Горячкина // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 3. С. 65-71. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-65-71>.

© Шаров В.В., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Aspects of the scientific legacy of Academician V.P. Goryachkin

Vladimir V. Sharov, CSc (Ag)sharov_vv56@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7659-9978>

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

Abstract. Possessing deep knowledge of mathematics and general mechanics, V.P. Goryachkin applied them to the design analysis of agricultural machines. Thereby at the beginning of the twentieth century, he established a new scientific discipline, which he called “Agricultural Mechanics”. Within the framework of this science, he also solved some theoretical problems of the tractor. He was engaged in the design of tractor equipment and recommendations for its development during numerous tests at the Machine Testing Station headed by him and within the framework of the government commission. The purpose of the research was to identify the theoretical and practical contribution of V.P. Goryachkin in the establishing of the tractor science and the domestic tractor construction. In accordance with the methods used in the history of science and technology, the author established that V.P. Goryachkin developed the theory of the driving and driven wheels of the tractor, justified proposals for improving the characteristics of the engine and the location of its longitudinal axis relative to the tractor’s travel direction, established the relationship between the tractor power and the operating speed, solved the constructive and power problems of coupling the tractor with a plow, formulated recommendations for improving mechanical propulsion and engines. Conducting numerous tests

of tractors in the 1920s, and participating in the work of the government commission, V.P. Goryachkin contributed much to the development of the tractor industry. His recommendations greatly helped determine the pace and trends in the development of tractor construction in the USSR. Based on the conducted research, the author states that by his theoretical research and practical achievements, V.P. Goryachkin made a significant contribution to the history of domestic tractor construction, so his name should be mentioned along with other pioneers of the domestic tractor industry.

Keywords: agricultural mechanics, science, theory, tractor, engine, propulsion, testing, methodology.

For citation: Sharov V.V. Aspects of the scientific legacy of Academician V.P. Goryachkin. Agricultural Engineering (Moscow), 2023;25(3):65-71. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-65-71>.

Введение. Научная и педагогическая жизнь основоположника научного направления по земледельческой механике Василия Прохоровича Горячкина хорошо известна, должным образом описана в биографической литературе, в научных статьях и достойно представлена в музее его имени [1-4].

Имея глубокие математические знания и хорошо владея общими законами механики, В.П. Горячкин впервые в мире осмысленно и талантливо применил их к анализу и расчёту сельскохозяйственных машин и орудий, заложив основы новой научной дисциплины, получившей название «Земледельческая механика». Обладая энциклопедическими знаниями, он разрабатывал теоретические вопросы для многих видов сельскохозяйственных машин, создавал и новое приборное оборудование, разрабатывал систему обработки экспериментальных данных, выявил закономерности протекания общей схемы процессов и др. Такая многовекторность творческой деятельности на стадии становления земледельческой механики носила новаторский характер и была под силу только одарённому учёному, каким и был В.П. Горячкин. Именно о таких создателях известный русский мыслитель И.А. Ильин писал: «Русский учёный по всему складу своему призван быть не ремесленником и не бухгалтером явлений, а художником в исследовании; ответственным импровизатором, свободным пионером познания» [5].

Накопленные В.П. Горячкиным и его сподвижниками теоретические и опытные данные по сельскохозяйственным машинам в 1930-е гг. стали настолько объёмными, что дальнейшее их совершенствование было возможно только по отдельным направлениям специализированными коллективами. Со временем образовались школы учёных, которые занимались узкой специализацией машинами (кто для почвообработки, кто для уборки урожая), и таких направлений было много: переработка урожая, животноводческие машины, хранение урожая, тракторная техника и пр. Именно в этот период обрабатывалось и обобщалось творческое наследие В.П. Горячкина, и исполнители этой громадной работы, излагая сочинения учёного по группам машин, не обратили внимания на предлагаемые им теоретические решения в рамках нарождающейся науки о тракторе. Рассмотренные теоретические вопросы,

касающиеся как трактора в целом, так и отдельных составляющих его частей, не были отражены В.П. Горячкиным в обособленной работе – они содержались в разных научных статьях и книгах, названия которых никоим образом не относились к тракторной тематике. Возможно, поэтому создатели науки о тракторе, не заметив этих работ, своевременно не оценили их должным образом, тем более что они печатались в основном для студентов академии.

Не получил отражения в собрании сочинений и колоссальный труд В.П. Горячкина на машиноиспытательной станции, где, помимо многочисленных испытаний с.-х. машин, он занимался и испытаниями тракторной техники. Его рекомендации и заключения по тракторам были весьма важными для правительственных органов и во многом определяли вектор развития тракторной отрасли в нашей стране.

Цель исследований: на основании изучения теоретического и практического наследия В.П. Горячкина выявить его вклад в создание науки о тракторе и в становление отечественного тракторостроения.

Материалы и методы. При проведении исследований использовались письменные труды академика В.П. Горячкина, труды его биографов, воспоминания его учеников и сподвижников, книги по конструкции и теории трактора, научно-техническая литература и периодические издания, отражающие становление отечественного тракторостроения, архивные материалы, хранящиеся в Музее имени В.П. Горячкина. Исследования проводились в соответствии с принятыми в истории науки и техники принципами историзма, научной объективности и достоверности.

Результаты и их обсуждение. Одними из аспектов деятельности академика В.П. Горячкина, не получившими ещё должного освещения, являются его теоретические работы по трактору. В своём сборнике лекций для студентов под общим названием «Земледельческая механика» посвящённом общетеоретическим вопросам, В.П. Горячкин уделил много внимания конкретным примерам, где показывал, как применять общие законы механики к расчётам различных сельскохозяйственных машин [6].

Наряду с плугами, вентиляторами, решётами, косилками В.П. Горячкин рассматривал и новое, только

ещё нарождающееся в нашей стране тяговое средство, именуемое как «трактор». Данный термин в его учебнике упоминается 33 раза, а материалы, посвящённые трактору и его составным частям, составляют примерно 10...12% от общего объёма текста. Это говорит о заинтересованности автора в теме и его усилиях решить некоторые теоретические и конструктивные вопросы новой машины. В этом труде в 1916-1918 гг., когда не было ещё книг по теории трактора, он описывал устройство, принцип работы и кинематику тракторных коробок передач и механизмов для перемены хода (вперёд или назад). Здесь же он привёл подробное описание работы дифференциала и выполнил кинематический анализ тракторных дифференциалов с цилиндрическими (по типу американского трактора Харт-Парр) и коническими шестернями.

В «Земледельческой механике» В.П. Горячкин подробно изложил теорию ведущего и ведомого колеса применительно к трактору, где привёл основные уравнения движения с учётом моментов инерции при явлениях скольжения или буксования (рис. 1).

Был сделан анализ характеристик двигателей (живых и механических), дано обоснование по их совершенствованию в части увеличения работоспособности. Предложения В.П. Горячкина относились к обеспечению «выносливости» двигателя: имелось в виду то, что при возникновении неожиданных препятствий у трактора сохранялись бы возможности по их преодолению без его остановки.

Применительно к тракторному двигателю В.П. Горячкин провёл анализ ориентации оси его маховика относительно хода трактора. Поскольку любой двигатель имеет вращающийся с большой скоростью маховик для осуществления стабилизации и накопления энергии вращения, при движении трактора возникают инерционные моменты, которые в определённых условиях оказывают воздействие на управляемость и устойчивость трактора. Им были рассмотрены три

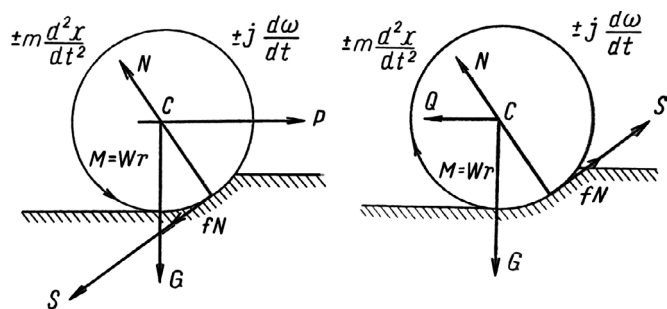


Рис. 1. Силы и моменты, действующие на ведомые (а) и на ведущие (в) колёса трактора («Земледельческая механика», 1919)

Fig. 1. Forces and moments acting on the driven (a) and driven (c) wheels of the tractor. (Agricultural Mechanics. 1919)

варианта расположения оси маховика: горизонтально и параллельно, горизонтально и перпендикулярно по отношению к ходу трактора; ось – вертикальная.

При поворотах трактора, а также при движении на подъём или спуск ось маховика за счёт сил инерции всегда стремится занять прежнее положение. При этом возникают дополнительные моменты сил, которые воздействуют на агрегаты трактора. Это ведёт к изменению распределения веса на правые и левые колёса, происходит увод трактора в ту или иную сторону, что требует от водителя более внимательного управления.

Анализ, сделанный В.П. Горячкиным, показывает, что наиболее выгодным с точки зрения динамики является расположение маховика вдоль вертикальной оси, так как при этом не происходит сворачивания трактора в стороны (рис. 2).

Учебник по земледельческой механике заканчивается разделом «Механические тракторы и живые двигатели». В нём, опираясь на примеры из живой природы (в частности, на пример движения ног человека), В.П. Горячкин анализирует возможность создания механических движителей и двигателей, способных адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации (рис. 3).

Заметим, что эти теоретические исследования ученый проводил задолго до формирования общепризнанной науки о тракторе. Его «поучительные», как он пишет, предложения по этому вопросу сводятся к 5 обобщениям, которые можно изложить следующим образом:

1. Для каждого трактора, работающего в специфических условиях, должны быть свои движители, наилучшим образом обеспечивающие условия работы.
2. Привод на движители трактора в зависимости от условий должен осуществляться то на передние, то на задние колёса.
3. Движители трактора должны приспособляться и видоизменять расположение своих частей для преодоления препятствий. В этих случаях уместно применять эпициклические (планетарные) механизмы, допускающие одновременное действие двух движителей.
4. Двигатель трактора должен быть способным преодолевать перегрузки в значительном диапазоне скоростей (необходим достаточный запас крутящего момента).

5. Переднее колесо трактора должно обладать свойствами опорной «передней» ноги шагающего человека (уметь подниматься и выполнять опорную функцию. – Авт.), в то время (1919 г. – Авт.) как существующая конструкция трактора позволяет переднему колесу выполнять функции только «задней ноги» шагающего человека.

Приведённое исследование показывает, что В.П. Горячкин уже в 1916-1919 гг. был увлечён

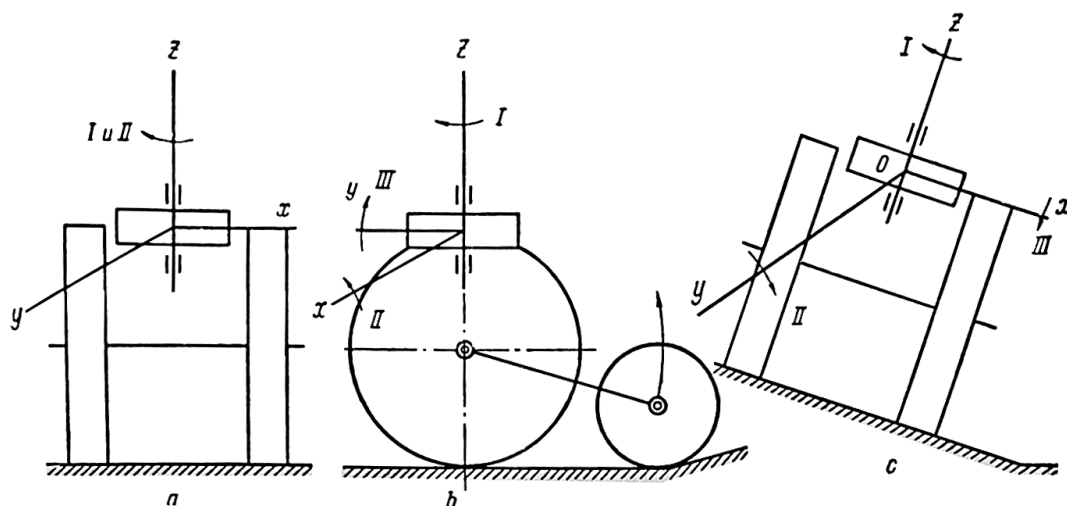


Рис. 2. Схема вертикального расположения оси маховика ДВС перпендикулярно движению трактора («Земледельческая механика», 1919)

Fig. 2. Scheme of vertical arrangement of the axis of the ICE flywheel perpendicular to the movement of the tractor. (Agricultural Mechanics. 1919)

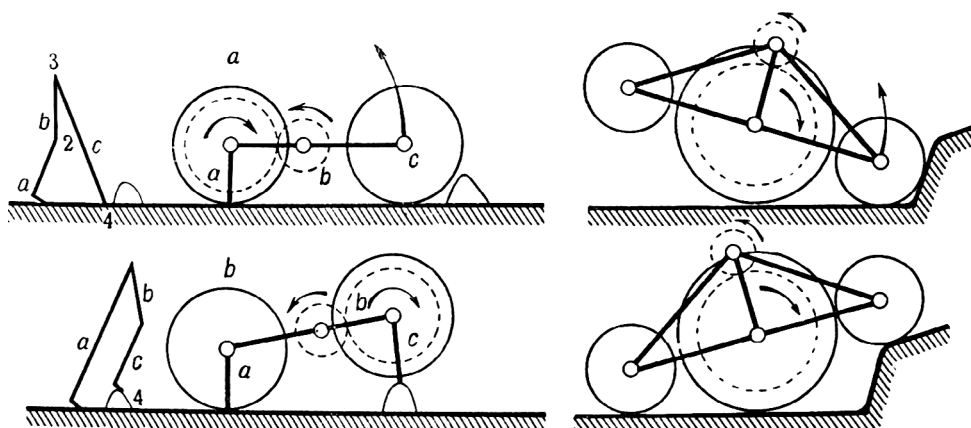


Рис. 3. Схематическое изображение ног человека и движителей трактора («Земледельческая механика», 1919)

Fig. 3. Schematic representation of human legs and tractor propulsion units (Agricultural Mechanics. 1919)

тракторной тематикой и старался внести определённый вклад в развитие его конструкции. Его рекомендации по схемам движителей трактора, основанные на копировании «живой природы», до сих пор актуальны и являются существенным вкладом в конструкцию самоходной машины.

В своих последующих работах В.П. Горячкин систематически развивал общие идеи, изложенные им в «Земледельческой механике», сосредоточивая внимание на отдельных видах машин и орудий. Так, в книге «Рациональная формула для силы тяги плугов конных и тракторных» (1924-1925) он подробно образом представляет получение новой зависимости тягового сопротивления плуга [7]. В.П. Горячкин пишет, что эту формулу «...можно применять не только к плугу и резцам вообще, но и к автомобилю или трактору, аэроплану, пароходу...», тем самым отмечая её универсальный характер, охватывающий все виды техники.

Используя установленную В.П. Горячкиным зависимость ($P = f \cdot G + k \cdot a \cdot b + e \cdot a \cdot b \cdot V^2$), можно было на этапе создания новой машины просчитать потребляемую мощность для её привода, что являлось огромным подспорьем для инженера-конструктора, опирающегося в своей деятельности не только на интуитивные подходы, но и на теоретические расчёты. В «Земледельческой механике» он пишет, что «...сознательное творчество всё-таки необходимо вследствие обманчивости инстинкта», которым подчёркивает важность развития теоретических начал для создания новой техники.

Исследователь, конструктор, учёный, инженер, пользуясь полученной В.П. Горячкиным зависимостью, мог осознанно производить предварительные расчеты по создаваемым машинам, понимая, что энергия двигателя будет тратиться на перемещение массы самой машины, на преодоление сопротивления среды и буксируемой нагрузки, на силы сопротивления, возникающие с увеличением скорости перемещения.

В разделе «Тракторные плуги» научной работы «Теория плуга. Основания для систематического расчёта плугов» (1927) В.П. Горячкин приводит основное уравнение для тракторных плугов ($75N = [fG + (k + \varepsilon V^2)ab]V$), устанавливающее необходимый уровень мощности трактора для преодоления сил сопротивления [7]. Здесь же проводится подробный теоретический анализ характеристики работоспособности трактора, которая на графике представляется выпуклой частью параболы. Он отмечает, что точка пересечения характеристик трактора и плуга определяет «наивыгоднейшую» скорость трактора, и поясняет, что расположение этой точки должно лежать ниже вершины параболы, чтобы был запас работоспособности трактора при случайном увеличении сопротивления и последующем вследствие этого уменьшении скорости (рис. 4).

Анализируя график рабочих характеристик трактора и плуга, В.П. Горячкин обращает внимание на следующее обстоятельство: поскольку кривая, описывающая сопротивление плуга (парабола), поднимается вверх круто по вертикали, даже при незначительном повышении скорости работоспособность трактора должна увеличиваться в значительной мере.

В своей обобщающей научной работе «О силе тяги тракторных плугов» (1928-1929) В.П. Горячкин развивает понимание предложенной им в 1923 г. рациональной формулы для силы тяги плугов применительно к тракторным пахотным агрегатам [7]. На основе теоретических выводов и практических измерений он устанавливает, что увеличение поступательной скорости плуга в 6 раз ведёт к увеличению силы тяги на 25%, а необходимая мощность для его привода увеличивается в 7 раз. На основании этого он сделал вывод о том, что повышение производительности пахотного агрегата за счёт увеличения скорости требует увеличения мощности трактора пропорционально увеличению его скорости. Эта зависимость стала одним из элементов нарождающейся теории по динамике трактора. Спустя 60 лет в соответствии с установленной В.П. Горячкиным закономерностью отечественные специалисты

создадут энергонасыщенные тракторы для работы на повышенных скоростях (9...15 км/ч).

Наряду с оценкой конструкции трактора на машиноиспытательной станции (МИС) под руководством В.П. Горячкина проводились работы по испытаниям и созданию новых плугов к тракторам. В решении этого вопроса В.П. Горячкин не ограничился только практической стороной дела – он разработал и теоретические основы агрегатирования самого энергоёмкого орудия с самоходным тягловым средством [7].

Рациональная формула для силы тяги плугов («горячкинская») несла в себе физический смысл и наглядно показывала зависимость сопротивления плуга от его массы и сил трения, от площади поперечного сечения обрабатываемой почвы и от скорости движения. Её использовали первые создатели теории трактора в нашей стране при составлении уравнения движения. Так, в 1927 г. на неё ссылался Е.Д. Львов, описывая общую динамику трактора [8]. Оперировал рациональной формулой и ленинградский профессор А.Д. Халкиопов (ЛИМиЭСХ) в своих лекциях, посвящённых теории трактора, отмечая, что эта установленная зависимость является важной, так как плуг – это основная нагрузка трактора [9]. Приверженность «горячкинской» формуле сохранилась и в дальнейших трудах учёных, развивающих теорию трактора [10].

Вклад В.П. Горячкина в становление науки о тракторе был отмечен известным учёным-тракторостроителем В.Н. Болтинским, который писал: «Исключительное влияние на развитие науки о тракторах и их двигателях оказали труды академика В.П. Горячкина...» [11].

Обобщая вышеприведённые примеры, отметим, что В.П. Горячкин установил несколько закономерностей и решил ряд теоретических вопросов, которые органично вошли в науку о тракторе.

Ещё одним аспектом деятельности В.П. Горячкина, не получившим достаточного отражения в биографической литературе, является его практическая работа по испытаниям тракторной техники на МИС. Изучая историю становления тракторостроения в 1922-1930 гг., следует обратить внимание на тот факт, что одним из активных участников этого процесса был и В.П. Горячкин. Созданная и возглавляемая им МИС в те годы стала одним из испытательных центров в СССР, который мог обеспечить достоверность испытаний и ответить на все вопросы об оценке различных конструкций тяговой техники.

В 1922 г. по заданию правительственных органов на МИС проводились испытания американского трактора «Фордзон», и в случае успешных результатов планировалось закупить лицензию на его воспроизводство в нашей стране. Испытания в целом подтвердили его работоспособность на основных сельскохозяйственных

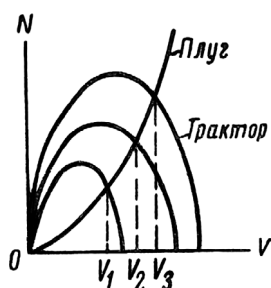


Рис. 4. График рабочих характеристик трактора и плуга («Теория плуга», 1927)

Fig. 4. Schedule of tractor and plough performance. (The Plough Theory. 1927)

операциях, но были выявлены и некоторые конструктивные недостатки [12]. Испытатели дали положительное заключение, и с 1924 г. в Ленинграде началось производство трактора под маркой «Фордзон-Путиловец».

В 1923 г. на МИС испытывались тракторы, поступившие с Первой сельскохозяйственной выставки. Это были гусеничные (Холт-75, Большевик-40, Большевик-20, Коммунар) и колёсные тракторы: Могул, Фордзон-Путиловец, Запорожец, Коломенец-I, Коломенец-II, автоплуг (Фаулер) и др. [13].

По данным, хранящимся в архиве Музея имени В.П. Горячкина, с 1923 по 1931 гг. на МИС было испытано 25 разнообразных конструкций тракторной техники [3]. Во всех испытаниях В.П. Горячкин принимал непосредственное участие, организовывая их, согласовывая и утверждая методики с планами работ, комплектовал приборами и научным оборудованием. Он участвовал в обработке экспериментальных данных, формулировал выводы и рекомендации, на основе которых принимались государственные решения в части создания и развития тракторной промышленности (рис. 5).

С 1925 г. В.П. Горячкин входил в состав комиссии при ВСНХ¹, сформированной для определения лучшей в мире модели трактора для будущего серийного производства в нашей стране [14].

В архивах Музея имени В.П. Горячкина имеются протоколы заседаний, в которых отражено обсуждение результатов испытаний тракторов [15]. Как правило, на заседаниях присутствовали представители Госплана, Народного комиссариата земледелия, Главного хозяйственного комитета ВСНХ, Военно-технического управления РККА², Сельско-Союза, Главметалла ВСНХ, ЦУГАЗа³, ГОМЗа⁴, Сельскохозяйственной академии имени К.А. Тимирязева, Ломоносовского института, МВТУ⁵, Московской тракторной школы, Московского тракторного общества, завода изготовителя, редакций газет, журналов и др. Председателем собрания всегда избирался В.П. Горячкин, он подписывал и протоколы испытаний.

На заседаниях столь высокого уровня, проводившихся В.П. Горячкиным, несомненно, вырабатывались решения по вопросам развития тракторостроения, которые принимались во внимание правительственными органами при выработке политики оснащения средствами механизации сельского хозяйства.

Выработанная известным учёным методология испытаний сложной техники, а также разработанное им оригинальное приборное оборудование и подобранное математическое обеспечение для обработки экспериментальных данных заложили основу для развития науки по испытаниям мобильной тяговой техники.

Неоценим вклад В.П. Горячкина в становление тракторостроения в нашей стране и как педагога, как организатора науки. Его научная школа воспитала известных учёных, много сделавших для развития науки о тракторах: А.Н. Судакова, П.М. Белянчикова, В.А. Желиговского, И.И. Артоболевского, В.Н. Болтинского и многих других.

В.П. Горячкин был создателем инженерного сельскохозяйственного образования в России, разрабатывая программы обучения, подготавливая для издания и публикации учебники и пособия, читая лекции и проводя практические занятия. Он воспитывал студентов, которые потом занимались механизацией сельского хозяйства, создавали и внедряли новые тракторные конструкции.

Понимая важность будущности тракторной техники, В.П. Горячкин приложил громадные усилия для создания новых научно-исследовательских институтов. Один из них, Всесоюзный институт сельскохозяйственного машиностроения (ВИСХОМ), был призван создавать новые виды сельхозмашин для мобильной тяговой техники, а другой, Всесоюзный научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства (ВИМ), разрабатывал перспективные технологии возделывания культурных растений и формулировал агротребования к тяговым машинам. Эти научные организации, наряду с Научным автотракторным институтом (НАТИ), стали основными в деле механизации сельскохозяйственного производства на основе мобильных тракторных агрегатов в нашей стране.



Рис. 5. В.П. Горячкин (четвёртый слева) на испытаниях трактора «Фордзон-Путиловец» с двухкорпусным плугом

Fig. 5. V.P. Goryachkin (standing fourth from the left) at the tests of the tractor “Fordzon-Putilovets” with a double-furrow plow

¹ ВСНХ – Высший совет народного хозяйства.

² РККА – Рабоче-крестьянская Красная Армия.

³ ЦУГАЗ – Центральное управление государственных автомобильных заводов.

⁴ ГОМЗ – Государственное объединение машиностроительных заводов.

⁵ МВТУ – Московское высшее техническое училище.

Выводы

На стадии начального формирования науки о тракторе В.П. Горячкин разработал и опубликовал теорию ведущего и ведомого колеса трактора, обосновал предложения по совершенствованию характеристики двигателя и расположению его продольной оси относительно хода трактора, установил зависимость мощности трактора от рабочей скорости, решил конструктивные и мощностные вопросы агрегатирования трактора с плугом, сформулировал рекомендации по совершенствованию механических движителей и двигателей. На этом основании вполне заслуженным является упоминание имени В.П. Горячкина как одного из создателей науки о тракторе наравне с А.Н. Судаковым, Б.А. Линтваревым, М.К. Кристи, Е.Д. Львовым, Д.К. Карельских и др.

Список использованных источников

1. Дубровский А.А. Академик, В.П. Горячкин: Биографический очерк / Под ред. И.И. Артоболевского. М.: Сельхозгиз, 1960.
2. Сельскохозяйственная энциклопедия. Т. 2 (Г-К) / Гл. ред. В.В. Мацкевич, П.П. Лобанов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Советская энциклопедия, 1975. С. 68-70.
3. Жалнин Э.В. Аксиоматизация земледельческой механики. М.: ВИМ, 2002. 203 с.
4. Ерохин М.Н., Зайцева Н.Л., Алдошин Н.В. Василий Прохорович Горячкин: Страницы жизни. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. 280 с.
5. Ильин И.А. Русская идея III // Антология русского качества / Сост. Б.В. Бойцов, Ю.В. Крянев, М.А. Кузнецов, В.Н. Азаров, Т.П. Павлова; Под ред. Б.В. Бойцова, Ю.В. Крянева. 4-е изд., испр. и доп. М.: Академия проблем качества, 2007. 580 с.
6. В.П. Горячкин. Собрание сочинений: В 3 т. Изд. второе. Т. 1 / Под. ред. Н.Д. Лучинского. М.: Колос, 1968. 459 с.
7. В.П. Горячкин. Собрание сочинений: В 3 т. Изд. второе. Т. 2 / Под. ред. Н.Д. Лучинского. М.: Колос, 1968. 456 с.
8. Львов Е.Д. Тракторы их конструкция и расчёты. М.: Гозиздат, 1927. 498 с.
9. Халкиопов А.Д. Сельскохозяйственные тракторы. Вып. I. Л.: КУБУЧ; ЛИМиЭСХ, 1931. 185 с.
10. Гуськов В.В., Велев Н.Н., Атаманов Ю.Е. и др. Тракторы. Теория: Учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1988. 375 с.
11. Болтинский В.Н. Тракторные и автомобильные двигатели: Учебник. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Сельхозгиз, 1953. 591 с.
12. Белянчиков П.М. Трактор «Фордзон» и результаты его испытания. М.: Мотор, 1923. 28 с.
13. Белянчиков П.М. Русские тракторы: Краткое описание тракторов и результатов полевых испытаний. М.: Кооперативное изд-во, 1925. 41 с.
14. Пичужкин Н.А. К вопросу о начале массового тракторостроения в России // Наука без границ. 2017. № 2 (7). С. 19-23.
15. Испытания гусеничного трактора «Холт» завода «Большевик». Испытания трактора «Фордзон-Путиловец» завода «Красный Путиловец» // Материалы Музея имени В.П. Горячкина. Д. 13.

Автор несет ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 28.02.2023; поступила после рецензирования и доработки 02.03.2023; принята к публикации 03.03.2023

Проводя испытания тракторов в 1920-е гг. и участвуя в работе правительственной комиссии, В.П. Горячкин, несомненно, являлся активным участником становления тракторной отрасли. Благодаря его рекомендациям во многом определялись темпы и направление развития тракторостроения в СССР. Наряду с Я.В. Маминым, Л.А. Унгером, Г.П. Каргополовым, П.М. Белянчиковым, Н.Р. Брилингом, Е.Д. Львовым и другими В.П. Горячкин по праву является зачинателем отечественного тракторостроения.

Подводя итоги представленной в статье деятельности В.П. Горячкина, можно констатировать, что его теоретические изыскания и практические дела оказали большое влияние на становление отечественного тракторостроения и являются значительным событием в истории науки и техники нашей страны.

References

1. Dubrovskiy A.A. Academician, V.P. Goryachkin: Biographical sketch. Ed. by I.I. Artobolevsky. Moscow, Selkhozgiz, 1960. (In Rus.)
2. Agricultural encyclopedia. Vol. 2 (G-K). Ed. by V.V. Matskevich, P.P. Lobanov. 4th ed., reviewed and extended. Moscow, Soviet Encyclopedia, 1975. Pp. 68-70. (In Rus.)
3. Zhالنin E.V. Axiomatization of agricultural mechanics. Moscow, VIM, 2002. 203 p. (In Rus.)
4. Erokhin M.N., Zaitseva N.L., Aldoshin N.V. Vasily Prokhorovich Goryachkin: Pages of life. Moscow, FGBNU "Rosinformagrotekh", 2020. 280 p. (In Rus.)
5. Ilyin I.A. Russian idea III. Anthology of Russian quality. Compiled by B.V. Boytsov Yu.V. Kryanev, M.A. Kuznetsov, V.N. Azarov, T.P. Pavlova; Ed. by B.V. Boytsov Yu.V. Kryanev. 4th ed., reviewed and extended. Moscow: Academy of Quality Problems, 2007. 580 p. (In Rus.)
6. V.P. Goryachkin. Collected Works: In three volumes. Second edition. Vol. 1. Ed. by N.D. Luchinsky. Moscow, Kolos, 1968. 459 p. (In Rus.)
7. V.P. Goryachkin. Collected Works: In three volumes. Second edition. Vol. 2. Ed. by N.D. Luchinsky. Moscow, Kolos, 1968. 456 p. (In Rus.)
8. Lvov E.D. Tractors, their design and analysis. Moscow, Gozizdat, 1927. 498 p. (In Rus.)
9. Khalkiopov A.D. Agricultural tractors. Issue I.L.: KUBUCH; LIMiESKh, 1931. 185 p. (In Rus.)
10. Guskov V.V., Velev N.N., Atamanov Yu.E. et al. Tractors. Theory: University study manual. Moscow, Mashinostroenie, 1988. 375 p. (In Rus.)
11. Boltinsky V.N. Tractor and automobile engines: Textbook. 5th ed., reviewed and extended. Moscow, Selkhozgiz, 1953. 591 p. (In Rus.)
12. Belyanchikov P.M. Tractor "Fordson" and the results of its testing. Moscow, Motor, 1923. 28 p. (In Rus.)
13. Belyanchikov P.M. Russian tractors: Short description of tractors and field test results. Moscow, Cooperative publishing house, 1925. 41 p. (In Rus.)
14. Pichuzhkin N.A. On the beginning of mass tractor construction in Russia. *Nauka bez granits*. 2017;2(7):19-23. (In Rus.)
15. Tests of the "Holt" tracked tractor manufactured by the "Bolshhevik" factory. Tests of the Fordson-Putilovets tractor of the Krasny Putilovets plant. Materials of the Agricultural Engineering History Museum named after V.P. Goryachkin. . Arch. 13. (In Rus.)

The author bears responsibility for plagiarism.

Received 28.02.2023; revised 02.03.2023; accepted 03.03.2023

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.316.022

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-72-78



Износостойкость низколегированных сталей в абразивной среде

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

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

Сергей Михайлович Гайдар, д-р техн. наук, профессор

techmash@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>; Scopus Author ID: 57191589797; Researcher ID: I-4723-2018

Дмитрий Михайлович Скороходов[✉], канд. техн. наук, доцент

d.skorokhodov@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>; Scopus Author ID: 57223623999; Researcher ID: AFH-8012-2022

Софья Михайловна Ветрова, аспирант

Алина Сергеевна Барчукова, аспирант

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

Аннотация. Импортозамещение рабочих органов сельскохозяйственных машин возможно при разработке высококачественной стали и технологий ее упрочнения, соответствующих условиям работы сельскохозяйственной техники. Сталь в сочетании с высокой износостойкостью в абразивной среде должна обладать высокой пластичностью и ударной вязкостью. С целью исследования износостойкости разработанных низколегированных сталей в абразивной среде и оценки возможности их применения для изготовления высокоресурсных рабочих органов сельскохозяйственной техники разработаны 4 партии образцов стали с добавками. Для всех образцов проводилась термическая обработка с нагревом до температуры 900°C и закалкой в воду при температуре 20°C. Вторая группа образцов дополнительно подвергалась отпуску при температуре 280°C в течение 1 ч с последующим охлаждением на воздухе. На испытательной установке определялась износостойкость образцов согласно ГОСТ 23.208-79. Установлено, что наименьшая интенсивность износа 0,0581 г/м достигнута для стали 0,43C-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti с термической обработкой «Закалка». Высокий предел прочности 2170 МПа достигается за счет образования карбонитридов, обогащенных Nb. Износостойкость данной стали в сравнении со сталью 65Г выше в 1,66 раза. При термической обработке «Закалка и отпуск» относительная износостойкость данной стали на 10,7% ниже, что объясняется фазовыми превращениями, уменьшающими предел прочности до 2040 МПа, но повышающими пластичность стали. Проведенные исследования показали широкий диапазон изменения износостойкости в зависимости от термической обработки. Это дает возможность в сравнительно небольших интервалах изменения температур закалки и отпуска воздействовать на структуру стали, тем самым воздействовать на свойства, которые обеспечивают наибольшую износостойкость.

Ключевые слова: износостойкость, сталь, термическая обработка, рабочие органы, сельскохозяйственная техника

Благодарности. Исследования проведены в ходе выполнения гранта Минобрнауки РФ № 075-15-2021-572 от 31 мая 2021 г. «Перспективные стали для сельскохозяйственной техники»

Формат цитирования: Ерохин М.Н., Гайдар С.М., Скороходов Д.М., Ветрова С.М., Барчукова А.С. Износостойкость низколегированных сталей в абразивной среде // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 3. С. 72-78. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-72-78>.

© Ерохин М.Н., Гайдар С.М., Скороходов Д.М., Ветрова С.М., Барчукова А.С., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Wear resistance of low-alloy steels in the abrasive environment

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

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

Sergey M. Gaidar, DSc (Eng), Professor

techmash@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>; Scopus Author ID: 57191589797; Researcher ID: I-4723-2018

Dmitry M. Skorokhodov✉, CSc (Eng), Associate Professor

d.skorokhodov@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>; Scopus Author ID: 57223623999

Sofya M. Vetrova, postgraduate students

Alina S. Barchukova, postgraduate students

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

Abstract. The import substitution of agricultural machinery implements is possible with the development of high quality steel and hardening technologies appropriate to the operating conditions of agricultural machinery. Along with high wear resistance in abrasive environment, steel must have high ductility and impact toughness. To investigate wear resistance of the developed low-alloy steels in the abrasive environment and estimate the possibility of their application for manufacturing high-resistance working tools of agricultural machinery the authors developed four batches of steel samples with additives. All samples were subject to heat treatment with heating to 900°C and quenching in water at 20°C. The second group of samples was additionally tempered at a temperature of 280°C for an hour, followed by air cooling. The wear resistance of samples was determined according to GOST 23.208-79 with the test equipment. The least wear intensity of 0.0581 g/m was recorded for steel 0.43C-1.60Si-0.01Mn-1.1Cr-0.95Mo-0.08V-0.05Nb-0.04Ti subjected to heat treatment with quenching. The high tensile strength of 2170 MPa was obtained through the formation of carbonitrides enriched with Nb. The wear resistance of this steel grade is 1.66 times higher than that of the 65G steel grade. The heat treatment of quenching with tempering yielded the relative wear resistance of the given steel by 10.7% lower, which can be explained by phase transformations reducing the ultimate strength to 2040 MPa, but increasing the plasticity of steel. Studies have shown a wide range of changes in wear resistance depending on the heat treatment mode. This makes it possible to modify the structure of steel in relatively small temperature intervals of quenching and tempering, thereby influencing the properties that provide the greatest wear resistance.

Keywords: wear resistance, wear intensity, heat treatment, working tools, agricultural machines

Acknowledgements. The research was funded by the grant of the Ministry of Education and Science of Russian Federation No. 075-15-2021-572 of May 31, 2021 “Promising Steels for Agricultural Machinery”.

For citation: Erokhin M.N., Gaidar S.M., Skorokhodov D.M., Vetrova S.M., Barchukova A.S. Wear resistance of low-alloy steels in the abrasive environment. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(3):72-78. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-72-78>.

Введение. Отечественная сельскохозяйственная техника по многим показателям качества уступает машинам ведущих зарубежных фирм. Затраты на ремонт, запчасти и поддержание машинно-тракторного парка в работоспособном состоянии, в структуре себестоимости сельскохозяйственной продукции составляют более 12% [1]. Ежегодно ремонту подвергается более 70% почвообрабатывающих машин. На устранение отказов и поддержание машин в работоспособном состоянии приходится до 60% общих затрат. Около 80% отказов происходит из-за износа деталей [2]. Особенно интенсивно изнашиваются детали рабочих органов сельскохозяйственных машин. Так, средняя наработка на отказ отечественных лемехов, лап культиваторов, дисков луцильников и дисковых борон в зависимости от типа почвы находится в пределах 8...20 га. Испытания показывают, что кроме изнашивания при высоких скоростях и значительных динамических нагрузках, до 16% лемехов заменяются по причине их деформации и излома [3].

За последние годы в структуре машинно-тракторного парка существенно увеличилось количество импортной техники. Например, оборудование

животноводческих ферм и комплексов почти на 95% является импортным. В растениеводстве широко используются плуги фирм A. Lemken (Германия), Kverneland (Норвегия), Vodel-Noot (Австрия) и др. Практически на всех машинах, производимых российскими фирмами, устанавливаются импортные рабочие органы. Зарубежная техника является более надежной, ее рабочие органы изготавливаются из износостойких и прочных материалов, обеспечивающих двукратное превышение их ресурса по сравнению с отечественными рабочими органами. Кроме того, практически все машины оснащены различными датчиками и устройствами, предохраняющими рабочие органы от поломок и деформаций при перегрузках. Все рабочие органы кормоприготовительного оборудования, почвообрабатывающей техники, представленные на выставках «Золотая осень-2022» и «Agros expro-2023», – зарубежного производства (Турция, Германия, Франция и др.).

Уход с российского рынка по причине санкций большинства зарубежных фирм, прекращение поставок запасных частей для эксплуатируемой в России зарубежной техники в случае отсутствия срочных мер

может нанести существенный ущерб сельскохозяйственным производителям России. Особенно остро стоит вопрос о необходимости замены дорогостоящих импортных рабочих органов отечественными, обладающими высокой износостойкостью и работоспособностью. Для организации импортозамещения рабочих органов сельскохозяйственных машин необходимо в первую очередь разработать и организовать выпуск высококачественных сталей и технологий их упрочнения, соответствующих условиям работы сельскохозяйственной техники.

Цель исследований: в лабораторных условиях исследовать износостойкость разработанных низколегированных сталей в абразивной среде и оценить возможность их применения для изготовления высококоресурсных рабочих органов сельскохозяйственной техники.

Материалы и методы. Для изготовления лемехов, лап культиваторов и других рабочих органов почвообрабатывающих машин используется в основном сталь 65Г с поверхностной твердостью HRC 55...60, что соответствует 8...8,5 тыс. МПа.

В таблице 1 приведены механические свойства сталей 40, 45, 65Г, Х12, 40Х, 30ХГСА, 18ХГТ, применяемых в сельскохозяйственном машиностроении¹.

Стали в сочетании с высокой износостойкостью в абразивной среде должны обладать высокой пластичностью и ударной вязкостью.

Для сравнительной оценки износостойкости разрабатываемых низколегированных сталей изготовлены 4 партии образцов с добавками:

Партия 1: 0,34С-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti.

Партия 2: 0,43С-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti.

Партия 3: 0,44С-1,81Si-1,33Mn-0,82Cr-0,28Mo.

Партия 4: 0,41С-0,58Si-1,36Mn-1,30Cr-0,63Mo-0,12V-0,05Nb-0,04Ti.

Все образцы подвергались термической обработке с нагревом до температуры 900°C и закалкой в воду при температуре 20°C. Вторая группа образцов дополнительно подвергалась отпуску при температуре 280°C в течение 1 ч с последующим охлаждением на воздухе [4-8].

Изнашивание образцов в соответствии с ГОСТ 23.208-79 проводили на установке (рис. 1), соответствующей схеме изнашивания образцов со свободными абразивными частицами. Образцы для испытаний на износостойкость представляли собой плоские пластины размером 50х25 мм и толщиной 8 мм. Испытуемый образец 1 устанавливали в образцедержатель 2 и прижимали рычагом к ролику с усилием 44,1±0,25 Н. Абразивные частицы из дозирующего устройства 5, попадая на образец, внедрялись в резиновый вращающийся ролик 6 и, протаскиваясь через зону контакта, изнашивали испытываемый материал.

Таблица 1

Механические свойства сталей, применяемых в сельскохозяйственном машиностроении

Table 1

Mechanical properties of steels used in agricultural engineering

Марка стали Grade of steel	Термообработка Heat treatment	Предел прочности, σ_B , МПа Tensile strength, σ_B , MPa	Твердость поверхности Surface hardness	
			HRC	HB
Сталь 45 / Steel 45	Закалка 850°C в воде, отпуск 450°C Hardening 850°C in water, tempering 450°C	980	50	200
65Г / 65G	Закалка 830°C в масле, отпуск 200°C Hardening 830°C in oil, tempering 200°C	1670	61	-
30ХГСА / 30HGSA	Закалка 880°C в масле, отпуск 540°C, вода Hardening 880°C in oil, tempering 540°C, water	1080	-	225
20ХГР / 20HGR	Закалка 880°C в масле, отпуск 200°C в масле Hardening 880°C in oil, tempering 200°C in oil	1490	45	-
Сталь 40 / Steel 40	Закалка 850°C в масле, отпуск 200°C в масле Hardening 850°C in oil, tempering 200°C in oil	930	-	267
X12	Закалка 970°C в масле, отпуск 180°C Hardening 970°C in oil, tempering 180°C	-	62	-
40Х	Закалка 860°C в масле, отпуск 200°C, вода Hardening 860°C in oil, tempering 200°C, water	1760	-	552

¹ Марочник сталей и сплавов / Сост. Ю.Г. Драгунов и др.; Под ред. Ю.Г. Драгунова, А.С. Зубченко. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2015. 1215 с.

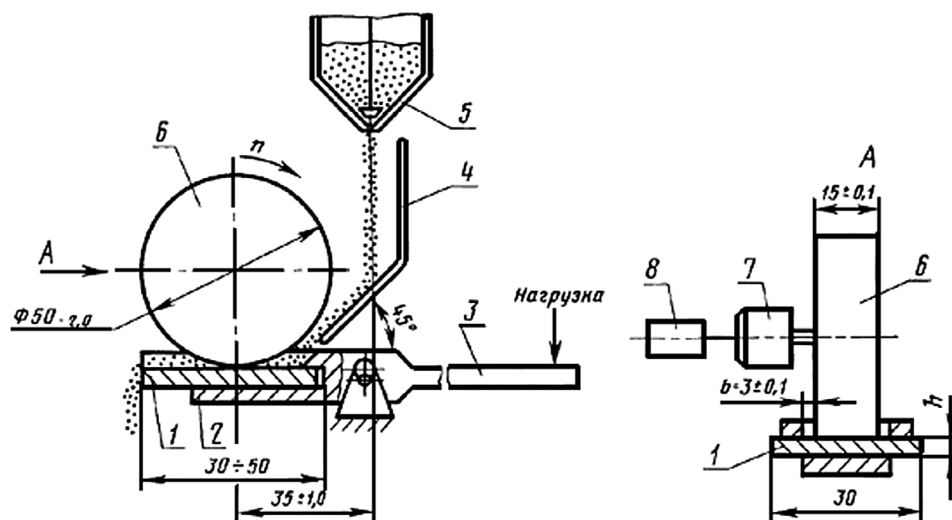


Рис. 1. Схема испытательной установки на абразивный износ:

1 – испытуемый образец; 2 – образцедержатель; 3 – рычаг; 4 – направляющий лоток;
5 – устройство дозирования абразивного материала; 6 – резиновый ролик; 7 – привод;
8 – устройство для контроля суммарного количества оборотов ролика в процессе испытания

Fig.1. Scheme of the abrasive wear testing installation:

1 – test sample; 2 – sample holder; 3 – lever; 4 – guide tray; 5 – abrasive material dosing device; 6 – rubber roller;
7 – drive; 8 – device for controlling the total number of the roller's turnovers during the test

Дозирующее устройство обеспечивало непрерывное поступление абразивного материала в зону контакта.

Испытание образца из исследуемого материала продолжали в течение времени, обеспечивающего рекомендуемое количество оборотов ролика (табл. 2).

Перед проведением испытаний замеряли твердость образцов по методу Виккерса согласно ГОСТ 2999-74.

Образцы промывали и взвешивали до испытаний и после них на аналитических весах «ГОСМЕТР ВЛ-224» с точностью до 0,001 г.

Испытания образцов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы проводились согласно ГОСТ 23.208-79.

В соответствии ГОСТ 28818-90 в качестве абразивного материала использовали электрокорунд белый 25А (шлифзерно) – 0,212...0,425 (F60), шлифзерно из синтетического корунда с наивысшим содержанием оксида алюминия (Al_2O_3) до 99%, определяющим показатель твердости 9 по шкале Мооса.

За эталонный материал принят образец из стали 45 в состоянии поставки твердостью $HV = 200$, относительная износостойкость которого принята как $\epsilon_{ст} = 1$.

Результаты и их обсуждение. Изнашивание образцов из исследуемых материалов в лабораторных условиях моделирует процесс изнашивания рабочих органов, работающих в почве.

Работа сельскохозяйственной техники происходит в условиях высокой запыленности окружающей среды, неуставившегося режима нагружения, повышенной влажности, кислотности, щелочности,

абразивности обрабатываемой среды, ускоряющих износ деталей и сокращающих срок службы сельскохозяйственных машин.

В 1 м^3 пылевидного облака содержится от 0,04 до 5 г пыли, которая на 60...80% состоит из взвешенных частиц минералов (кварц, корунд, оксиды алюминия и другие элементы). Анализ состава пыли, взятой в разных регионах Московской области, показывает содержание кварца в ней почти 80%, оксида алюминия – 11% [2].

В структуре обрабатываемых почв содержится от 36 до 70% минеральных частиц кварца и гранита [3]. Микротвердость кварцевых частиц колеблется в пределах 10,5...11,3 тыс. МПа, оксида алюминия – 21 тыс. МПа. Поверхностная микротвердость большинства деталей сельскохозяйственных машин составляет 7...8 тыс. МПа, что примерно в 1,5 раза меньше микротвердости кварцевых частиц и более чем в 2,5 раза меньше твердости частиц оксида алюминия.

Таблица 2

Рекомендуемое количество оборотов ролика
в зависимости от твердости образцов

Table 2

Recommended number of the roller's turnovers
depending on the sample hardness

Твердость образцов, HV Sample hardness, HV	Количество оборотов ролика, мин ⁻¹ Number of the roller's turnovers, min ⁻¹
До 400 / Up to 400	600
400...800	1800
Более 800 / Over 800	3600

Проблеме абразивного изнашивания посвящены работы ряда ученых: М.М. Хрущева, М.М. Тененбаума, Н.В. Крагельского, Б.М. Костецкого и др. Оценить способность абразивных частиц внедряться в поверхностный слой деталей и разрушать его при движении можно по формуле:

$$K_r = \frac{H_m}{H_a},$$

где H_m – микротвердость испытуемого материала; H_a – микротвердость абразива.

Считается критическим значение $K_r = 0,5 \dots 0,7$. Прямое разрушение поверхностного слоя материала абразивной частицы с сохранением ее целостности происходит при $K_r < 0,5$. Прямое разрушение маловероятно при $K_r > 0,7$.

По данным исследований М.М. Хрущева, для минимизации абразивного износа поверхностная твердость материала должна быть не ниже 17,5 тыс. МПа, то есть примерно в 1,5 раза выше микротвердости кварца. При изготовлении лемехов из стали 65Г с термообработкой обеспечивается $K_r = 0,75$, что объясняет интенсивный их износ при эксплуатации.

За рубежом для изготовления рабочих органов сельскохозяйственной техники используют стали Creusabro 4800, N22CB, Hardox 500, Hardox 600, Domex 22MnB5 и другие, которые относятся к классам прочности 1200...1600 МПа и имеют высокую ударную вязкость [9]. Например, стали марки Domex, применяемые для изготовления лемехов, ножей и других деталей, работающих в абразивной среде, содержат от 0,20 до 0,42% С, до 0,40% Si, от 1,1 до 1,5% Mn, от 0,1 до 0,6 Cr, а также В в концентрации от 0,0008 до 0,005. Такое соотношение элементов обеспечивает значение временного сопротивления после закалки в воду $\sigma_B = 1580 \dots 2050$ МПа и твердость 460...637 HV.

Стали марки Hardox 500-600, производимые компанией SSAB, также имеют высокую твердость, износостойкость, ударную вязкость. Такое сочетание достигается за счет дополнительного легирования (Mo и Ni – для повышения вязкости; Cr и добавка В – для повышения прокаливаемости и уменьшения размера структурных элементов мартенсита), повышения чистоты стали путем снижения $P \leq 0,015\%$. При этом стоимость отмеченных зарубежных сталей в 1,5...2 раза выше отечественных. Ресурс деталей, например, из стали Hardox, в 5 раз выше, чем у аналогичных деталей из отечественных сталей.

В углеродистых сталях при повышении температур выше определенного уровня происходит ряд фазовых превращений, вызывающих изменения

кристаллической решетки. При критических температурах, значение которых зависит от процентного содержания углерода, происходит распад карбида железа, образуется раствор углерода в железе – аустенита. При медленном остывании аустенит постепенно распадается, и кристаллическая решетка приобретает исходное состояние. Если углеродистые стали охлаждать с высокой скоростью, то в зависимости от режима закалки в них образуются различные фазовые состояния, самый прочный из которых – мартенсит. Но, к сожалению, он обладает повышенной хрупкостью, которая возрастает с увеличением содержания углерода в стали. Поэтому стали с мартенситной структурой необходимо подвергать отпуску, главная цель которого заключается в повышении пластичности и ударной вязкости закаленной стали.

Структура исследуемых образцов низколегированных сталей после закалки и последующего отпуска состоит из реечного мартенсита с небольшим количеством остаточного аустенита. Мартенсит обеспечивает высокие прочностные свойства – такие, как твердость, временное сопротивление и устойчивость к абразивному износу. Остаточный аустенит отвечает за высокую пластичность и ударную вязкость. Дополнительное упрочнение достигается за счет добавки элементов, которые образуют карбонитриды, для измельчения структурных элементов реечного мартенсита.

В качестве критерия оценки и сравнения материалов по износостойкости принята относительная износостойкость, определяемая отношением износа эталона к износу испытуемого образца с учетом плотности исследуемых материалов. Результаты лабораторных испытаний приведены в таблице 3.

Анализируя данные таблицы 3, можно сказать, что наилучший результат по износостойкости достигнут для стали 0,43C-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti (партия 2) с термической обработкой «Закалка» (рис. 2, 2*). Такой результат достигается за счет образования карбонитридов, обогащенных Nb. В результате получаем высокий предел прочности: $\sigma_B = 2170$ МПа. Эта же сталь с термической обработкой «Закалка и отпуск» имеет относительную износостойкость на 10,7% ниже, что объясняется происходящими в структуре стали фазовыми превращениями, которые незначительно уменьшают предел прочности $\sigma_B = 2040$ МПа, но повышают пластичность стали.

Таким образом, проведенные исследования показали широкий диапазон изменения износостойкости в зависимости от термической обработки. Существенный вклад в изменение износостойкости изученных сталей вносит карбидная фаза, которая весьма

чувствительна к изменению режимов термической обработки. Это дает возможность в сравнительно небольших интервалах изменения температур закалки

и отпуска воздействовать на структуру сталей, тем самым воздействовать на свойства, которые обеспечивают наибольшую износостойкость.

Таблица 3

Интенсивность абразивного изнашивания в зависимости от термической обработки*

Table 3

Abrasive wear intensity depending on the heat treatment*

Образец Sample	Твердость HV Hardness HV	Интенсивность износа, г/м Wear rate, g/m	Относительная износостойкость Relative wear resistance, K_n
Сталь 45/ Steel 45	202,4	0,1000	1,0000
65Г** / 65Г**	258,2	0,0965	1,0391
30ХГСА**/ 30CRSA**	338,7	0,0958	1,0469
Партия 1 / Batch 1: * **	585,3 559,8	0,0638 0,0663	1,5710 1,5131
Партия 2 / Batch 2: * **	702,0 610,0	0,0581 0,0651	1,7252 1,5405
Партия 3 / Batch 3: * **	527,5 467,1	0,0876 0,0692	1,1449 1,4486
Партия 4 / Batch 4: * **	675,0 577,1	0,0630 0,0746	1,5917 1,3439

Примечание. Термическая обработка: * – закалка; ** – закалка + отпуск.

Note: Heat treatment: * – quenching; ** – quenching + tempering.

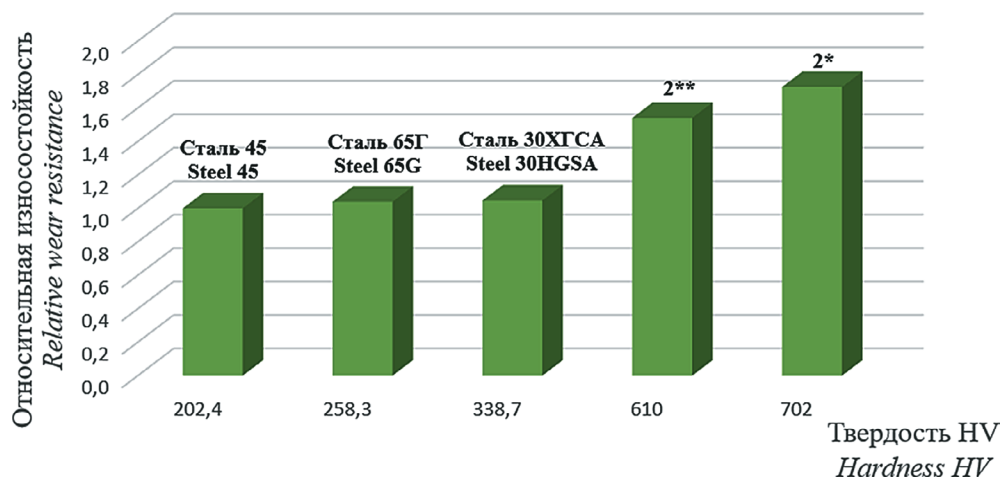


Рис. 2. Зависимость относительной износостойкости от твердости сталей при термической обработке «Закалка» и «Закалка + отпуск 280°C»

Fig. 2. Relationship between the relative wear resistance and hardness of steels during heat treatment “Quenching” and “Quenching + Tempering 280°C”

Выводы

1. Сталь 65Г, относительная износостойкость которой практически идентична износостойкости стали 45 (эталон), наиболее распространена при изготовлении рабочих органов сельскохозяйственных машин.

2. Из разработанных сталей наивысшую износостойкость в абразивной среде показала закаленная сталь 0,43C-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti. Износостойкость разработанной стали в сравнении со сталью 65Г выше в 1,66 раза.

Список использованных источников

1. Ерохин М.Н., Новиков В.С. Прогнозирование долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин при их разработке // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2017. № 6. С. 56-62. EDN: ZWKXYF.
2. Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Чупятков Н.Н. Способы модифицирования поверхностей трения деталей машин: Монография. М.: ФГБОУ ВПО МГАУ, 2014. 140 с. EDN: YOKZJR
3. Новиков В.С. Обеспечение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин: Монография. М.: ИНФРА-М, 2018. 155 с. EDN: YAOQRF
4. Долженко А.С., Долженко П.Д., Беляков А.Н., Кайбышев Р.О. Микроструктура и ударная вязкость высокопрочной низколегированной стали после темпформинга // Физика металлов и металловедение. 2021. Т. 122, № 10. С. 1091-1100. EDN: XIONDW
5. Способ получения высокопрочной хромомолибденовой стали: Патент № 2779102 РФ, МПК C22C 38/22 (2006.01), C21D8/00 (2006.01) / А.Н. Беляков, С.М. Гайдар, О.Н. Дидманидзе, А.С. Долженко, В.А. Дудко, Р.О. Кайбышев. № 2021133384, заяв. 17.11.2021: опубл. 31.08.2022. 9 с. EDN: QRZCEE
6. Dolzhenko A., Pydrin A., Gaidar S., Kaibyshev R., Belyakov A. Microstructure and strengthening mechanisms in an hsla steel subjected to tempforming. *Metals*. 2022;12(1):48. <https://doi.org/10.3390/met12010048>
7. Dolzhenko A., Kaibyshev R., Belyakov A. Tempforming strengthening of a low-alloy steel. *Materials*. 2022;15(15):5241. <https://doi.org/10.3390/ma15155241>
8. Dudko V., Yuzbekova D., Gaidar S., Vetrova S., Kaibyshev R. Tempering behavior of novel low-alloy high-strength steel. *Metals*. 2022;12(12):2177. <https://doi.org/10.3390/met12122177>
9. Krauss G. Steels: Processing, Structure, and Performance: ASM International – Materials Park, Ohio, USA, 2005. 705 с перенос

Вклад авторов

М.Н. Ерохин – научное руководство, формулирование основных направлений исследования.

С.М. Гайдар – научное руководство, формулирование общих выводов. Д.М. Скороходов – доработка текста и общих выводов.

С.М. Ветрова – литературный анализ, обработка результатов исследования.

А.С. Барчукова – обработка результатов исследования, подготовка рукописи.

Конфликт интересов

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

Статья поступила в редакцию 27.02.2023; поступила после рецензирования и доработки 21.03.2023; принята к публикации 21.03.2023

References

1. Erokhin M.N., Novikov V.S. Forecasting durability of working elements of designed soil-cultivating machines. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2017;6:56-62. (In Rus.)
2. Erokhin M.N., Kazantsev S.P., Chupyatov N.N. Methods for modifying friction surfaces of machine parts: Monograph. Moscow, FGBOU VPO MGAU, 2014. 140 p. (In Rus.)
3. Novikov V.S. Ensuring the durability of the working tools of tillage machines: Monograph. Moscow, INFRA-M, 2019. 155 p. (In Rus.)
4. Dolzhenko A.S., Dolzhenko P.D., Belyakov A.N., Kaibyshev R.O. Microstructure and impact toughness of high-strength low-alloy steel after tempforming. *Fizika metallov i metallovedenie*. 2021;122(10):1091-1100. (In Rus.)
5. Belyakov A.N., Gaidar S.M., Didmanidze O.N., Dolzhenko A.S., Dudko V.A., Kaibyshev R.O. Method for producing high-strength chromium-molybdenum steel: Patent No. 2779102 RF, IPC C22C38/22 (2006.01), C21D8/00 (2006.01). No. 2021133384, 2022. (In Rus.)
6. Dolzhenko A., Pydrin A., Gaidar S., Kaibyshev R., Belyakov A. Microstructure and Strengthening Mechanisms in an HSLA Steel Subjected to Tempforming Metals. 2022;12:48. <https://doi.org/10.3390/met12010048>
7. Dolzhenko A., Kaibyshev R., Belyakov A. Tempforming strengthening of a low-alloy steel grade. *Materials*. 2022;15:5241. <https://doi.org/10.3390/ma15155241>
8. Dudko V., Yuzbekova D., Gaidar S., Vetrova S., Kaibyshev R. Tempering behavior of novel low-alloy high-strength steel. *Metals*. 2022;12:2177. <https://doi.org/10.3390/met12122177>
9. Krauss G. Steels: Processing, Structure, and Performance: ASM International – Materials Park, Ohio, USA, 2005. 705 c.

Contribution of the authors

M.N. Erokhin – research supervision, conceptualization, formulation of the main research lines

S.M. Gaidar – research supervision, formulation of general conclusions.

D.M. Skorokhodov – text revision and general conclusions.

S.M. Vetrova – literature review, processing of the research results.

A.S. Barchukova – processing of the research results, preparation of the manuscript draft.

Conflict of interests

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

Received 27.02.2023; revised 21.03.2023; accepted 21.03.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 62-799

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-79-83

**Обеспечение контролепригодности подшипниковых узлов ведомого вала коробки перемены передач автомобиля КАМАЗ-5320***Александр Геннадиевич Пастухов, д-р техн. наук, профессор*pastukhov_ag@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8249-8970>*Евгений Петрович Тимашов[✉], д-р техн. наук, доцент*timachov@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-0740-8714>

Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина; 308503, Российская Федерация, Белгородская обл., Белгородский р-н, п. Майский, ул. Вавилова, 1

Аннотация. Техническая диагностика, в частности, автоматическое диагностирование узлов механических трансмиссий, обеспечивает повышение показателей надежности транспортных и технологических машин. Технология контроля механической трансмиссии на основе цифровой термодиагностики предусматривает обеспечение контролепригодности диагностируемых узлов. Приспособленность узла к цифровой термодиагностике обусловлена его расположением, наличием смежных источников тепловыделения, величиной силовых и кинематических нагрузок. Контролепригодность узла обеспечивается расчетом теоретической величины температуры в зоне трения, определением зоны, пригодной для измерения диагностической температуры, вычислением зависимости между упомянутыми температурами. Контроль с применением специально разработанных программно-аппаратных комплексов производится автоматически путем сравнения температуры в зоне трения с предельной величиной. Для обеспечения контролепригодности подшипника 50412 ГОСТ 2893-82 коробки перемены передач автомобиля КАМАЗ-5320 определена теоретическая величина температуры в зоне трения 184,9°C при работе трансмиссии на первой передаче. Конечно-элементный анализ модели подшипникового узла в условиях стационарной теплопроводности позволил определить коэффициент пропорциональности 0,0812, связывающий температуру в зоне трения с диагностической температурой на поверхности крышки подшипника. В результате теоретических и экспериментальных исследований, включая тепловизионное наблюдение, определена температура в зоне трения 242,6°C, свидетельствующая о предотказном состоянии диагностируемого подшипника. Сходимость теоретической и экспериментальной температур обосновывает применение технологии цифровой термодиагностики к исследуемому узлу трансмиссии. Результаты исследований обосновывают применение технологии цифровой термодиагностики и установку датчика температуры на поверхности крышки подшипника.

Ключевые слова: трансмиссии, техническая диагностика, контролепригодность, подшипник, конечно-элементный анализ, тепловизионное наблюдение

Формат цитирования: Пастухов А.Г., Тимашов Е.П. Обеспечение контролепригодности подшипниковых узлов ведомого вала коробки перемены передач автомобиля КАМАЗ-5320 // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 3. С. 79-83. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-79-83>.

© Пастухов А.Г., Тимашов Е.П., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Ensuring the controllability of rear bearings used in the driven shaft of the KAMAZ-5320 gearbox*Aleksandr G. Pastukhov, DSc (Eng), Professor*pastukhov_ag@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8249-8970>*Evgeniy P. Timashov[✉], DSc (Eng), Associate Professor*timachov@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-0740-8714>

Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin; 308503, 1, Vavilova Str., Mayskiy, Belgorod District, Belgorod Region, Russian Federation

Abstract. Technical diagnostics, and, particularly, automatic diagnostics of mechanical transmission units increases the reliability indicators of transport and processing machines. The technology of monitoring mechanical transmissions

based on digital thermal diagnostics ensures the controllability of the diagnosed units. The unit's adaptability to digital thermal diagnostics depends on its location, the presence of adjacent heat sources, the amount of power and kinematic loads. The controllability of the unit is ensured by determining the theoretical temperature value in the friction zone and the zone suitable for measuring the diagnostic temperature, and stating the relationship between the above temperatures. The control is carried out automatically, using specially developed software and hardware systems. To ensure the controllability of the bearing 50412 GOST 2893-82 of the KAMAZ-5320 gearbox, the authors determined the theoretical temperature value in the friction zone of 184.9°C during the gearbox operation in the first gear. The finite element analysis of the bearing assembly model under steady-state heat conduction determined a proportionality coefficient of 0.0812 relating the friction zone temperature to the diagnostic temperature on the bearing cap surface. As a result of theoretical and experimental studies involving thermal imaging, the temperature in the friction zone of 242.6°C was determined, indicating the pre-failure state of the diagnosed bearing. The approximate correspondence of theoretical and experimental temperatures showed the possibility of applying digital thermal diagnostics technology to the studied transmission unit. The comprehensive studies made it possible to justify the use of the digital thermal diagnostics technology and localize an area for installing a temperature sensor, namely, the bearing cover surface.

Keywords: transmission gears, technical diagnostics, thermal diagnostics, controllability, bearing, finite element analysis, thermal imager

For citation: Pastukhov A.G., Timashov E.P. Ensuring the controllability of rear bearings used in the driven shaft of the KAMAZ-5320 gearbox. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(3):79-83. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-79-83>.

Введение. Надежность транспортных и технологических машин агропромышленного комплекса является одним из ключевых факторов обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации [1, 2]. Эффективная техническая диагностика – важный компонент системы технического обслуживания и ремонта, а применение автоматического диагностирования обеспечивает повышение показателей надежности техники [3-5]. Технология контроля механической трансмиссии на основе цифровой термодиагностики предусматривает обеспечение контролепригодности диагностируемых узлов. Приспособленность узла к цифровой термодиагностике обусловлена его расположением, наличием смежных источников тепловыделения, величиной силовых и кинематических нагрузок. При отработке узла на контролепригодность рассчитывают теоретическую величину температуры в зоне трения, определяют зоны, пригодные для измерения диагностической температуры, вычисляют зависимость между упомянутыми температурами, а контроль производят путем сравнения температуры в зоне трения с предельной величиной [6].

Цель исследований: обосновать применение технологии цифровой термодиагностики к диагностированию подшипника 50412 коробки перемены передач автомобиля КАМАЗ-5320.

Материалы и методы. В исследованиях использовались классические методы расчета деталей машин, определения силовых и кинематических характеристик, конечно-элементный анализ стационарной теплопроводности и тепловизионное наблюдение. Материалы исследований – кинематические схемы, чертежи трансмиссии автомобиля КАМАЗ-5320, а также

основные положения технологии контроля механической трансмиссии на основе цифровой термодиагностики.

Результаты и их обсуждение. В технологии контроля механической трансмиссии на основе цифровой термодиагностики используют контактные и бесконтактные датчики температуры, применение которых обеспечивает непрерывный контроль диагностируемого узла. Для диагностирования неподвижных узлов предпочтительно применение контактных датчиков температуры, для выбора места размещения которых целесообразно проводить тепловизионное наблюдение и осуществлять анализ термограмм.

На рисунке 1 представлены фотография (а) и термограмма (б) участка трансмиссии автомобиля КАМАЗ-5320, включающего в себя коробку перемены передач и карданный вал при температуре окружающего воздуха $\Theta_0 = 20,5^\circ\text{C}$.

Анализ термограммы рисунка 1 показывает существенное тепловыделение на поверхности крышки заднего подшипника ведомого вала коробки перемены передач и нагрев поверхности до $40,2^\circ\text{C}$. Показательно, что карданный шарнир в основном нагревается от тепловыделения исследуемого подшипника. Целесообразно контактный датчик температуры монтировать на крышку подшипника, которая является зоной, пригодной для измерения диагностической температуры Θ_D . Ее величина определяется по формуле [7]:

$$\Theta_D = \Theta'_D - \Theta_0, \quad (1)$$

где Θ_D – диагностическая температура, $^\circ\text{C}$; Θ'_D – измеренная температура, $^\circ\text{C}$; Θ_0 – температура окружающего воздуха, $^\circ\text{C}$.

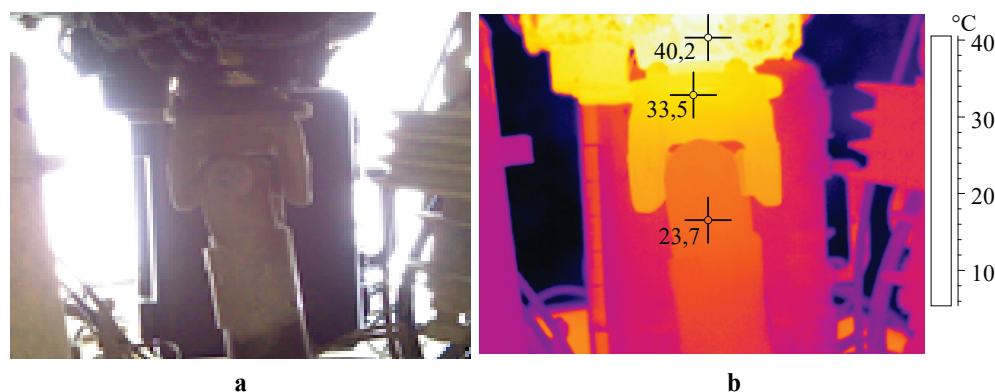


Рис. 1. Фотография (а) и термограмма (b) участка трансмиссии автомобиля КАМАЗ-5320

Fig. 1. Photo (a) and thermogram (b) of the transmission section of the KAMAZ-5320 truck

При отработке узла на применимость технологии цифровой термодиагностики необходимо определить теоретическую величину температуры в зоне трения как функцию от конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров, показывающую долю потерь механической энергии на трение и выделение тепла. Эта величина при штатном режиме эксплуатации не должна превышать 215...250°C. Только в случае равенства или приблизительного равенства теоретической и экспериментальной величин температуры в зоне трения можно судить о применимости технологии цифровой термодиагностики к диагностированию конкретного узла. Теоретическая величина температуры в зоне трения зависит от комплекса факторов и определяется по формуле [7]:

$$\Theta_F = \frac{\delta f F \omega}{2h \left(\lambda \sqrt{\frac{2\alpha(h + \pi r)}{\lambda h \pi r}} + k' \rho c \cdot 2,6 \sqrt{\frac{a \omega r}{\lambda_d}} \right)}, \quad (2)$$

где Θ_F – температура в зоне трения, °C; δ – коэффициент распределения теплоты между трущимися телами; f – коэффициент трения; F – нагрузка на подшипник, Н; ω – угловая скорость, с⁻¹; h – длина шипа, м; r – радиус шипа, м; λ – теплопроводность, Вт/м°C; α – коэффициент теплоотдачи поверхности, Вт/м²°C; k' – коэффициент пропорциональности; ρ – плотность материала, кг/м³; c – удельная теплоемкость, Дж/кг °C; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; λ_d – длина волны неровностей на трущейся поверхности, м.

Для расчета по формуле (2) используем теплофизические коэффициенты для стали, а геометрические параметры определим, заменив размеры шарикоподшипника 50412 ГОСТ 2893-82 с размерами 60×150×35 мм размерами условной модели подшипника скольжения с длиной шипа $h = 35$ мм и радиусом $r = 52,5$ мм. Для определения радиальной нагрузки и угловой скорости используем результаты теоретического расчета при работе трансмиссии на первой

передаче: крутящий момент на выходном валу – 4598 Нм, частота вращения – 333 мин⁻¹ [8]. Делительный диаметр зубчатого колеса первой передачи выходного вала равен 252 мм, тогда сила, действующая на вал от зубчатого зацепления, –

$$F = \frac{2T}{d \cos \alpha_w} = \frac{2 \cdot 4598}{0,252 \cdot \cos 20^\circ} = 38821 \text{ Н}, \quad (3)$$

где F – сила от зубчатого зацепления, Н; T – крутящий момент на валу, Нм; d – делительный диаметр зубчатого колеса, м; α_w – угол зацепления, град.

На рисунке 2 представлена расчетная схема для определения нагрузки в подшипниковой опоре.

С учетом $F = 38821$ Н и размеров деталей коробки перемены передач определяем нагрузку на подшипник $R_B = 35391$ Н, тогда по формуле (2) $\Theta_F = 184,9^\circ\text{C}$. Полученная температура не превышает допустимую 215...250°C, что позволяет применить технологию цифровой термодиагностики.

Использование поверхности крышки подшипника для установки датчика температуры можно обосновать по условию приблизительного равенства теоретической и экспериментальной величин температуры в зоне трения. Экспериментальное измерение температуры в зоне трения подшипника вызывает

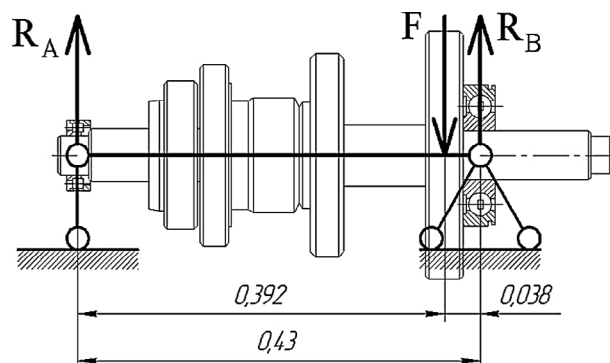


Рис. 2. Схема к расчету нагрузки в подшипниковой опоре

Fig. 2. Diagram of load calculation in a bearing support

существенные затруднения, поэтому можно произвести косвенное измерение на основе зависимости между диагностической температурой и температурой в зоне трения. Определить зависимость между диагностической температурой и температурой в зоне трения позволяет конечно-элементный анализ модели подшипникового узла с расчетом стационарной теплопроводности при использовании библиотеки APM FEM в программе КОМПАС-3D V21. На рисунке 3 представлены результаты проведенного анализа.

В результате многократного моделирования с приложением температуры в зоне трения от 0 до 240°C получен график зависимости между диагностической температурой и температурой в зоне трения, аппроксимация которого линейной функцией

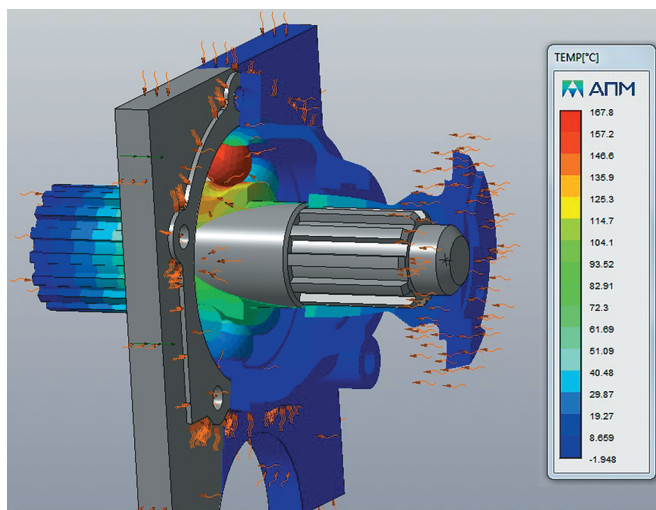


Рис. 3. Карта температурных полей подшипникового узла

Fig. 3. Bearing unit temperature field map

позволила определить величину коэффициента пропорциональности конечно-элементной модели $k = 0,0812$ (рис. 4).

Определим теоретическую величину диагностической температуры с учетом коэффициента пропорциональности конечно-элементной модели:

$$\Theta_D = \Theta_F \cdot k = 184,9 \cdot 0,0812 = 15,0^\circ\text{C}. \quad (4)$$

Полученный результат показывает, что при теоретическом значении температуры в зоне трения 184,9°C при работе трансмиссии на первой передаче температура поверхности крышки подшипника для установки датчика будет на 15,0°C выше температуры окружающей среды (воздуха).

Обратную задачу решаем с использованием полученного коэффициента пропорциональности конечно-элементной модели и результатов измерения, представленных на рисунке 1. Измеренная температура на поверхности крышки подшипника составляет 40,2°C, тогда с учетом температуры воздуха 20,5°C диагностическая температура составит: $\Theta_D = 40,2 - 20,5 = 19,7^\circ\text{C}$. С учетом коэффициента пропорциональности конечно-элементной модели величина температуры в зоне трения составит: $\Theta_F = 19,7 / 0,0812 = 242,6^\circ\text{C}$. Полученная величина не превышает 250°C, однако может свидетельствовать о предотказном состоянии диагностируемого подшипникового узла.

Исследования, проведенные другими авторами, показали аналогичные результаты как в части применения технологии термодиагностики к контролю технического состояния подшипниковых узлов механических трансмиссий, так и в обосновании критерия безотказного состояния достижения предельной температуры в зоне трения [9-15].

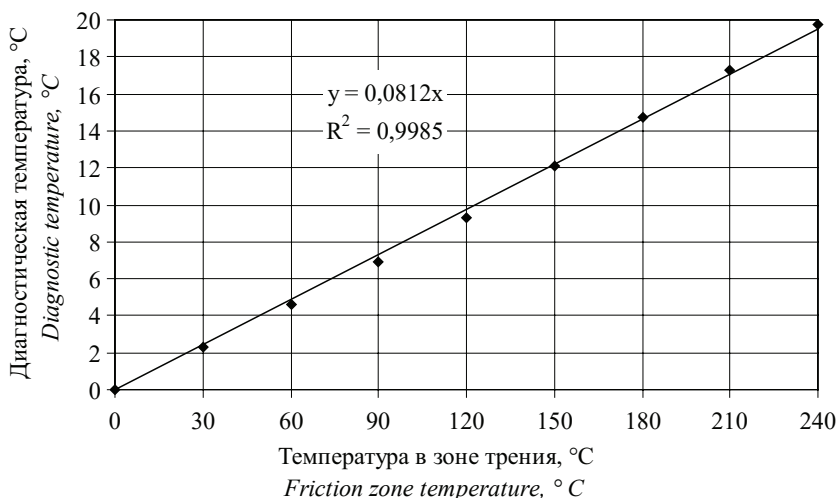


Рис. 4. Определение коэффициента пропорциональности конечно-элементной модели

Fig. 4. Determination of the proportionality coefficient of the finite element model

Выводы

1. Определена теоретическая величина температуры в зоне трения заднего подшипника выходного вала коробки перемены передач 184,9°C при работе трансмиссии на первой передаче.

2. Методом конечно-элементного анализа определен коэффициент пропорциональности 0,0812, связывающий температуру в зоне трения с диагностической температурой на поверхности крышки подшипника.

3. Тепловизионное наблюдение позволило определить температуру в зоне трения (242,6°C) и выявить предотказное состояние диагностируемого подшипника.

4. Результаты исследований обосновывают применение технологии цифровой термодиагностики и установку датчика температуры на поверхности крышки подшипника.

Список использованных источников / References

1. Pastukhov A.G., Timashov E.P. Analytical model of temperature condition elementary interface of the cardan joint. *Traktori i pogonske mašine*. 2018;23(1-2):43-50. EDN: VNXWZA

2. Gabitov I., Negovora A., Nigmatullin S., Kozev A., Razyapov M. Development of a method for diagnosing injectors of diesel engines. *Komunikacie*. 2021;23(1):B46-B57. <https://doi.org/10.26552/COM.C.2021.1.B46-B57>

3. 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>

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. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-45-50>

4. Ли Р.И., Киба М.Р., Быконя А.Н. Исследование трибологических параметров и контактных напряжений в подшипниках качения автомобилей // *Наука в Центральной России*. 2020. № 4(46). С. 76-84. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2020-4-76-84>

Li R.I., Kiba M.R., Bykonya A.N. Research of tribological parameters and contact stresses in automobile rolling bearings. *Science in the Central Russia*. 2020;4(46):76-84. (In Rus.)

5. Ерохин М.Н., Пастухов А.Г., Тимашов Е.П. Оценка износа крестовин шарниров типа CR115, применяемых в тракторах JOHN DEERE // *Труды ГОСНИТИ*. 2017. Т. 126. С. 14-21. EDN: YLPRMP

Erokhin M.N., Pastukhov A.G., Timashov E.P. Evaluating the wear of CR115-type universal joints used in JOHN DEERE tractors. *Trudy GOSNITI*. 2017;126:14-21. (In Rus.)

6. Пастухов А.Г., Тимашов Е.П. Технология термометрического неразрушающего контроля агрегатов механических трансмиссий // *Агроинженерия*. 2020. № 2 (96). С. 33-39. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-2-33-39>

Pastukhov A.G., Timashov E.P. Technology for thermometric non-destructive testing of mechanical transmission units. *Agricultural Engineering*. 2020;2(96):33-39. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-2-33-39>

7. Pastukhov A., Timashov E., Kravchenko I., Parnikova T. Adaptivity of thermal diagnostics method of mechanical transmission

assemblies. *Engineering for Rural Development*: 19, Jelgava, 2020. Pp. 107-113. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF024>

8. Ляшенко М.В., Соколов-Добрев Н.С., Шеховцов В.В., Потапов П.В., Клементьев Е.В., Долотов А.А. Исследование Изменения КПД трансмиссии в зависимости от условий нагружения // *Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт*. 2016. № 4 (16). С. 11-16. EDN: WMTNYT

Lyashenko M.V., Sokolov-Dobrev N.S., Shekhovtsov V.V., Potapov P.V., Klementiev E.V., Dolotov A.A. Research of transmission efficiency change depending on load modes. *Energy and resource saving: industry and transport*. 2016;4(16):11-16. (In Rus.)

9. Szurgacz D., Zhironkin S., Vöth S., Pokorny J., Spearling A.J.S., Cehlar M., Stempniak M., Sobik L. Thermal imaging study to determine the operational condition of a conveyor belt drive system structure. *Energies*. 2021;14(11):3258. <https://doi.org/10.3390/en14113258>

10. Stempniak M., Zhironkin V., Trzop K., Szurgacz D. Preliminary research to determine the thermal condition of the belt conveyor's drive unit in an underground hard coal mine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;684:012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/684/1/012010>

11. Jakubek B., Grochalski K., Rukat W., Sokol H. Thermovision Measurements of rolling bearings. *Measurement*. 2021;189:110512. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110512>

12. Zverev I.A., Maslov A.R. Thermal model of spindles on rolling bearings. *Russian Engineering Research*. 2017;37(3):189-194. <https://doi.org/10.3103/S1068798X17030224>

13. Ivanov A.S., Murkin S.V. Refined working-temperature calculation of gears, taking account of contact thermal conductivity. *Russian Engineering Research*. 2021;41(11):994-998. <https://doi.org/10.3103/S1068798X21110101>

14. Yakovlev S.N., Mazurin V.L. Contact temperature of a cuff and a rotating shaft // *Russian Engineering Research*. 2019;39 (4):279-282. <https://doi.org/10.3103/S1068798X19040191>

15. 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 24.01.2023; поступила после рецензирования и доработки 06.04.2023; принята к публикации 06.04.2023

Conflict of interests

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

Received 24.01.2023; revised 06.04.2023; accepted 06.04.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-84-90



Модернизация CVD-установки для осаждения карбида хрома на внутренних поверхностях корпуса распылителя форсунки дизельных двигателей

Константин Михайлович Логачёв, аспирант

klogachyov@mail.ru; SPIN-код: 9152-5491, AuthorID: 1134974

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. Износ деталей распылителя форсунки происходит по причине попадания абразивных частиц кварца и оксида алюминия в топливо. Твёрдость кварцевого абразива превышает твёрдость рабочих поверхностей деталей в 1,4 раза, а у оксида алюминия превышение составляет 2,7 раза. Упрочнение одной из деталей распылителя не приводит к достаточному увеличению ресурса, поэтому необходимо упрочнять обе детали прецизионной пары. CVD-метод является наиболее перспективной технологией осаждения износостойких покрытий на стальных деталях машин. Он позволяет получать карбидохромовое покрытие с микротвёрдостью до 19 ГПа (в условиях вакуума 100...0,001 Па) при температурах более 200°C. Анализ имеющихся устройств и обзор патентов известных решений по формированию покрытия из паровой фазы показали невозможность использования этих устройств для восстановления корпуса распылителя. В связи с этим разработаны новая конструкция реактора и схема CVD-установки для осаждения покрытий на внутренних труднодоступных поверхностях корпуса распылителя форсунки. Разработанная CVD-установка учитывает факторы, влияющие на осаждение карбида хрома: термодинамические условия, подача реактива, продолжительность осаждения, параметры установки, адгезия и свойства покрытия. Модернизация CVD-установки обеспечивает получение карбидохромового покрытия на внутренних труднодоступных поверхностях корпуса распылителя форсунки, термодинамическое равновесие химической реакции разложения гексакарбонила хрома при температуре ниже 200°C (ниже уровня низкого отпуска сталей 18X2H4BA, 12X2H4A и 40XH2MA) и контролируемую подачу реакционной среды в труднодоступные зоны формирования покрытий тугоплавких металлов.

Ключевые слова: технология восстановления, корпус распылителя форсунки, гексакарбонил хрома, карбид хрома, осаждение, карбидохромовое покрытие, CVD-метод, модернизация CVD-установки, реактор, вакуум, термодинамические условия

Формат цитирования: Логачёв К.М. Модернизация CVD-установки для осаждения карбида хрома на внутренних поверхностях корпуса распылителя форсунки дизельных двигателей // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 3. С. 84-90. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-84-90>.

© Логачёв К.М., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Upgrading a CVD unit for chrome carbide deposition on the inner surfaces of the fuel injector nozzle body of a diesel engine

Konstantin M. Logachev, postgraduate student

klogachyov@mail.ru

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

Abstract. Fuel injector nozzle parts tend to wear out due to abrasive particles of quartz and aluminum oxide penetrating into the fuel. The hardness of quartz abrasive particles exceeds the hardness of work surfaces in 1.4 times, and that of aluminum oxide – in 2.7 times. Strengthening one part of the fuel injector nozzle does not increase the service life sufficiently, so it is necessary to harden both parts of the precision pair. The CVD method is the most promising technology of wear-resistant coating deposition on steel machine parts. It produces carbide-chrome coating with microhardness up to 19 GPa (in vacuum conditions of 100 to 0.001 Pa) at temperatures above 200°C. The analysis of available devices and the review of patents of known solutions on the coating deposition from a steam phase have

shown the impossibility of using these devices for restoration of the nozzle body. In this respect, the author developed a new reactor design and a scheme of the CVD unit for the coating deposition on the inner hard-to-reach surfaces of the nozzle body. The developed CVD unit takes into account the factors affecting chromium carbide deposition: thermodynamic conditions, reagent feed, deposition duration, unit parameters, adhesion and coating properties. The CVD unit upgrade results in making chromium carbide coating on the inner surfaces of the nozzle sprayer body, achieving thermodynamic equilibrium of chemical reaction of chromium hexacarbonyl decomposition at temperatures below 200°C (below the low tempering level of 18X2H4BA, 12X2H4A and 40XH2MA steel), and ensuring a controlled supply of a reaction medium to hard-to-reach areas, where refractory metal coatings are formed.

Keywords: reduction technology, fuel injector nozzle body, chromium hexacarbonyl, chromium carbide, deposition, carbidochrome coating, CVD-method, CVD-module upgrade, reactor, vacuum, thermodynamic conditions

For citation: Logachev K.M. Upgrading a CVD unit for chrome carbide deposition on the inner surfaces of the fuel injector nozzle body of a diesel engine. Agricultural Engineering (Moscow), 2023;25(3):84-90. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-84-90>.

Введение. К сельскохозяйственным машинам, работающим в тяжёлых условиях, предъявляются высокие требования, касающиеся их надёжности. Более 40% отказов дизелей обусловлено нарушением работы топливоподающей системы. Из общего числа отказов топливной аппаратуры на форсунку ДВС приходится 12%. Согласно проведенному мониторингу не менее 66% неисправностей форсунок автотракторных дизелей приходится на распылитель. В распылителе форсунки изнашиваются направляющие поверхности иглы и корпуса распылителя, уплотнительные их конусные поверхности и распыливающие отверстия [1].

В настоящее время применяется способ восстановления распылителей форсунок путём перекомполюковки, заключающейся в разборке, очистке, дефектовке, выведении следов износа и селективной подборке прецизионных пар. Способ позволяет восстанавливать не более 30% ремфонда распылителей. Кроме того, не решается проблема восстановления распыливающих отверстий.

Известна технология восстановления плунжерных пар топливных насосов высокого давления путём нанесения железоборидного покрытия на наиболее доступную деталь – плунжер. Технология позволяет увеличить ресурс плунжерной пары в 1,7 раза в сравнении с серийными¹.

Разработано большое количество высокотемпературных способов нанесения износостойких покрытий на изношенные прецизионные детали топливной аппаратуры. Нагрев выше 400°C приводит к отпуску применяемых сталей, релаксации внутренних напряжений, что при последующей закалке является причиной значительной деформации (коробления) деталей [2-3].

¹ Казанцев С.П. Разработка комбинированной технологии получения железоборидных покрытий при восстановлении и упрочнении деталей сельскохозяйственной техники: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2006. 32 с. EDN: NJYXMN

Технология восстановления распылителей форсунок дизелей диффузионным хромированием в вакууме рассмотрена в работе [3]. Осаждение карбида хрома методом контактного хромирования проводится при температуре 1220°C в течение 7 ч. При указанных выше недостатках перегрев деталей в течение длительного времени приводит также к росту зерна в стали.

Для сохранения твердости деталей распылителя и исключения повторной закалки температура процесса нанесения карбидохромового покрытия не должна превышать уровень низкого отпуска 200°C (табл.).

CVD-метод позволяет получать карбидохромовые покрытия при температуре 200°C и выше. Процесс осаждения карбида хрома при 200°C проходит нестабильно и не обеспечивает качество упрочняющего покрытия [4-6]. При температуре до 350...400°C осуществляется низкотемпературный режим формирования карбидохромового покрытия, который сопровождается эндотермичностью, вызывая колебание температуры подложки на 10...20°C, что приводит к формированию горизонтально-слоистой структуры износостойкого слоя с включениями примесей продуктов реакции разложения. Получить равномерную горизонтальную структуру покрытия можно при усиленном теплообмене между подложкой и нагревателем и регулировании количества подаваемого в реакционную камеру карбонила.

По нашему мнению, реализация указанных условий при температуре ниже 200°C возможна при поддержании усиленного теплообмена между подложкой и нагревателем с помощью индуктора, выполняющего функцию теплоаккумулятора. Кроме того, в установке для снижения температуры процесса осаждения и уменьшения количества примесей в покрытии необходимо производить осаждение при давлении вакуума 0,01...0,001 Па².

² Сыркин В.Г. CVD-метод. Химическая парофазная металлизация. М.: Наука, 2000. 496 с.

Таблица

Механические свойства сталей деталей распылителя при повышенных температурах^{3,4}

Table

Mechanical properties of the steels of the fuel injector parts at increased temperatures

Деталь Part	Марка стали Steel	Закалка, °C / Hardening tempering, °C		Отпуск, °C Tempering, °C	Механические свойства / Mechanical properties	
		Температура нагрева Temperature	Охлаждающая среда Cooling medium		Температура, °C Temperature, °C	Твердость, HRC Hardness, HRC
Игла Spray Nozzle Needle	9XC	870	Масло Oil	180...240	200	64
					300	63
					400	59
					500	53
					550	50
					600	48
	P6M5	1220	Масло Oil	500...660	200	64
					300	63
					400	62
					500	61
					550	59
					600	57
	P18	1280	Масло Oil	400...600	200	64
					300	63
					400	62
					500	60
					550	58
					600	56
Корпус Spray nozzle body	18X2H4BA	860	Масло Oil	200...500	200	64
					300	63
					400	63
					500	62
					550	61
					600	60
	12X2H4A	790	Масло Oil	180...200	200	62
					300	61
					400	60
					500	58
					550	57
					600	55
	40XH2MA	840	Масло Oil	540...660	200	62
					300	61
					400	59
					500	54
					550	53
					600	49

³ Марочник сталей и сплавов / Сост. Ю.Г. Драгунов и др.; Под ред. Ю.Г. Драгунова, А.С. Зубченко. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2015. 1215 с.

⁴ Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; Под общ. ред. В.Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.

Цель исследований: обоснование конструкции автоматизированной установки для осаждения износостойкого покрытия карбида хрома на внутренних поверхностях корпуса распылителя форсунки ФД-22.

Материалы и методы. CVD-метод разложения металлоорганических соединений (МОС) на прецизионных поверхностях деталей распылителей форсунок позволяет восстанавливать геометрические размеры деталей путём образования на них износостойких покрытий. Анализ устройств, используемых для осаждения покрытий из паровой фазы, выявил их основные преимущества и недостатки.

Для создания условий образования карбидохромового покрытия термическим разложением гексакарбонила хрома $\text{Cr}(\text{CO})_6$ применён метод «Исикавы», определяющий причинно-следственную связь. Предложена конструкция установки для осаждения покрытий на внутренних труднодоступных поверхностях корпуса распылителя форсунки включая направляющую поверхность и распыливающие отверстия.

Осаждение покрытия на наружные поверхности иглы распылителя проводили с помощью вращательного способа [7-10]. Для осаждения карбида хрома на внутренних поверхностях корпуса распылителя в данной работе предложена протяжка реакционной среды при неподвижном рабочем столе.

Результаты и их обсуждение. Патентный поиск и обзор литературы показали, что имеется большое количество зарубежных и отечественных CVD-установок по нанесению износостойких покрытий на стальные детали: *Easy Tube* (США); *SAMCO* (Япония); *VSE_PECVD_100* (Россия); *MOCVD* (Россия); и др. Упрочняющие покрытия

во всех случаях наносят из паровой фазы разложением карбониллов хрома, никеля, железа, вольфрама, ванадия, молибдена, кобальта и других металлоорганических соединений.

Недостатком всех устройств является невозможность осаждения равномерного покрытия на внутренние труднодоступные поверхности деталей – таких, как корпус распылителя форсунки, втулка плунжера ТНВД и др.

Напрямую подводить реакционную среду внутрь корпуса распылителя позволяет устройство [8]. Однако данное устройство не обеспечивает стабильную температуру внутренней поверхности, так как нагрев деталей осуществляется индукционным способом, при котором в поверхностных слоях металла возникают вихревые токи. Взаимодействие подложки с нерегулируемым объёмом реакционной среды приводит к охлаждению этой поверхности, что недопустимо. Кроме того, износостойкое покрытие формируется на всех доступных реакционной среде поверхностях.

Перед конструированием установки учитывались факторы^{5,6} [7, 10-13], влияющие на образование карбидохромового покрытия вследствие термического разложения гексакарбонила хрома и обуславливающие осаждение покрытия с требуемыми свойствами (рис. 1).

Установка должна осуществлять термодинамическое равновесие химической реакции разложения гексакарбонила хрома и обеспечивать контролируемую подачу реакционной среды в зону формирования покрытия. Подача реактива МОС в реактор влияет на продолжительность осаждения карбидохромового



Рис. 1. Факторы, влияющие на осаждение карбидохромового покрытия

Fig. 1. Factors affecting the deposition of a chromium carbide coating

⁵ Кострицкий А.И. Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме. М.: Машиностроение, 1991. 176 с.

⁶ Бобров Г.В., Ильин А.А. Нанесение неорганических покрытий. М.: Интермет Инжиниринг, 2004. 624 с.

покрытия. Регулирование концентрации паров МОС позволяет изменять скорость образования износостойких покрытий и влиять на их свойства. Сцепляемость покрытия с подложкой обеспечивается за счёт соответствующей подготовки поверхности⁴ [10-13]. Правильно подобранные материалы при изготовлении установки позволяют эксплуатировать её в течение долгого времени и получать качественные покрытия⁷. Таким образом, совокупность факторов определяет качество покрытия.

В соответствии с технологическими факторами разработаны новая конструкция реактора (рис. 2) и схема CVD-установки (рис. 3) для осаждения покрытий на внутренние труднодоступные поверхности корпуса распылителя форсунки.

Реактор 1 имеет форму прямоугольного параллелепипеда и оборудован муфтами 2, предназначенными для подачи и откачки инертного газа. В реактор 1 устанавливается монтажный стол 3, в котором содержится газоотвод 4, служащий для удаления продуктов разложения химической реакции из зоны осаждения покрытия. В монтажном столе 3 предусмотрена установочная площадка под индуктор с устанавливаемой в неё стеклотекстолитовой пластиной 5, предназначенной для снижения тепловых потерь.

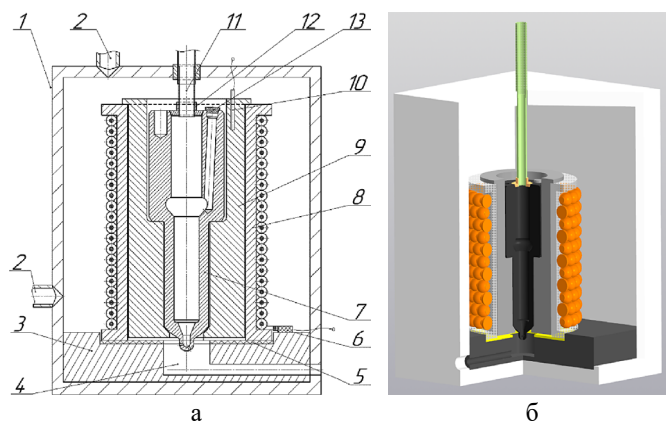


Рис. 2. Реактор для восстановления внутренней поверхности корпуса распылителя форсунки (а – кинематическая схема, б – 3D модель):

- 1 – реактор; 2 – муфта; 3 – монтажный стол;
4 – газоотвод; 5 – пластина; 6 – клемма;
7 – корпус распылителя; 8 – нагреватель; 9 – опора;
10 – термопара; 11 – трубка телескопическая;
12 – втулка центрующая; 13 – заглушка

Fig. 2. Reactor for restoring the inner surface of the fuel injector nozzle body (a – kinematic diagram of the reactor, b – 3D model of the reactor):

- 1 – reactor; 2 – coupling; 3 – mounting table;
4 – gas outlet; 5 – plate; 6 – terminal;
7 – fuel injector nozzle body;
8 – heater; 9 – support; 10 – thermocouple;
11 – telescopic tube; 12 – centering bushing; 13 – stopper

⁷ Розанов Л.Н. Вакуумная техника: Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2007. 400 с.

Индуктор состоит из нагревателя 8, опоры 9 и термопары 10, и в него устанавливается деталь 7. Нагреватель 8 состоит из стальной втулки, на которую намотана нихромовая нить в керамических бусах. Опора 9, изготовленная из бескислородной электролитической меди, устанавливается в нагреватель 8. Для обеспечения равномерного нагрева и фиксации детали 7 в индукторе форма опоры 9 должна дублировать контур детали 7. Опора 9 – быстростъёмная. В случае восстановления разнотипных внутренних поверхностей можно менять форму путём изготовления аналогичной опоры 9, но с внутренней формой, повторяющей внешнюю форму восстанавливаемой детали 7. В опоре 9 устанавливается термопара 10, определяющая температуру нагрева восстанавливаемой детали 7.

Подключение нагревателя 8 к электроцепи осуществляется через быстроразъёмную жаростойкую клемму 6, монтируемую на монтажном столе 3, что позволяет оперативно установить и подключить индуктор.

К корпусу распылителя 7 подводится телескопическая трубка 11, по которой в процессе формирования износостойкого покрытия транспортируются пары металлорганических соединений. Телескопическая трубка 11, выполненная из жаростойкого

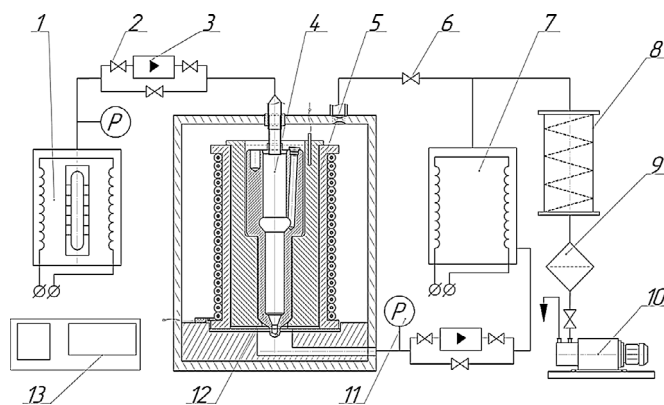


Рис. 3. CVD-установка для формирования износостойкого покрытия карбида хрома на восстанавливаемой внутренней поверхности корпуса распылителя форсунки:

- 1 – сублиматор; 2 – кран (вентиль); 3 – расходомер;
4 – реакционная камера; 5 – индуктор; 6 – кран;
7 – печь доразложения; 8 – охладитель; 9 – фильтр;
10 – вакуумный насос; 11 – датчик давления (вакуумметр);
12 – деталь; 13 – контрольно-измерительная станция

Fig. 3. CVD-installation producing a wear-resistant coating of chromium carbide on the recoverable inner surface of the fuel injector nozzle body:

- 1 – sublimator; 2 – tap (valve); 3 – flow meter;
4 – reaction chamber; 5 – inductor; 6 – tap;
7 – decomposition furnace; 8 – cooler; 9 – filter;
10 – vacuum pump; 11 – pressure sensor; 12 – part;
13 – control and measuring station

полимера, центрируется с деталью 7 через переходную втулку 12, обеспечивая достаточную плотность прилегания втулки 12 к восстанавливаемой детали 7, что определяет равномерную подачу потока паров МОС на внутреннюю восстанавливаемую поверхность. Заглушка 13 устанавливается в топливопровод корпуса распылителя и выполняет функцию защиты от нерационального использования реактива.

В рабочем режиме индуктор нагревается. Нагреватель 8 и опора 9 за счёт коэффициента теплового расширения металлов увеличиваются в размерах, обеспечивая плотную посадку между собой и корпусом распылителя 7 в индукторе, а индуктор жёстко фиксируется в установочной площадке монтажного стола 3. Благодаря этому в реакторе 1 можно обеспечить формирование износостойкого покрытия с помощью протяжки реакционной среды и исключить нерациональный расход реактива.

Разработанный реактор является частью CVD-установки (рис. 3).

Устройство оснащено двумя расходомерами 3, предназначенными для управления режимом формирования покрытия. Первый расходомер 3, идущий после сублиматора 1 (рис. 3), определяет подачу МОС в реакционную камеру 4. Второй расходомер 3, расположенный за реактором, регулирует продолжительность химической реакции разложения и обеспечивает отвод продуктов разложения из реакционной камеры 4. Контроль за давлением вакуума в системе, паров МОС и продуктов разложения осуществляется вакуумметрами 11, расположенными на выходе из сублиматора 1 и реактора.

Устройство работает следующим образом. В сублиматор 1 загружается порошковый реактив гексакарбонила хрома $\text{Cr}(\text{CO})_6$. Открываются вентили 2 расходомеров 3. Открывается кран 6, идущий из реактора, предназначенный для ускоренного создания давления вакуума в реакторе. Включается вакуумный насос 10. На нихромовую нить подаётся ток для нагрева индуктора 5 и корпуса распылителя 12 до температур, установленных CVD-методом. Закрываются кран 2 сублиматора 1 и кран 6. Включается сублиматор 1. Открывается кран сублиматора 2. Пары гексакарбонила хрома (МОС) по трубопроводу подводятся в реакционную камеру 4 через расходомер 3. В месте соприкосновения паров с нагретой поверхностью металла корпуса распылителя 12 образуется покрытие, состоящее из карбидов хрома. Побочным продуктом химической реакции разложения МОС

является угарный газ CO. Он удаляется из реакционной камеры 4 с помощью вакуумного насоса 13 через расходомер 3, печь доразложения 7, в которой окисляется до CO_2 , и, проходя через охладитель 8 и фильтр 9, выбрасывается в атмосферу. Запрограммированная контрольно-измерительная станция 13 осуществляет контроль за нагревом индуктора и паров карбонила, давлением вакуума в установке и паров в сублиматоре, расходом карбонила.

Предлагаемое устройство при оснащении дополнительными сублиматорами, каждый из которых заполняется металлоорганическими соединениями, например, гексакарбонилами вольфрама, ванадия, молибдена, пентакарбонилем железа и тетракарбонилем никеля, позволяет формировать карбидные покрытия из этих соединений на внутренних поверхностях стальных деталей. Процесс получения карбидов вольфрама, ванадия, молибдена, железа и никеля является схожим с процессом получения карбида хрома.

Практическая значимость предлагаемого решения заключается в подводе реакционной среды вглубь отверстий (имеющих глубину больше размера диаметра в два и более раз) и в получении равномерной толщины покрытия на внутренних поверхностях. Разработанное устройство может быть использовано для упрочнения и восстановления деталей, к которым предъявляются требования высокой надёжности и долговечности. Предлагаемое устройство защищено патентом RU216021 U1 [14].

Выводы

1. Разработанная новая конструкция реактора и схема CVD-установки позволяют осаждать карбидохромовое покрытие на внутренних труднодоступных поверхностях корпуса распылителя форсунки.

2. Решена задача по обеспечению термодинамического равновесия химической реакции разложения гексакарбонила хрома при температуре ниже 200°C .

3. Модернизация CVD-установки и конструкция реактора обеспечивают контролируемую подачу реакционной среды в труднодоступные зоны формирования карбида хрома и других тугоплавких металлов.

4. Технический результат обеспечивается термодинамическим равновесием химической реакции разложения гексакарбонила хрома и контролируемой подачей реакционной среды в зону формирования покрытия.

Список использованных источников

1. Скороходов Д.М., Логачёв К.М. Влияние износа деталей распылителей форсунок на показатели автотракторных дизелей // Доклады ТСХА. 2021. Вып. 293. Ч. III. С. 377-380. EDN: PIWDRM
2. Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Пастухов А.Г., Скороходов Д.М., Логачёв К.М. Деформация прецизионных деталей топливной аппаратуры дизелей при восстановлении методом диффузионной металлзации // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. Т. 16, № 3. С. 4-11. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-3-4-11>
3. Скороходов Д.М., Чеха О.В., Логачёв К.М. Анализ способов восстановления деталей топливной аппаратуры дизельных двигателей // Научно-исследовательские публикации. 2022. № 3. С. 61-65. EDN: BUSYJY.
4. Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Чупятков Н.Н. Способы модифицирования поверхностей трения деталей машин: Монография. М.: ФГБОУ ВПО МГАУ, 2014. 140 с. EDN: YOKZJR
5. Логачёв К.М. Обоснование выбора технологии восстановления прецизионных деталей распылителя форсунок дизельных двигателей // Студенчество России: век XXI: Материалы VIII Всероссийской молодёжной научно-практической конференции: В 3 ч. Ч. 2. Орёл, 15 декабря 2021 г. Орёл: Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, 2022. С. 309-317. EDN: EYJZKW.
6. Устройство для нанесения износостойких покрытий на металлические изделия: Патент на полезную модель RU98193 U1, МПК C23C16/18 / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин [и др.]; № 2010114349/02; заявл. 13.04.2010; опубл. 10.10.2010. EDN LQMXXM.
7. Ерохин М.Н., Чупятков Н.Н. Износостойкость прецизионных деталей гидравлических систем, восстановленных карбидохромовым покрытием // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2016. № 3 (73). С. 41-45. EDN: WAGPKB.
8. Ерохин М.Н., Чупятков Н.Н. Повышение износостойкости прецизионных деталей гидравлических систем сельскохозяйственной техники // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2014. № 3. С. 7-10. EDN: SIWALZ.
9. Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Чупятков Н.Н. Износостойкость карбидосодержащих хромовых покрытий, полученных из газовой фазы // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2017. № 5 (81). С. 48-53. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2017-5-48-53>
10. Ерохин М.Н., Плетнёв Л.В., Чупятков Н.Н. Управление процессом формирования карбидохромовых CVD-покрытий на внешней поверхности цилиндрической подложки // Труды ГОСНИТИ. 2016. Т. 124, № 3. С. 26-34. EDN: WWRUIZ.
11. Zhang C., Du Y., Peng Y. and other Thermodynamic modeling of the C-CO-Mo and C-Mo-N ternary systems. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. 2016;37(4):423-437.
12. Hummel W., Mompean J. and other. Chemical thermodynamics of compounds and complexes of U, Np, Pu, Am, Tc, Se, Ni and Zr with selected organic ligands. Boston: Elsevier Science, 2005. 1133 p.
13. Douard A., Maury F., Jorcin J.B. Reactivity of Cr(CO)₆ in atmospheric pressure CVD processes for the growth of various metallurgical coatings. *Reviews on advanced materials science*. 2007;15 (1):24-32.
14. Устройство для формирования износостойкого покрытия из карбида хрома на восстанавливаемой внутренней поверхности корпуса распылителя форсунки: Патент на полезную модель RU216021 U1, МПК C23C16/32, C23C16/54. № 2022120149 / М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев, Н.Н. Чупятков и др.; заявл. 22.07.2022; опубл. 13.01.2023. EDN: VLCYOM.

References

1. Skorokhodov D.M., Logachev K.M. Influence of wear of injector sprayer parts on the performance of autotractor diesel engines. *Doklady TSHA*. 2021;293; III:377-380. (In Rus.)
2. Erokhin M.N., Kazantsev S.P., Pastukhov A.G., Skorokhodov D.M., Logachev K.M. Deformation of precision parts in diesel fuel equipment during diffusion metallization. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022;16(3):4-11. (In Rus.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-3-4-11>
3. Skorokhodov D.M., Chekha O.V., Logachev K.M. Analysis of ways to restore parts of fuel equipment of diesel engines. *Nauchno-issledovatel'skie publikatsii*. 2022;3:61-65. (In Rus.)
4. Erokhin M.N., Kazantsev S.P., Chupyatov N.N. Methods for modifying friction surfaces of machine parts: Monograph. Moscow, FGBOU VPO MGAU, 2014. 140 p.
5. Logachev K.M. Substantiation of technology selection for restoration of precision parts of the nozzle of injectors of diesel engines. *Studenchestvo Rossii: vek XXI: Materialy VIII Vserossiyskoy molodozhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: In three parts. Part 2. Orel, December 15, 2021 Orel: Orel State Agrarian University named after N.I. Parakhin*. 2022:309-317. (In Rus.)
6. Suminov I.V., Epelfeld A.V., Lyudin V.B. et al. Device for applying wear-resistant coatings on metal products: patent RU98193 U1, IPC C23C16/18; No 2010114349/02, 2010. (In Rus.)
7. Erokhin M.N., Chupyatov N.N. Wear resistance of hydraulic system precision components restored with chromium carbide coating. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2016;3(73):41-45. (In Rus.)
8. Erokhin M.N., Chupyatov N.N. Improving the wear resistance of precision parts of hydraulic systems of agricultural machinery. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2014;3:7-10. (In Rus.)
9. Erokhin M.N., Kazantsev S.P., Chupyatov N.N. Wear-resistance of carbide-containing chrome coatings obtained from the gas phase *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2017;5(81):48-53. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2017-5-48-53>
10. Erokhin M.N., Pletnev L.V., Chupyatov N.N. Control of the process of formation of chromium carbide CVD coatings on the outer surface of a cylindrical substrate. *Proceedings of GOS-NITI*. 2016;124(3):26-34. (In Rus.)
11. Zhang C., Du Y., Peng Y. and other Thermodynamic modeling of the C-CO-Mo and C-Mo-N ternary systems. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. 2016;37 (4):423-437.
12. Hummel W., Mompean J. and other. Chemical thermodynamics of compounds and complexes of U, Np, Pu, Am, Tc, Se, Ni and Zr with selected organic ligands. Boston: Elsevier Science, 2005. 1133 p.
13. Douard A., Maury F., Jorcin J.B. Reactivity of Cr(CO)₆ in atmospheric pressure CVD processes for the growth of various metallurgical coatings. *Reviews on advanced materials science*. 2007;15(1):24-32.
14. Erokhin M.N., Kazantsev S.P., Chupyatov N.N. et al. Device for producing a wear-resistant coating of chromium carbide on the restored inner surface of the fuel injector nozzle body: Patent for utility model RU216021 U1, MPK C23C16/32, C23C16/54. № 2022120149, 2023. (In Rus.)

Автор несет ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 07.03.2023; поступила после рецензирования и доработки 06.04.2023; принята к публикации 06.04.2023

The author bears responsibility for plagiarism.

Received 07.03.2023; revised 06.04.2023; accepted 06.04.2023