moscow polytech

ISSN 0321–4443
eISSN 2782–425X

TRACTORS
AND AGRICULTURAL MACHINERY

SCIENTIFIC AND PRACTICAL JOURNAL

90 (6) 2023

WWW.MOSPOLYTECH.RU

LEADING JOURNAL OF THE INDUSTRY OF
TRACTOR AND AGRICULTURAL ENGINEERING

Scopus

ECO • VECTOR

УЧРЕДИТЕЛИ

- Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет»
- ООО «Эко-Вектор»

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций 05.10.2021 ПИ № 77-81900

Журнал входит в перечень ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней, а также в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

ИЗДАТЕЛЬ

ООО «Эко-Вектор»
Адрес: 191186, Санкт-Петербург, Аптекарский пер., д. 3, литера А, помещение 1Н
E-mail: info@eco-vector.com
WEB: https://eco-vector.com

РЕКЛАМА

E-mail: adv@eco-vector.com
Тел.: +7 (495) 308-83-89

РЕДАКЦИЯ

Заведующий редакцией:
Сергей Евгеньевич Арсеньев
Адрес: 107023, Москва, Большая Семеновская ул., д. 38
E-mail: tismash@mospolytech.ru
Тел: +7 (495) 223-05-23
Выпускающий редактор
Елена Львовна Лебедева

ПОДПИСКА

Подписка на печатную версию через интернет:
www.journals.eco-vector.com
www.akc.ru
www.pressa-rf.ru

ПОЛИТИКА СВОБОДНОГО ДОСТУПА

В электронном виде журнал распространяется бесплатно – в режиме немедленного открытого доступа

ИНДЕКСАЦИЯ

- Scopus
- РИНЦ
- Google Scholar
- Ulrich's International Periodicals Directory

Оригинал-макет

подготовлен в издательстве «Эко-Вектор».
Литературный редактор: *Е.В. Мурашкин*
Корректор: *Е.В. Мурашкин*
Верстка: *Д.А. Полунин*

Сдано в набор 01.12.2023. Подписано в печать 19.12.2023. Формат 60×84⅛. Печать офсетная. Печ. л. 11,3. Усл. печ. л. 10,5. Уч.-изд. л. 6,1. Тираж 500 экз. Дата выхода в свет 25.12.2023. Цена свободная. Заказ № 4-1427-lv.

Отпечатано в типографии ООО «Типография Экспресс B2B» 191180, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, д. 104, лит. А, пом. 3Н, оф. 1. Тел.: +7 (812) 646-33-77

Редакция не несет ответственности за содержание рекламных материалов. Точка зрения авторов может не совпадать с мнением редакции. К публикации принимаются только статьи, подготовленные в соответствии с правилами для авторов. Направляя статью в редакцию, авторы принимают условия договора публичной оферты. С правилами для авторов и договором публичной оферты можно ознакомиться на сайте: https://journals.eco-vector.com/0321-4443/. Полное или частичное воспроизведение материалов, опубликованных в журнале, допускается только с письменного разрешения издателя — издательства «Эко-Вектор».

московский политех

ЭКО • ВЕКТОР

© ООО «Эко-Вектор», 2023

16+

ISSN 0321-4443
eISSN 2782-425X

ТРАКТОРЫ И СЕЛЬХОЗМАШИНЫ

Том 90 | Выпуск 6 | 2023
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
Издается с февраля 1930 г.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

КАМИНСКИЙ Валерий Наумович – профессор, доктор технических наук; профессор Московского политехнического университета, член Экспертного совета ветеранов (старейшин) отрасли поршневого двигателестроения России; заслуженный работник промышленности Московской области (Москва, Российская Федерация)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

ЛЕПЁШКИН Александр Владимирович – профессор, кандидат технических наук; профессор Московского политехнического университета, доцент Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (Москва, Российская Федерация)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГОДЖАЕВ Захид Адыгезалович – член-корреспондент РАН, профессор, доктор технических наук; заместитель директора по инновационной и внедренческой деятельности Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (Москва, Российская Федерация)
ДЕВЯНИН Сергей Николаевич – профессор, доктор технических наук; профессор Российского государственного аграрного университета – МСХА (Московская сельскохозяйственная академия) имени К.А. Тимирязева (Москва, Российская Федерация)
ЕРОХИН Михаил Никитьевич – академик РАН, доктор технических наук; профессор Российского государственного аграрного университета – МСХА (Московская сельскохозяйственная академия) имени К.А. Тимирязева (Москва, Российская Федерация)
ЖАЛНИН Эдуард Викторович – профессор, доктор технических наук; заведующий отделом Федерального научного агроинженерного центра ВИМ; заслуженный деятель науки РФ (Москва, Российская Федерация)
ИЗМАЙЛОВ Андрей Юрьевич – академик РАН, доктор технических наук; директор Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (Москва, Российская Федерация)
КОВАЛЁВ Михаил Михайлович – доктор технических наук; научный руководитель Федерального научного центра лубяных культур; заслуженный изобретатель РФ (Тверь, Российская Федерация)
КОТИЕВ Георгий Олегович – профессор, доктор технических наук; заведующий кафедрой Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана; заслуженный деятель науки РФ (Москва, Российская Федерация)
КУТЬКОВ Геннадий Михайлович – профессор, доктор технических наук; профессор Российского государственного аграрного университета – МСХА (Московская сельскохозяйственная академия) имени К.А. Тимирязева; заслуженный деятель науки и техники РФ (Москва, Российская Федерация)
ЛАЧУГА Юрий Фёдорович – академик РАН, доктор технических наук; академик-секретарь Отделения сельскохозяйственных наук РАН, председатель Экспертного совета Отделения сельскохозяйственных наук РАН (Москва, Российская Федерация)
ЛЯШЕНКО Михаил Вольфредович – профессор, доктор технических наук; заведующий кафедрой Волгоградского государственного технического университета (Волгоград, Российская Федерация)
МАРЧЕНКО Андрей Петрович – профессор, доктор технических наук; проректор по научной работе НТУ ХПИ (Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»), заместитель главы Совета проректоров по научной работе ВУЗов Украины, академик Академии высшей школы Украины, член-корреспондент Инженерной академии Украины (Харьков, Украина)
НАДАРЕЙШВИЛИ Гиви Гурамович – доктор технических наук, заместитель генерального директора по научной работе Государственного научного центра РФ «Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт „НАМИ“» (Москва, Российская Федерация)
НАТРИАШВИЛИ Тамаз Мамиевич – академик Национальной академии наук Грузии, профессор, доктор технических наук; директор Института механики машин им. Р. Двали (ИММ); лауреат Национальной премии Грузии в области науки (Тбилиси, Грузия)
ПРЕДИГЕР Виктор – профессор, доктор технических наук; профессор Университета прикладных наук (Оснабрюк, Германия)
СКВОРЦОВ Аркадий Алексеевич – профессор, доктор физико-математических наук; заведующий кафедрой Московского политехнического университета (Москва, Российская Федерация)
СОЛОВЬЁВ Рудольф Юрьевич – доцент, кандидат технических наук; директор Центра сельскохозяйственного машиностроения Государственного научного центра РФ «Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт „НАМИ“» (Москва, Российская Федерация)
СТАСИЛЕВИЧ Андрей Георгиевич – генеральный конструктор ОАО «МТЗ» (Минский тракторный завод) (Минск, Беларусь)
ФОМИН Валерий Михайлович – профессор, доктор технических наук; профессор Московского политехнического университета, член Экспертного совета ветеранов (старейшин) отрасли поршневого двигателестроения России (Москва, Российская Федерация)
ФУКС Кристиан – доктор технических наук; менеджер проекта по системам больших двигателей международной инжиниринговой компании AVL List (Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List – «Институт двигателей внутреннего сгорания „Лист“») (Грац, Австрия)
ШУМАН Олаф – генеральный директор ООО «ФЭВ Рус» международной инжиниринговой компании FEV (Forschungsgesellschaft für Energietechnik und Verbrennungsmotoren – «Исследовательская компания по силовым агрегатам и двигателям внутреннего сгорания») (Аахен, Германия)

FOUNDERS
- Moscow Polytechnic University
- Eco-Vector

The journal is registered by the Russian Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media. Registration certificate PI No ФС 77-81900 issued on October 05, 2021

The journal is included in the list of leading peer-reviewed scientific journals of Higher Attestation Commission of Russian Federation (VAK), where it is recommended to publish the basic scientific results of the dissertation for the degree of doctor and candidate of sciences

PUBLISHER
Eco-Vector
Address: 3 liter A, 1H, Aptekarsky pereulok, 191186 Saint Petersburg, Russian Federation
E-mail: info@eco-vector.com
WEB: https://eco-vector.com

ADVERTISE
E-mail: adv@eco-vector.com
Phone: +7 (495) 308-83-89

EDITORIAL
Executive editor
Sergey Y. Arseniev
Address: 38 Bolshaya Semyonovskaya street, 107023 Moscow, Russian Federation
E-mail: tismash@mospolytech.ru
Тел: +7 (495) 223-05-23
Managing Editor
Elena L. Lebedeva

SUBSCRIPTION
For print version:
www.journals.eco-vector.com
www.akc.ru
www.pressa-rf.ru

OPEN ACCESS
Immediate Open Access is mandatory for all published articles

INDEXATION
- Scopus
- Russian Science Citation Index
- Google Scholar
- Ulrich's International Periodicals Directory

TYPESET
compleate in Eco-Vector
Copyeditor: *Evgenii V. Murashkin*
Proofreader: *Evgenii V. Murashkin*
Layout editor: *Dmitrii A. Polunin*

The editors are not responsible for the content of advertising materials. The point of view of the authors may not coincide with the opinion of the editors. Only articles prepared in accordance with the guidelines are accepted for publication. By sending the article to the editor, the authors accept the terms of the public offer agreement. The guidelines for authors and the public offer agreement can be found on the website: https://journals.eco-vector.com/0321-4443/. Full or partial reproduction of materials published in the journal is allowed only with the written permission of the publisher – the Eco-Vector publishing house.

ISSN 0321-4443
eISSN 2782-425X

TRACTORS AND AGRICULTURAL MACHINERY

VOLUME 90 | ISSUE 6 | 2023
SCIENTIFIC AND PRACTICAL JOURNAL

Published since February 1930

EDITOR-IN-CHIEF
Valery N. KAMINSKY – Professor, Dr. Sci. (Engineering); Professor of Moscow Polytechnic University, Member of the Veterans (Elders) Expert Council of the Russian Federationn Piston Engine Industry; Honorary Worker of Industry of the Moscow Region (Moscow, Russian Federation)

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF
Alexander V. LEPESHKIN – Professor, Cand. Sci. (Engineering); Professor of Moscow Polytechnic University, Associate Professor of Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russian Federation)

EDITORIAL BOARD MEMBERS
Zakhid A. GODZHAEV – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, Dr. Sci. (Engineering); Deputy Director for Innovation and Implementation Activities of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russian Federation)
Sergey N. DEVYANIN – Professor, Dr. Sci. (Engineering); Professor of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russian Federation)
Mikhail N. YEROKHIN – Full Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Engineering); Professor of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russian Federation)
Eduard V. ZHALNIN – Professor, Dr. Sci. (Engineering); Head of the Department of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Honorary Scientist of the Russian Federation (Moscow, Russian Federation)
Andrey Yu. IZMAYLOV – Full Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Engineering); Director of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russian Federation)
Mikhail M. KOVALEV – Dr. Sci. (Engineering); Research Advisor of the Federal Scientific Center for Bast Crops; Honorary Inventor of the Russian Federation (Tver, Russian Federation)
George O. KOTIEV – Professor, Dr. Sci. (Engineering); Head of the Department of Bauman Moscow State Technical University; Honorary Scientist of the Russian Federation (Moscow, Russian Federation)
Gennadiy M. KUTKOV – Professor, Dr. Sci. (Engineering); Professor of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Honorary Scientist of the Russian Federation (Moscow, Russian Federation)
Yury F. LACHUGA – Full Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Engineering); Academician-Secretary of the Department of Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences, Chairman of the Expert Council of the Department of Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)
Mikhail V. LYASHENKO – Professor, Dr. Sci. (Engineering); Head of the Department of Volgograd State Technical University (Volgograd, Russian Federation)
Andriy P. MARCHENKO – Professor, Dr. Sci. (Engineering); Vice-Rector for Scientific-and-Research Work of National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute; Deputy Head of the Council of Vice-Rectors for Scientific and Research Work of Universities of Ukraine, Full Member of the Academy of Higher School of Ukraine, Corresponding Member of the Engineering Academy of Ukraine (Kharkiv, Ukraine)
Givi G. NADAREISHVILI – Dr. Sci. (Engineering), Deputy CEO for Science (Research) of the State Research Center of the Russian Federation NAMI (Moscow, Russian Federation)
Tamaz M. NATRIASHVILI – Full Member of the Georgian National Academy of Sciences, Professor, DSc in Engineering; Director of Rafiel Dvali Institute of Machine Mechanics (IMM); Laureate of the Georgian National Prize in Science (Tbilisi, Georgia)
Viktor PREDIGER – Professor, Dr. Sci. (Engineering) (Dr.-Ing.); Professor of Osnabrück University of Applied Sciences (Osnabrück, Germany)
Arkadiy A. SKVORTSOV – Professor, Dr. Sci. (Phys&Math.); Head of the Department of Moscow Polytechnic University (Moscow, Russian Federation)
Rudolf Yu. SOLOVYEV – Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering); Director of the Center for Agricultural Engineering at the State Research Center of the Russian Federation NAMI (Moscow, Russian Federation)
Andrey G. STASILEVICH – General Designer of Minsk Tractor Works (Minsk, Belarus)
Valeriy M. FOMIN – Professor, Dr. Sci. (Engineering); Professor of Moscow Polytechnic University; Member of the Veterans (Elders) Expert Council of the Russian Piston Engine Industry (Moscow, Russian Federation)
Christian FUCHS – Dr. Sci. (Engineering); Project Manager for Large Engine Systems, International Engineering Company AVL List (Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List) (Graz, Austria)
Olaf SCHUMANN – CEO of LLC FEV Rus, International Engineering Company FEV (Forschungsgesellschaft für Energietechnik und Verbrennungsmotoren) (Aachen, Germany)

© Eco-Vector, 2023

16+

СОДЕРЖАНИЕ

НОВЫЕ МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

С.Д. Шепелёв, М.В. Ческидов, Г.Н. Чирков
Разработка воздушно-шнекового устройства для сушки, очистки и охлаждения зерна 499

ТЕОРИЯ, КОНСТРУИРОВАНИЕ, ИСПЫТАНИЯ

А.В. Келлер, А.В. Попов
Методика синтеза закономерностей распределения мощности между ведущими колесами полноприводных грузовых автомобилей сельскохозяйственного назначения 505

Р.И. Кравченко
Результаты производственной проверки макетного образца орудия с активным приводом ротационных рабочих органов 515

В.А. Зубина, Т.З. Годжаев, И.С. Малахов
Результаты производственной проверки макетного образца орудия с активным приводом ротационных рабочих органов 523

В.А. Гартфельдер, А.А. Стадухин, Н.А. Мокрецов
Законы управления индивидуальным тяговым электроприводом фронтального погрузчика 531

КАЧЕСТВО, НАДЁЖНОСТЬ

В.И. Прядкин, П.А. Колядин
Вибронагруженность штанг самоходного опрыскивателя на шинах сверхнизкого давления 543

А.П. Миллер, К.Г. Пугин
Диагностирование гидроцилиндров строительно-дорожных машин с помощью гидравлического подпора 551

ЭКОНОМИКА, ОРГАНИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА

А.В. Шимохин, О.М. Кирасиров
Механизм совершенствования управления процессом технического обслуживания и ремонта с применением нейросетевой технологии 561

В.Н. Нечаев, А.В. Алёшкин, П.А. Савиных
Исследование эффективности нагрева воды в режиме кавитации на начальном этапе приготовления зерновой патоки 575

— в открытом доступе на сайте журнала

CONTENTS

NEW MACHINES AND EQUIPMENT

Sergey D. Shepelev, Maxim V. Cheskidov, Grigory N. Chirkov
Development of the mobile air-auger device for grain drying, cleaning and cooling 499

THEORY, DESIGN, TESTING

Andrey V. Keller, Andrey V. Popov
Method of synthesis of patterns of power distribution between the driving wheels of all-wheel drive agricultural trucks 505

Ruslan I. Kravchenko
The results of the operational test of a mock-up sample of the tool with an active drive of rotary working bodies with an assessment of agrotechnical indicators 515

Valeria A. Zubina, Teymur Z. Godzhaev, Ivan S. Malakhov
Development of optimization mathematical models for making compromise decisions on the efficiency of the fleet of agricultural moving power units 523

Viktor A. Gartfelder, Anton A. Stadukhin, Nikolay A. Mokretsov
Control laws for individual traction electric drive of a front loader 531

QUALITY, RELIABILITY

Vladimir I. Pryadkin, Pavel A. Kolyadin
Vibration loading of booms of a self-propelled sprayer with ultra-low pressure tires 543

Alexander P. Miller, Konstantin G. Pugin
Diagnostics of hydraulic cylinders of road building machines using hydraulic support 551

ECONOMICS, ORGANIZATION AND TECHNOLOGY OF MANUFACTURING

Anton V. Shimokhin, Oleg M. Kirasirov
The procedure for improving the management of the maintenance and repair process using the neural network technology 561

Vladimir N. Nechaev, Alexey V. Aleshkin, Petr A. Savinykh
Study of water heating efficiency in cavitation mode at the initial stage of grain molasses preparation 575

— Open Access online

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568726

Оригинальное исследование

Разработка воздушно-шнекового устройства для сушки, очистки и охлаждения зерна

С.Д. Шепелёв, М.В. Ческидов, Г.Н. Чирков

Южно-Уральский государственный аграрный университет, Челябинск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Для обеспечения качественной и безопасной сушки зерна необходимы правильный выбор сушилки и рациональное обоснование параметров процесса сушки. Разработка современных конструкций машин для сушки и очистки зерна является актуальной задачей.

Цель работы — анализ процесса сушки и очистки зерна и обоснование конструкции устройства для сушки, охлаждения и одновременной очистки зерна.

Материалы и методы. Для исследования процесса сушки и очистки зерна проведены анализ литературных источников и патентный поиск. Для обоснования конструкции устройства для сушки, охлаждения и одновременной очистки зерна были изучены перспективные машины для послеуборочной обработки зерна.

Результаты. Рассмотрены различные методы сушки зерна и проведен анализ с целью определения их эффективности и применимости. Существует риск возникновения проблем, связанных с неправильной сушкой зерна и негативных последствиях для сохранности зерна и его дальнейшей переработки. Для своевременной и качественной очистки и сушки зерна предлагается инновационная конструкция — мобильная воздушно-шнековая сушилка для зерна. Данное устройство проводит очистку зерна от легких сорных примесей с помощью воздушного потока и съем поверхностной влаги из зерна благодаря продуванию его нагретым воздушным потоком. В статье подробно описана конструкция и принцип действия сушилки. Приводятся результаты предварительных экспериментов, подтверждающих работоспособность сушилки.

Заключение. Применение мобильных установок для сушки зерна является актуальным направлением в сельском хозяйстве. Использование сушилки с предлагаемой конструкцией позволит эффективно проводить послеуборочную обработку зерна. Установлено, что за один проход съем влаги составил 4...5 %. Полученные результаты позволяют рекомендовать сушилку для использования в крестьянско-фермерских хозяйствах.

Ключевые слова: сушка зерна; очистка зерна; сепаратор; воздушный поток.

Как цитировать:
Шепелёв С.Д., Ческидов М.В., Чирков Г.Н. Разработка воздушно-шнекового устройства для сушки, очистки и охлаждения зерна // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90 № 6. С. 499–505. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568726

Рукопись получена: 23.08.2023 **Рукопись одобрена:** 01.12.2023 **Опубликована онлайн:** 15.12.2023

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2023

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568726

Original Study Article

Development of the mobile air-auger device for grain drying, cleaning and cooling

Sergey D. Shepelev, Maxim V. Cheskidov, Grigory N. Chirkov

South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Correct selection of a grain dryer and reasonable justification of the drying process parameters are necessary to ensure qualitative and safe drying of grain. Development of state-of-the-art designs of machines for drying and cleaning of grain is a relevant task.

AIM: Analysis of the process of drying and cleaning of grain and justification of the design of a device for drying, cooling and simultaneous cleaning of grain.

METHODS: In order to study the process of drying and cleaning of grain, the literature sources were analyzed, patent search was carried out. To justify the design of the device for drying, cooling and simultaneous cleaning of grain, promising machines for post-harvest grain processing were studied.

RESULTS: Various methods of grain drying are considered and analyzed to determine their effectiveness and applicability. There is a risk of problems associated with improper drying of grain and negative consequences for the safety of grain and its further processing. The innovative design of the mobile air-auger dryer for grain is offered for timely and qualitative cleaning and drying of grain. This device cleans grain from light weeds by means of air flow and removes surface moisture from grain by blowing it with heated air flow. The design and principle of operation of the dryer are described in detail in the paper. The results of preliminary experiments confirming the operability of the dryer are given.

CONCLUSIONS: The use of mobile units for grain drying is a relevant trend in agriculture. The use of a dryer with the proposed design helps to carry out post-harvest processing of grain effectively. It is found that the one-pass moisture removal is 4...5 %. The obtained results make it possible to recommend the dryer for use in peasant-farming farms.

Keywords: grain drying; grain cleaning; grain separator; air flow.

To cite this article:
Shepelev SD, Cheskidov MV, Chirkov GN. Development of the mobile air-auger device for grain drying, cleaning and cooling. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2023;90(6):499–505. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568726

Received: 23.08.2023 **Accepted:** 01.12.2023 **Published online:** 15.12.2023

moscow polytech

The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International license
© Eco-Vector, 2023

ECO•VECTOR

ВВЕДЕНИЕ

В сельском хозяйстве сушка зерна — необходимый процесс для сохранения качества и предотвращения порчи зерна. Важность этого процесса заключается в том, что зерно, собранное с поля, имеет высокую влажность 20–30% [1], которая может привести к развитию грибков, бактерий и других микроорганизмов, являющихся причиной порчи урожая. Кроме того, хранение зерна с влажностью выше рекомендованных 14% приводит к уменьшению питательных свойств зерна.

Для обеспечения качественной и безопасной сушки зерна необходим правильный выбор сушилки и рациональное обоснование параметров процесса сушки. Сушилки для зерна — это специальные устройства, которые используются для ускорения процесса сушки зерна, путём удаления излишней влаги.

В литературных источниках рекомендуемая влажность зерна, закладываемого на хранение, составляет 13–15% (таблица 1).

В настоящее время стоит задача интенсифицировать процесс сушки зерна за счёт разработки новой конструкции сушилки и одновременной очистки зерна от сорных примесей.

АНАЛИЗ СПОСОБОВ СУШКИ И ТИПОВ КОНСТРУКЦИЙ СУШИЛОК

Существует несколько типов сушилок для зерна, которые могут различаться по принципу работы, мощности и размеру. В сельскохозяйственном производстве наиболее распространены барабанные и шахтные зерносушилки. Одним из типов сушилок являются мобильные сушилки. Сушилки данного типа обычно используются на месте сбора урожая, и могут быть легко перемещены с поля на поле в зависимости от необходимости. Они могут иметь различную мощность и размер, и обычно оснащены нагревателями, вентиляторами и другими компонентами для быстрой и эффективной сушки зерна. Мобильные зерносушилки используются в фермерских хозяйствах и других организациях АПК с мелкотоварным (до 1000 т зерна) и среднетоварным (до 3000 т зерна) производством [1, 3]. Это обусловлено сравнительно низкой ценой сушилки и меньшей производительностью по сравнению со стационарными аналогами.

После сбора урожая важно в короткие сроки провести не только сушку, но и очистку зерна от примесей [4]. Для очистки зерна от примесей применяют воздушно-шнековые сепараторы. Это специальное оборудование, которое используется для очистки зерна от различных примесей, таких как пыль, мелкие камни, солома, семена сорных растений и другие нежелательные элементы, которые могут находиться в массе зерна после уборки урожая. Данные сепараторы могут также использоваться для разделения зерна на разные категории по размеру, весу и плотности [5]. Принцип их работы основан на использовании воздушных потоков, которые перемещают и разделяют зерновой ворох. Зерно подается на шнек, который переносит его внутри корпуса, в то время как воздушный поток двигается навстречу зерновому потоку. Воздушный поток, воздействует с различной силой на зерно в зависимости от размера и веса частиц зернового вороха. Благодаря этому, зерно, отличающееся по аэродинамическим свойствам, отделяется от сорных примесей [6, 7].

Воздушно-шнековые сепараторы для зерна имеют различные размеры и мощность, что позволяет использовать их для разных типов зерна и объёмов уборки урожая. Они могут быть полуавтоматическими или полностью автоматическими, что облегчает процесс очистки и сортировки зерна и уменьшает затраты на трудовые ресурсы. Они также могут быть мобильными, что позволяет использовать их на месте сбора урожая. К главным преимуществам зерносушилок малой производительности можно отнести возможность обработки зерна практически любой исходной влажности, а также высокую равномерность сушки [8, 9].

Однако, в настоящее время должным образом не рассмотрен вопрос возможности проведения одновременного процесса очистки и сушки в воздушно-шнековом сепараторе.

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Устройство для сушки, охлаждения и одновременной очистки зерна можно использовать для параллельной сушки и очистки зерна. Технический результат работы предлагаемой конструкции сушилки достигается за счёт того,

Таблица 1. Сроки безопасного хранения зерна пшеницы при различных значениях влажности и температуры [2]
Table 1. Safe storage periods of wheat grain at various values of humidity and temperature [2]

Влажность зерна, %	Температура зерна, °С	Срок хранения, мес.
13,0–15, 5	10	12
до 14,5	20	12
14,5–15,5	20	10–11
13,0–13,9	30	3
14,0–14,5	30	2

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568726

что обработка зернового вороха разделена на два этапа. Первый этап включает в себя нагрев зернового вороха горячим воздушным потоком и стенками сепаратора. На первом этапе также удаляется часть лёгких сорных примесей. Второй этап включает в себя охлаждение зернового вороха воздушным потоком с температурой равной температуре окружающей среды. При этом происходит окончательный съем влаги из зерна. Конструктивно-технологические параметры второго этапа позволяют дополнительно проводить очистку зерна от лёгких примесей. Согласованность параметров сушки и очистки позволяют непрерывно проводить процесс обработки зерна, обеспечивая высокое качество и производительность этого процесса.

Для рационального процесса съёма влаги во время очистки зерна необходимо использовать два рабочих органа, соединённых между собой последовательно, рис. 1.

Сушилка включает в себя два рабочих органа для сушки и охлаждения зерна, которые жёстко соединены с помощью промежуточного патрубка. Первый рабочий орган 2 служит для сушки зерна содержит шнек 5, закреплённый в корпусе 2. Шнек вращается за счёт передаточного механизма 9. Приёмно-загрузочное устройство 1 расположено в левой верхней части корпуса. Нагнетательный патрубок для воздушного потока с нагревательным элементом 3, вентилятором 4 и дроссельной заслонкой установлен в правой части корпуса. Патрубки 8 и 10 для выхода воздуха, расположены в левой нижней части корпуса. Нагревательный элемент 3 обеспечивает нагрев проходящего через нагнетательный патрубок воздуха до необходимой температуры.

Рабочий орган для охлаждения зерна 7 содержит шнек 5, закреплённый в корпусе 7, который вращается за счёт передаточного механизма 9.

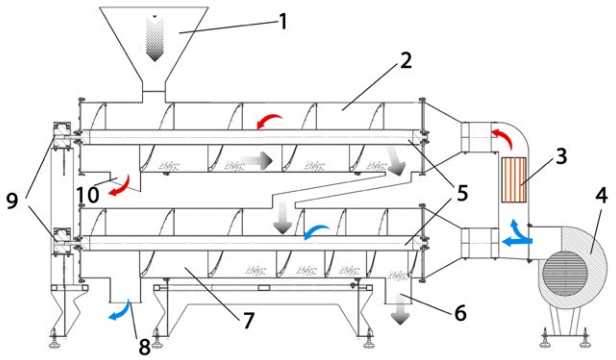

Рис. 1. Схема работы конструкции сушилки: *1* — загрузочный бункер, *2* — первая секция, *3* — нагревательный элемент, *4* — вентилятор, *5* — шнеки, *6* — окно выхода очищенного зерна, *7* — вторая секция, *8* — окно для вывода сорных примесей, *9* — электрические приводы вращающие шнеки, 10 — окно вывода горячего воздуха.

Fig. 1. Schematic diagram of operation of the dryer's design: *1* — a loading hopper, *2* — the first section, *3* — a heating element, *4* — a fan, *5* — augers, *6* — a window of output of cleaned grain, *7* — the second section, *8* — a window for output of weed impurities, *9* — electric drives for rotation of the augers, 10 — a window of hot air output.

Сушилка работает следующим образом. Влажное зерно из приёмно-загрузочного устройства 1 поступает в корпус 2 рабочего органа, предназначенного для сушки. Далее оно шнеком 5 перемещается в сторону промежуточного патрубка. Воздушный поток, создаваемый вентилятором 4 со скоростью, регулируемой дроссельной заслонкой, проходя через нагнетательный патрубок, нагревается нагревательным (тепловым) элементом 3 до необходимой по технологическим требованиям температуры и поступает в сепарирующий канал, образованный корпусом 2 и шнеком 5, где он, нагревая зерно, производит съем влаги, которая выводится через патрубок 10. Нагретое зерно выводится шнеком 5 через промежуточный патрубок во второй рабочий орган. Эффект очистки зерна усиливается благодаря закручиванию воздушного потока в сепарирующем канале и постоянном перемешивании зерна. Далее зерно поступает в корпус 7 рабочего органа, предназначенного для охлаждения. Далее оно шнеком 5 перемещается в сторону выходного патрубка 6. Воздушный поток, создаваемый вентилятором 4 со скоростью, регулируемой дроссельной заставкой, поступает в сепарирующий канал, образованный корпусом 7 и шнеком 5, где он подхватывает лёгкие частицы и уносит их через выходной патрубок 8. Охлаждённое и очищенное зерно выводится шнеком 5 через выходной патрубок 6. Эффект сушки зерна усиливается благодаря зоне охлаждения зерна и корректировке скорости перемещения зерна в рабочих органах устройства в зависимости от его влажности [10]. Обдув нагретого зерна холодным воздушным потоком приводит к съёму влаги, позволяя значительно снизить влажность зернового вороха.

Основными технологическими параметрами первой секции, влияющими на процесс сушки зерна, являются: частота вращения шнека, скорость воздушного потока, температура воздушного потока. Увеличение скорости и температуры воздушного потока и снижение угловой скорости шнека позволят интенсифицировать процесс сушки. При этом скорость воздушного потока лимитирована пределом, при котором цельное зерно начнёт захватываться воздушным потоком и выноситься через окно для выхода горячего воздуха. Экспериментальные исследования показали, что такая скорость воздушного потока находится в пределах 10…12 м/с. Температуру воздушного потока необходимо подбирать исходя из влажности зерна, типа зерна (товарное, семенной материал), частоты вращения шнека, чтобы не допустить перегрев зерна и его порчу. На основании полученных данных была спроектирована инновационная конструкция сушилки, рис. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение мобильных установок для сушки зерна является актуальным направлением в сельском хозяйстве. Использование сушилки с предлагаемой конструкцией позволит эффективно проводить послеуборочную обработку

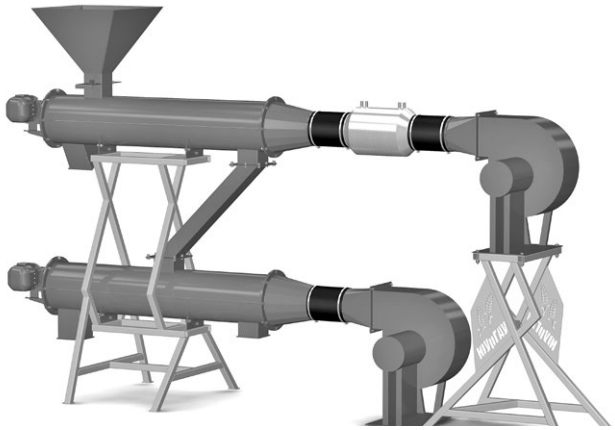

Рис. 2. Модель сушилки.
Fig. 2. A model of the dryer.

зерна. Установлено, что за один проход съем влаги составил 4...5 %. Полученные результаты позволяют рекомендовать сушилку для использования в крестьянско-фермерских хозяйствах.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов Г.Н. Чирков — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, создание 3Д модели; М.В. Ческидов — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, подготовка и написание текста статьи, подготовка рисунков; С.Д. Шепелёв — сбор и анализ литературных источников, подготовка и написание текста статьи. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE*. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведённым исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям), договор (соглашение) № 18107ГУ/2022.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. G.N. Chirkov — literature review, collection and analysis of literary sources, building the 3D-model; M.V. Cheskidov — literature review, collection and analysis of literary sources, preparation and writing of the text of the article, preparation of figures; S.D. Shepelev — collection and analysis of literary sources, preparation and writing of the text of the article; All authors contributed significantly to the conceptualization, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. Federal State Budgetary Institution "Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in Science and Technology" (Innovations Assistance Foundation), contract (agreement) № 18107GU/2022.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жанахов, А. С. Преимущества мобильных зерносушилок. В кн.: Методы механики в решении инженерных задач: Сборник статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции, Курган, 11 октября 2018 года. Курган: Курганская ГСХА, 2018. С. 25–28. EDN ZBDFAT

2. Кечкин И.А. Особенности хранения зерна злаковых культур в металлических силосах и его охлаждения активным вентилированием. В кн.: XI Международная научно-практическая конференция молодых учёных ФГБНУ «ВНИИМП им. В.М. Горбатова». М.: ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова, 2016. С. 131–134. EDN: XXWOIJ

3. Панов М.В., Ступаков И.О. Применение мобильных малогабаритных зерносушилок для зерна пшеницы // Молодежь и наука. 2018. № 1. С. 42. EDN UVZBLY

4. Okunev G., Shepelev S., Kuznetsov N., et al. An Integrated Approach to the Implementation of Resource-Saving Technologies in Dryland Farming. In: XV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2022". INTERAGROMASH 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. Cham: Springer, 2023. Vol. 574. P. 587–593. EDN XITVRD, doi: 10.1007/978-3-031-21432-5_61

5. Патент РФ № 2552037 / 10.06.2015. Бюл. № 16. Шепелев С.Д., Федоров В.А., Окунев Г.А. и др. Воздушно-шнековое устройство. Дата обращения: 23.08.2023. Режим доступа: https://patents.s3.yandex.net/RU2552037C1_20150610.pdf EDN ZFHXID

6. Shepelev S.D., Cheskidov M.V., Troyanovskaya I.P. Justification of Design and Technological Parameters for Air-Screw Separator. In: Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer, 2021. P. 151–157. EDN RKNUZK, doi: 10.1007/978-3-030-54814-8_18

7. Ческидов М.В., Чирков Г.Н., Ваганов Д.Е. Повышение эффективности воздушно-шнекового сепаратора за счет дифференциации скорости воздушного потока. В кн.: Современные тенденции агроинженерных наук и инновационные технологии в сельском хозяйстве: Материалы Международной научно-практической конференции Института агроинженерии, Челябинск, 17–19 ноября 2021 года. Челябинск: Южно-Уральский ГАУ, 2021. С. 147–152. EDN FFZTGG

8. Зимин И.Б. Инновационные направления в развитии зерносушильной техники для фермерских хозяйств. В кн.: Научное обеспечение инновационного развития АПК: материалы международной научно-практической конференции, Великие Луки, 18 мая 2020 года. Великие Луки: Великолукская ГСХА, 2020. С. 160–175. EDN HHQLTR

9. Данилов Д.Ю., Казаков С.С., Криштанов Е.А. и др. Разработка мобильной зерносушилки и обоснование ее конструктивно-режимных параметров // Аграрная наука. 2022. № 11. С. 122–127. EDN TSAVHX, doi: 10.32634/0869-8155-2022-364-11-122-127
10. Патент РФ 218422 / 25.05.2023 Бюл. № 15. Шепелев С.Д., Ческидов М.В., Чирков Г.Н. Воздушно-шнековое устройство для сушки, очистки и охлаждения зерна. Дата обращения: 23.08.2023. Режим доступа: https://new.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=bca64a9cf3d2d0ab8d772e4c43f89ad5 EDN: PEHVUZ

REFERENCES

1. Zhanakhov A.S. Advantages of mobile grain dryers. In: *Methods of mechanics in solving engineering problems: Collection of articles based on the materials of the II All-Russian Scientific and Practical Conference, Kurgan, October 11, 2018.* Kurgan: Kurganskaya GSKhA; 2018;25–28. (In Russ). EDN: ZBDFAT
2. Kechkin IA. Features of storing cereal grains in metal silos and cooling them by active ventilation. In: *XI International Scientific and Practical Conference of Young Scientists of the FGBNU "VNIIMP named after. V.M. Gorbatov."* Moscow: FNTs pishchevykh sistem im VM Gorbatova; 2016:131–134. (In Russ). EDN: XXWOIJ
3. Panov MV, Stupakov IO. Application of mobile small-sized grain dryers for wheat grain. *Molodezh i nauka.* 2018;1:42. (In Russ). EDN: VZBLY
4. Okunev G, Shepelev S, Kuznetsov N, et al. An Integrated Approach to the Implementation of Resource-Saving Technologies in Dryland Farming. In: *XV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2022". INTERAGROMASH 2022. Lecture Notes in Networks and Systems.* Cham: Springer; 2023;574:587–593. (In Russ). EDN: XITVRD, doi: 10.1007/978-3-031-21432-5_61
5. Patent RUS № 2552037 / 10.06.2015. Byul. № 16. Shepelev SD, Fedorov VA, Okunev GA, et al. Vozdushno-shnekovoe ustroystvo. Cited: 23.08.2023. Available from: https://patents.s3.yandex.net/RU2552037C1_20150610.pdf EDN: ZFHXID (In Russ).
6. Shepelev SD, Cheskidov MV, Troyanovskaya IP. Justification of Design and Technological Parameters for Air-Screw Separator. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Cham: Springer; 2021:151–157. (In Russ). EDN: RKNUZK, doi: 10.1007/978-3-030-54814-8_18
7. Cheskidov MV, Chirkov GN, Vaganov DE. Increasing the efficiency of an air-screw separator by differentiating the air flow speed. In: *Modern trends in agricultural engineering sciences and innovative technologies in agriculture: Materials of the International Scientific and Practical Conference of the Institute of Agricultural Engineering, Chelyabinsk, November 17–19, 2021*. Chelyabinsk: Yuzhno-Uralskiy GAU; 2021:147–152. (In Russ). EDN: FFZTGG
8. Zimin IB. Innovative directions in the development of grain drying equipment for farms. In: *Scientific support for innovative development of the agro-industrial complex: materials of the international scientific and practical conference, Velikiye Luki, May 18, 2020.* Velikiye Luki: Velikolukskaya GSKhA; 2020;160–175. (In Russ). EDN: HHQLTR
9. Danilov DYu, Kazakov SS, Krishtanov EA, et al. Development of a mobile grain dryer and justification of its design and operating parameters. *Agrarnaya nauka.* 2022;11:122–127. (In Russ). EDN: TSAVHX, doi: 10.32634/0869-8155-2022-364-11-122-127
10. Patent RUS 218422 / 25.05.2023 Byul. № 15. Shepelev SD, Cheskidov MV, Chirkov GN. *Vozdushno-shnekovoe ustroystvo dlya sushki, ochistki i okhlazhdeniya zerna.* Cited: 23.08.2023. Available from: https://new.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=bca64a9cf3d2d0ab8d772e4c43f89ad5 (In Russ). EDN: PEHVUZ

ОБАВТОРАХ

*** Ческидов Максим Владимирович,**
канд. техн. наук,
старший преподаватель кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка, и технологии и механизации животноводства;
адрес: Российская Федерация, 454080, Челябинск, проспект Ленина, д. 75;
ORCID: 0000-0002-5281-6226;
eLibrary SPIN: 7906-6068;
e-mail: richi7474@yandex.ru

Шепелёв Сергей Дмитриевич,
профессор, д-р техн. наук,
проректор по научной и инновационной работе;
ORCID: 0000-0003-2578-2005;
eLibrary SPIN: 4848-4782;
e-mail: nich@sursau.ru

Чирков Григорий Николаевич,
аспирант института агроинженерии;
ORCID: 0009-0002-7778-6737;
eLibrary SPIN: 6906-9467;
e-mail: chirkov174@mail.ru

AUTHORS' INFO

*** Maxim V. Cheskidov,**
Cand. Sci. (Engineering),
Senior Lecturer of the Operation of Machine and Tractor Fleet, and Technology and Mechanization of Livestock Husbandry Department;
address: 75 Lenin Avenue, 454080 Chelyabinsk, Russian Federation;
ORCID: 0000-0002-5281-6226;
eLibrary SPIN: 7906-6068;
e-mail: richi7474@yandex.ru

Sergey D. Shepelev,
Professor, Dr. Sci. (Engineering);
Vice-Rector for Research and Innovation;
ORCID: 0000-0003-2578-2005;
eLibrary SPIN: 4848-4782;
e-mail: nich@sursau.ru

Grigory N. Chirkov,
Postgraduate of the Institute of Agricultural Engineering;
ORCID: 0009-0002-7778-6737;
eLibrary SPIN: 6906-9467;
e-mail: chirkov174@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568209

Оригинальное исследование

Методика синтеза закономерностей распределения мощности между ведущими колёсами полноприводных автомобилей сельскохозяйственного назначения

А.В. Келлер[1, 2], А.В. Попов[3]

[1] Центр социологических исследований, Москва, Российская Федерация;
[2] Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация;
[3] Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт (НАМИ), Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Для развития сельского хозяйства, играющего важную роль в экономике страны, необходимы полноприводные грузовые автомобили, способные взаимодействовать с различными машинами и агрегатами, выполняя операции на бездорожье и дорогах общего пользования. Опыт их эксплуатации на агропредприятиях показывает, что серийные системы распределения мощности в трансмиссиях не учитывают весь спектр факторов, влияющих на движение автомобилей, что снижает эффективность их использования.

Цель работы — разработка методики синтеза закономерностей распределения мощности между ведущими колёсами полноприводных грузовых автомобилей сельскохозяйственного назначения.

Методы. На основе методов системного анализа, многокритериальной оптимизации, регрессионного и корреляционного анализа предложена поэтапная методика синтеза базовых закономерностей распределения мощности между ведущими колёсами полноприводного автомобиля и их адаптации к реальным условиям движения. В основу исследования положены базовые закономерности распределения мощности, адаптированные к условиям функционирования полноприводного грузового автомобиля.

Результаты. Методика синтеза закономерностей распределения мощности рассмотрена постадийно, на основе многокритериальной оптимизации. Установлены конструктивные и эксплуатационные факторы, задающие параметры движения по дорогам всех типов и местности. Выявлены базовые закономерности распределения мощности, обеспечивающие эффективность, надёжность и безопасность автомобиля. В зависимости от функций полноприводные грузовики условно разделены на 4 группы со своими показателями и критериями эффективности. На основании проведённого исследования сформулированы 4 задачи оптимизации.

Заключение. Авторами разработана методика определения закономерностей распределения мощности между ведущими колёсами полноприводных грузовых автомобилей сельскохозяйственного назначения и их адаптации к условиям движения. Основные стадии методики: постановка задачи оптимизации; вычислительная процедура и определение базовых закономерностей распределения мощности; адаптация базовых закономерностей и оценка эффективности решений. Установлено, что при моделировании движения полноприводных грузовиков по маршруту достаточно воспользоваться дифференциальными уравнениями прямолинейного движения.

Ключевые слова: автомобильный транспорт; грузовые автомобили; полноприводные автомобили; автомобили сельскохозяйственного назначения; ведущие колеса полноприводных грузовых автомобилей; трансмиссии полноприводных грузовых автомобилей; системы распределения мощности полноприводных грузовых автомобилей; управляемое распределение мощности в трансмиссиях.

Как цитировать:
Келлер А.В., Попов А.В. Методика синтеза закономерностей распределения мощности между ведущими колёсами полноприводных автомобилей сельскохозяйственного назначения // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 6. С. 505–514. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568209

Рукопись получена: 10.08.2023 **Рукопись одобрена:** 15.10.2023 **Опубликована онлайн:** 15.12.2023

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2023

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568209

Original Study Article

Method of synthesis of patterns of power distribution between the driving wheels of all-wheel drive agricultural vehicles

Andrey V. Keller[1, 2], Andrey V. Popov[3]

[1] Sociological Research Center, Moscow, Russian Federation;
[2] Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation;
[3] Central Scientific Automotive and Automotive Engines Institute "NAMI", Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: All-wheel drive trucks, capable of interacting with various machines and units, performing operations in off-road conditions and on public roads, are needed for the development of agriculture, which plays an important role in the country's economy. The experience of their operation at agricultural enterprises shows that current power distribution systems in drivetrains does not consider the full range of factors affecting the motion of vehicles, which decreases the efficiency of their use.

AIM: Development of the method of synthesis of patterns of power distribution between the driving wheels of all-wheel drive agricultural trucks.

METHODS: Based on methods of system analysis, multiobjective optimization, regression and correlation analyses, the step-by-step method of synthesis of basic patterns of power distribution between the driving wheels of an all-wheel drive car and their adaptation to real driving conditions is proposed. Fundamentals of the study are basic patterns of power distribution, adopted to operation conditions of a all-wheel drive truck.

RESULTS: The method of synthesis of power distribution patterns is considered step-by-step, based on multiobjective optimization. The design and operational factors that set the parameters of traffic on roads of all types and terrain have been established. The basic patterns of power distribution that ensure the efficiency, reliability and safety of a vehicle are revealed. Depending on the functions, all-wheel drive trucks are conditionally divided into 4 groups with their own indicators and performance criteria. Based on the conducted study, 4 optimization problems are formulated.

CONCLUSIONS: The authors have developed the method for determining the patterns of power distribution between the driving wheels of all-wheel drive trucks and their adaptation to traffic conditions. The main stages of the method are: formulation of the optimization problem; computational procedure and determination of basic patterns of power distribution; adaptation of the basic patterns and evaluation of effectiveness of solutions. It is found that it is sufficient to use the differential equations of straight-line motion when simulating the motion of all-wheel drive trucks along the route.

Keywords: motor transport; trucks; all-wheel drive vehicles; agricultural vehicles; driving wheels of all-wheel drive vehicles; drivetrain of all-wheel drive vehicles; power distribution systems of all-wheel drive vehicles; controlled power distribution in drivetrain.

To cite this article:
Keller AV, Popov AV. Method of synthesis of patterns of power distribution between the driving wheels of four-wheel drive agricultural vehicles. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2023;90(6):505–514. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568209

Received: 10.08.2023 **Accepted:** 15.10.2023 **Published online:** 15.12.2023

The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International license
© Eco-Vector, 2023

ВВЕДЕНИЕ

Сельское хозяйство играет важную роль в экономике и социальной жизни России. В целом в агропромышленном комплексе нашей страны, по оценке экспертов, производится около 8,0% валового внутреннего продукта, из них в сельском хозяйстве — 3,7%. В отрасли в настоящее время занято порядка 4.01 млн человек (что эквивалентно 5,8% численности всех занятых в экономике), а также сосредоточено 2,1% основных производственных фондов [1, 2].

Для дальнейшего развития отечественного сельского хозяйства необходимы специализированные полноприводные грузовые автомобили, способные работать в поле в одной технологической цепочке с различными машинами и агрегатами, а также выполнять транспортные операции по бездорожью и дорогам общего пользования [3, 4].

Вместе с тем, имеющийся опыт создания и эксплуатации автомобилей сельскохозяйственного назначения на предприятиях аграрного комплекса показывает недостаточную степень реализации их тягово-скоростных свойств, топливной экономичности, опорной проходимости и других важнейших технических характеристик [5–9]. Серийно применяемые в настоящее время системы распределения мощности в трансмиссиях полноприводных грузовых автомобилей успешно решают лишь локальные задачи недопущения буксования ведущих колёс, предотвращая, тем самым, потерю проходимости. Они не учитывают весь спектр дорожных, природно-климатических и эксплуатационных факторов, оказывающих непосредственное и существенное влияние на движение автомобиля. Это ограничивает степень реализации потенциальных свойств полноприводных грузовых автомобилей и снижает эффективность их использования.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Задача распределения мощности между ведущими мостами и колёсами, как составная часть теории автомобилей, всегда находилась в центре внимания специалистов. Наиболее известными в этой области стали работы П.В. Аксенова, Я.С. Агейкина, Б.Н. Белоусова, В.В. Ванцевича, В.А. Горелова, Ю.Г. Горшкова, Т.Д. Дзоценидзе, Д.А. Загарина, А.В. Келлера, М.А. Козловской, Г.О. Котиева, А.Х. Лефарова, Ю.В. Пирковского, В.Ф. Платонова, И.А. Плиева, А.Т. Скойбеды, М.П. Чистова, В.М. Шарипова, Г.Б. Шипилевского, С.Б. Шухмана, Б. Беккера, J.Y. Wong, P. Kučera, F. H. Stelzeneder и многих других авторов.

Анализ проведённых исследований показал, что наиболее рациональной является полностью дифференциальная схема трансмиссии с дифференциалами, имеющими переменную в зависимости от дорожных условий степень блокировки [10–13]. Научное обоснование закономерностей изменения блокирующих свойств дифференциалов в зависимости от дорожных, природно-климатических и эксплуатационных факторов, а также разработка методов их реализации в трансмиссиях полноприводных грузовых автомобилей является важной задачей, имеющей существенное народнохозяйственное значение [14, 15].

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу синтеза закономерностей изменения блокирующих свойств дифференциалов следует, по мнению авторов, положить базовые закономерности распределения мощности, которые в последующем будут адаптированы к непрерывно изменяющимся условиям функционирования полноприводного грузового автомобиля. В этом случае на первом этапе путём решения задачи синтеза закономерностей необходимо получить базовые закономерности распределения мощности, составляющие ядро алгоритма распределения мощности. Затем это ядро будет дополнено интеллектуальными качествами и реализовано в виде управляющей программы контроллера системы управления.

Методика синтеза базовых закономерностей распределения мощности между ведущими колёсами полноприводного грузового автомобиля и их адаптации к реальным условиям движения состоит из следующих этапов:

- постановка задачи оптимизации;
- обоснование и выбор критериев оптимальности базовых закономерностей распределения мощности между ведущими мостами и колёсами автомобиля;
- разработка математической модели внутренних рабочих процессов полноприводного автомобиля и его взаимодействия со средой функционирования;
- моделирование движения полноприводного грузового автомобиля по типовым дорогам и местности;
- генерация (на основе выбранных критериев) оптимальных закономерностей распределения мощности;
- оценка чувствительности полученных закономерностей распределения мощности к комплексу внешних, внутренних и управляющих факторов;
- минимизация количества информационных переменных для адаптации, используемых при корректировке базовой программы распределения мощности на основе корреляционного анализа;
- формирование регрессионных зависимостей параметров распределения мощности между ведущими колёсами и мостами от информационных переменных;
- оценка эффективности предлагаемых закономерностей распределения мощности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Этапы методики синтеза закономерностей распределения мощности можно сгруппировать по видам решаемых задач и представить в виде трех стадий (рис. 1):

1. постановка задачи оптимизации;
2. вычислительная процедура и определения базовых закономерностей распределения мощности;

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568209

3. адаптация базовых закономерностей и оценка эффективности решений.

Конкретное содержание каждого из этапов оптимизации распределения мощности зависит от конструкции и назначения полноприводного грузового автомобиля. При этом следует учитывать, что оптимальное распределение мощности можно обеспечить только при индивидуальном распределении мощности между ведущими колёсами.

Базовые закономерностей распределения мощности между ведущими мостами и колёсами полноприводного автомобиля можно получить на основе многокритериальной оптимизации (рис. 2).

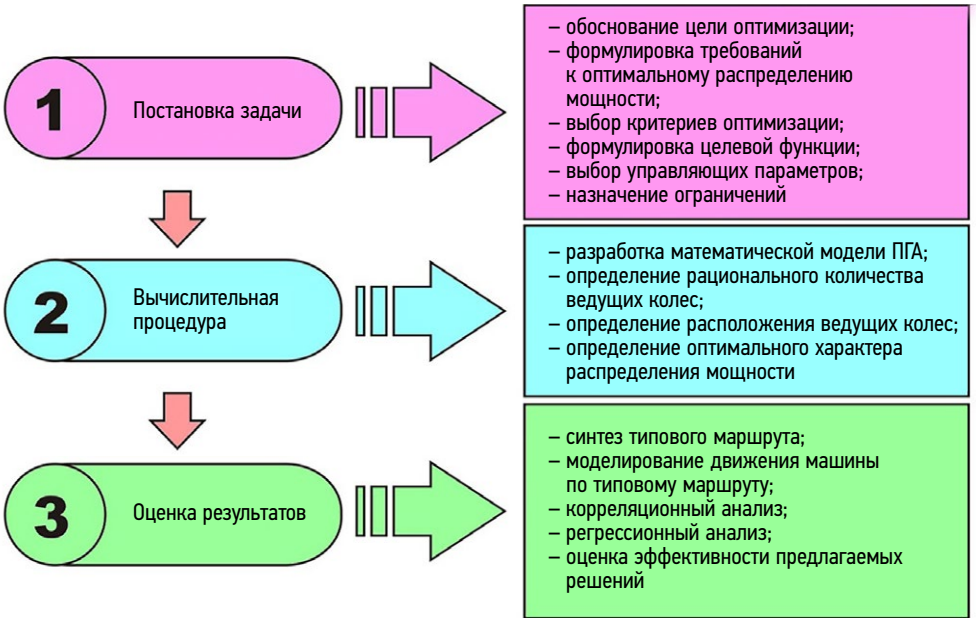

Рис. 1. Методика определения закономерностей распределения мощности между ведущими мостами и колёсами полноприводного грузового автомобиля.
Fig. 1. Methodology for determining the patterns of power distribution between the drive axles and wheels of wheels of an all-wheel drive truck.

Рис. 2. Структурная схема функционирования полноприводного грузового автомобиля.
Fig. 2. Block diagram of the functioning of an all-wheel drive truck.

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568209

Параметры движения полноприводного автомобиля по дорогам всех типов и местности определяются рядом конструктивных и эксплуатационных факторов, которые можно считать заданными:

- массово-габаритные параметры автомобиля, перевозимого груза и/или технологического оборудования;
- силовые и скоростные характеристики энергетической установки и силовой передачи;
- тип и характеристики подвески и колёсного движителя;
- параметры рулевого и тормозного управления.

Полноприводный автомобиль функционирует в условиях случайной внешней среды, характеризующейся:

- коэффициентами сопротивления качению и сцепления;
- глубиной/высотой и частотой впадин и выступов;
- уклоном дороги;
- кривизной траектории.

В этих условиях повлиять на эффективность движения полноприводного грузового автомобиля можно, управляя:

- крутящим моментом двигателя, подводимым к силовой передаче;
- тормозным моментом, прикладываемым к буксующему колесу;
- параметрами блокирующих свойств дифференциальных механизмов распределения мощности.

Базовые закономерности распределения мощности должны обеспечить высокие показатели эффективности полноприводных автомобилей при выполнении конкретных задач по обеспечению перевозки грузов и подвижности технологического оборудования, при буксировании различных прицепных систем. Кроме того, они призваны обеспечить надёжность функционирования всех механизмов и безопасность движения. При этом должны выполняться следующие требования [16, 17]:

- пропорциональность подводимых к ведущим мостам и колёсам крутящих моментов силам сопротивления качению колёс и их сцепным свойствам;
- ограничение крутящего момента, подводимого к каждому колесу, сцепными свойствами опорной поверхности;
- обеспечение возможности свободного вращения колеса с угловой скоростью, соответствующей его траектории движения, без возникновения циркуляции мощности;
- поддержание в процессе криволинейного движения нейтральной поворачиваемости;
- распределение крутящих моментов между ведущими мостами и колёсами без нарушения устойчивости движения;
- поддержание заданной водителем траектории движения;
- распределение тормозных сил между ведущими мостами и колёсами при торможении двигателем пропорционально сцепным свойствам;
- отсутствие перераспределения тормозных сил в сторону передних колёс при отсутствии антиблокировочной системы (АБС);
- исключение влияния на распределение тормозных сил при работе АБС;
- плавное протекание переходных процессов распределения крутящих моментов, минимизирующее их влияние на устойчивость движения и комфортабельность автомобиля при одновременном обеспечении высокой чувствительности к управляющему воздействию.

Следует отметить, что задача полного удовлетворения перечисленных и во многом противоречащих друг другу требований не имеет осуществлённого в металле технического решения.

Эффективность полноприводного грузового автомобиля определяется комплексом его эксплуатационных свойств (выходных параметров): тягово-скоростных, тормозных, проходимости, топливной экономичности, плавности хода, управляемости, устойчивости и манёвренности [18]. В связи с эти важной задачей поиска базовых закономерностей распределения мощности между ведущими мостами и колёсами является отыскание таких управляющих параметров, которые обеспечили бы максимальную эффективность движения полноприводного грузового автомобиля.

Отметим, что целевая функция поиска закономерностей распределения мощности определяется ролью и местом полноприводного грузового автомобиля в транспортной системе России, а также задачами отраслей, предприятий и ведомств, в которых они используются. В зависимости от выполняемых функций полноприводные грузовые автомобили можно условно разделить на 4 группы (рис. 3), каждая из которых имеет свои показатели эффективности [19]:

I. Автомобили транспортной группы, предназначенные для перевозки груза переменной массы (бортовые автомобили, автомобили-самосвалы, автомобили-цистерны и т.д.);
II. Автомобили тяговой группы, предназначенные для буксирования прицепов с переменной массой груза (седельные тягачи);
III. Автомобили транспортно-тяговой группы, предназначенные для перевозки грузов и одновременно буксирования оборудования, прицепов (полуприцепов) многоцелевого назначения (например, автомобили-лесовозы, сельскохозяйственные самосвальные автопоезда т.д.);
IV. Автомобили для монтажа и транспортировки технологического оборудования (автомобильные краны, пожарные автомобили и т.д.)

С учетом описанного разделения полноприводных грузовых автомобилей на группы можно выделить следующие критерии эффективности первого (более низкого) уровня:

- для автомобилей I группы — масса перевозимого груза;
- для автомобилей II группы — масса буксируемого прицепа (сила тяги на крюке);

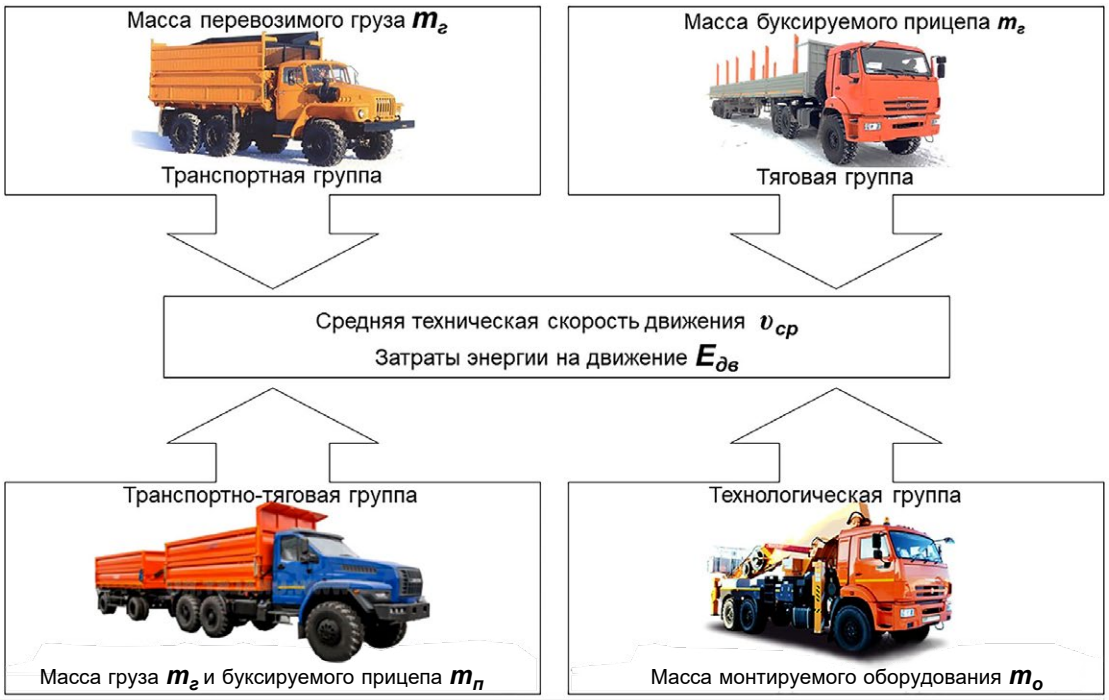

Рис. 3. Группы полноприводных грузовых автомобилей сельскохозяйственного назначения по функциональному назначению и критерии оценки их эффективности.
Fig. 3. Groups of all-wheel drive agricultural trucks by functional purpose and criteria for evaluating their effectiveness.

- для автомобилей III группы — масса перевозимого груза и буксируемого прицепа;
- для автомобилей IV группы — масса монтируемого оборудования.

Критерии эффективности второго уровня являются обобщёнными; в качестве основных обобщённых показателей эффективности полноприводных грузовых автомобилей целесообразно использовать среднюю скорость движения υср на маршруте и затраты энергии Едв на движение. В связи с тем, что масса перевозимого груза и буксируемого прицепа определяется силой, реализованной в контакте ведущих колёс с опорной поверхностью, для полноприводных грузовых автомобилей I–III групп можно использовать единый обобщённый показатель эффективности первого уровня — силу тяги на крюке.

Таким образом, на основании вышеизложенного, целесообразно сформулировать 4 задачи оптимизации.

1 задача: найти допустимое управление распределением мощности, переводящее полноприводный грузовой автомобиль из начальной точки в конечную точку за заданное время с максимальной нагрузкой (перевозимым грузом, оборудованием, буксируемым прицепом и т.д.).

Критерий оптимизации:

$$F_1\begin{pmatrix} M_{дв} \\ M_т \\ K_б \end{pmatrix} = P_{кр}, \qquad (1)$$

где $M_{дв}$ — крутящий момент двигателя, подводимый к силовой передаче; $M_т$ — тормозным моментом, прикладываемым к буксующему колесу; $K_б$ — коэффициент блокировки дифференциала.

Целевая функция:

$$F_1\begin{pmatrix} M_{дв} \\ M_т \\ K_б \end{pmatrix} = P_{кр} \to \max. \qquad (2)$$

Ограничения:

- гарантированное преодоление внешних сил сопротивления движения:

$$\sum P_к \geq \sum P_{сопр}, \qquad (3)$$

где $\Sigma P_к$ — суммарная сила тяги; $\sum P_{сопр}$ — сумма внешних и внутренних сил сопротивления движению;

- сцепление колёс с опорной поверхностью [20]:

$$\varphi_i R_{z\,i} = \sqrt{P_{к\,i}^2 + P_{y\,i}^2}; \qquad (4)$$

- ограничение по критическому буксованию ведущих колёс:

$$\delta_i \leq \delta_{доп}, \qquad (5)$$

где δ_i, $\delta_{доп}$ — текущее и допустимое буксование колеса.

2 задача: найти допустимое управление распределением мощности, переводящее полноприводный грузовой автомобиль с максимальной нагрузкой (грузом, монтируемым

оборудованием, буксируемым прицепом и т.д.) из начальной в конечную точку за минимальное время.

Критерий оптимизации:

$$F_2\begin{pmatrix} M_{\text{дв}} \\ M_{\text{т}} \\ K_{\text{б}} \end{pmatrix} = \upsilon_{\text{ср}}. \qquad (6)$$

Целевая функция:

$$F_2\begin{pmatrix} M_{\text{дв}} \\ M_{\text{т}} \\ K_{\text{б}} \end{pmatrix} = \upsilon_{\text{ср}} \to \max. \qquad (7)$$

Ограничения:

- гарантированное преодоление внешних сил сопротивления движения, согласно формуле (3);
- сцепление колёс с опорной поверхностью, согласно формуле (4);
- ограничение по критическому буксованию ведущих колёс, согласно формуле (5)
- ограничения на допустимые скорости движения:

$$\upsilon_{\text{ср}} = \upsilon_{\text{доп}}, \qquad (8)$$

где $\upsilon_{\text{доп}}$ — допустимая по условиям устойчивости и плавности хода скорость движения.

3 задача: найти допустимое управление распределением мощности, переводящее полноприводный грузовой автомобиль с максимальной нагрузкой (грузом, монтируемым оборудованием, буксируемым прицепом и т.д.) из начальной точки в конечную точку за заданное время с минимальными затратами энергии.

Критерий оптимизации:

$$F_3\begin{pmatrix} M_{\text{дв}} \\ M_{\text{т}} \\ K_{\text{б}} \end{pmatrix} = E_{\text{дв}}. \qquad (9)$$

Целевая функция:

$$F_3\begin{pmatrix} M_{\text{дв}} \\ M_{\text{т}} \\ K_{\text{б}} \end{pmatrix} = E_{\text{дв}} \to \min. \qquad (10)$$

Ограничения:

- гарантированное преодоление внешних сил сопротивления движения, согласно формуле (3);
- сцепление колёс с опорной поверхностью, согласно формуле (4);
- ограничение по критическому буксованию ведущих колёс, согласно формуле (5).

Отметим, что задачи 1–3 представляют собой, по сути, задачу однокритериальной оптимизации. Более общей и требующей применения методов многокритериальной оптимизации является 4-я задача. Для её решения целесообразно применение минимаксной стратегии поиска.

4 задача: найти допустимое управление распределением мощности, переводящее полноприводный грузовой автомобиль с максимальной нагрузкой (грузом, монтируемым оборудованием, буксируемым прицепом и т.д.) из начальной точки в конечную точку за минимальное время и с минимально возможным расходом энергии.

Критерии оптимизации:

$$f_1\begin{pmatrix} M_{\text{дв}} \\ M_{\text{т}} \\ K_{\text{б}} \end{pmatrix} = P_{\text{кр}},\ f_2\begin{pmatrix} M_{\text{дв}} \\ M_{\text{т}} \\ K_{\text{б}} \end{pmatrix} = \upsilon_{\text{ср}},\ f_3\begin{pmatrix} M_{\text{дв}} \\ M_{\text{т}} \\ K_{\text{б}} \end{pmatrix} = E_{\text{дв}}. \qquad (11)$$

Целевая функция:

$$F_4\begin{pmatrix} M_{\text{дв}} \\ M_{\text{т}} \\ K_{\text{б}} \end{pmatrix} = \min_{\text{кр}} \max_{i} \left\{ f_i \begin{pmatrix} M_{\text{дв}} \\ M_{\text{т}} \\ K_{\text{б}} \end{pmatrix} \right\}. \qquad (12)$$

Ограничения:

- обеспечение принципиальной возможности движения машины, согласно формуле (3);
- накладываемые на сцепные свойства колёс с опорной поверхностью, согласно формуле (4);
- ограничения на допустимые величины буксования колёс, от которых зависят глубина образовывающейся колеи, согласно формуле (5);
- ограничения на допустимые скорости движения, согласно формуле (8).

В связи с тем, что средняя скорость движения автомобиля определяется величиной реализуемых в данных условиях движения ускорений [21], которые, в свою очередь, определяются реализуемыми силами тяги и потерями мощности двигателя, задачи 1–4 поиска средней скорости движения и минимума расхода энергии являются эквивалентными.

На стадии определения базовых закономерностей распределения мощности между ведущими мостами и колёсами полноприводного грузового автомобиля необходимо найти совокупность зависимостей между параметрами самого автомобиля (мощность силовой установки, масса, габариты, координаты центров тяжести, парусности и тягово-сцепного устройства), его груза и оборудования (масса, габариты, координаты центра тяжести) и опорной поверхности (коэффициенты сцепления и сопротивления качению), с одной стороны, и коэффициентом блокировки межосевых и межколесных дифференциалов, с другой стороны. При этом решается обратная задача динамики [22]: по заданным требованиям к эффективности полноприводных грузовых автомобилей, выраженным в виде сформулированных критериев эффективности, определяются параметры характеристик управляющих воздействий. В результате обеспечивается максимальная эффективность машины.

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568209

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования авторами была разработана методика определения закономерностей распределения мощности между ведущими колёсами полноприводных грузовых автомобилей сельскохозяйственного назначения и их адаптации к реальным условиям движения. Основными стадиями методики являются: постановка задачи оптимизации; вычислительная процедура и определение базовых закономерностей распределения мощности; адаптация базовых закономерностей и оценка эффективности предлагаемых решений.

В зависимости от выполняемых функций полноприводные грузовые автомобили сельскохозяйственного назначения условно разделены на 4 группы, каждая из которых имеет свои показатели эффективности, в том числе:

- масса перевозимого груза (монтируемого оборудования, буксируемого прицепа и т.п.);
- средняя скорость движения $v_{ср}$ на маршруте;
- затраты энергии $E_{дв}$ на движение.

Установлено, что при моделировании движения полноприводных грузовых автомобилей сельскохозяйственного назначения по маршруту, осуществляемому с целью определения базовых закономерностей распределения мощности, достаточно воспользоваться дифференциальными уравнениями прямолинейного движения автомобиля.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. А.В. Келлер — научное руководство, участие в проведении экспериментальных исследований, редактирование текста рукописи; А.В. Попов — разработка программы и методик экспериментального исследования, проведение и обработка результатов эксперимента, подготовка рабочих материалов для рукописи, обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведённым исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Разработка математической модели эксплуатации шасси (трансмиссии, ходовой части и механизмов управления) в статическом и динамическом состоянии и создание на её основе цифрового двойника платформы легкового автомобиля» (шифр: FZRR-2023-0007).

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. A.V. Keller — scientific leadership, participation in experimental research, editing of the text of the manuscript; A.V. Popov — development of the program and methods of experimental research, conducting and processing the results of the experiment, preparation of working materials of the text of the manuscript, literature review, collection and analysis of literary sources, writing the text and editing the article. The authors confirm the compliance of their authorship with the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the project "Development of a mathematical model of chassis operation (transmission, chassis and control mechanisms) in static and dynamic states and creation of a digital twin of a passenger car platform on its basis" (code: FZRR-2023-0007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сельское хозяйство в России. 2021: Статистический сборник. М.: Росстат, 2021.

2. Агропромышленный комплекс России в 2021 году. Основные показатели АПК Российской Федерации. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. М.: Росинформагротех, 2022.

3. Шкель А.С., Загарин Д.А., Козловская М.А. и др. Новое семейство технологических надстроек для АПК на базе специализированного автомобиля сельскохозяйственного назначения // Технология колёсных и гусеничных машин. 2015. № 6(22). С. 12–19. EDN VBCYND

4. Измайлов А.Ю., Дзоценидзе Т.Д., Евтюшенков Н.Е. и др. Исследование рыночной ниши и обоснование функциональных особенностей грузовых автомобилей сельскохозяйственного назначения с полной массой до 6 т // Система технологий и машин для инновационного развития АПК России : Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции, посвящённой 145-летию со дня рождения основоположника земледельческой механики В.П. Горячкина, Москва, 17–18 сентября 2013 года. Том Часть 2. — Москва: ВНИИМСХ, 2013. С. 127–133. EDN TTCANB

5. Загарин Д.А., Козловская М.А., Дзоценидзе Т.Д. Анализ потребности и спроса на машины сельскохозяйственного назначения в условиях структурного кризиса в экономике // Автомобильная промышленность. 2020. № 9. С. 1–7. EDN ULVGPB

6. Годжаев Т.З., Зубина В.А., Малахов И.С. Обоснование функциональных характеристик сельскохозяйственных

мобильных энергосредств в многокритериальной постановке // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, №6. С. 411–420. doi: 10.17816/0321-4443-121325

7. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П. и др. Приоритетные направления научно-технического развития отечественного тракторостроения // Сельский механизатор. 2021. № 2. С. 3–5. EDN AKRSBW

8. Дзоценидзе Т.Д., Козловская М.А., Загарин Д.А. Новый технический облик автомобилей и тракторов как способ преодоления кризисных явлений в отечественном машиностроении // Автомобильная промышленность. 2020. № 10. С. 13–18. EDN NZCFCB

9. Красников Г.Я., Дидманидзе О.Н., Сиротин П.В. и др. Обоснование технического облика агротехники и стратегических подходов её проектирования // Чтения академика В.Н. Болтинского : Сборник статей, Москва, 25–26 января 2023 года. Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2023. С. 10–32. EDN OQHKER

10. Vantsevich V.V., Paldan J.R., Farley B.K. Mobility optimization and control of a 4x4 he-vehicle in curvilinear motion on stochastic terrain // Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference, Charlotte, NC, 21–24 августа 2016 года. Charlotte: ASME, 2016. doi: 10.1115/DETC2016-59207

11. Vantsevich V.V., Bortolin G. Axle Drive and Brake-Based Traction Control Interaction // SAE International Journal of Commercial Vehicles. 2011. Vol. 4, N. 1. P. 49–55. doi: 10.4271/2011-01-2160

12. Keller A., Aliukov S., Anchukov V., et al. Investigations of Power Distribution in Transmissions of Heavy Trucks // SAE Technical Papers. 2016. doi: 10.4271/2016-01-1100

13. Высоцкий М.С., Дубовик Д.А., Харитончик С.В. Управление межосевым и межколесным приводом большегрузных автомобилей // Весці НАН Беларусі. 2005. № 3. С. 30–35.

14. Шухман С.Б., Соловьев В.И., Прочко Е.И. и др. Теория силового привода колёс автомобилей высокой проходимости. Москва: Агробизнесцентр, 2007. EDN QNUPLT

15. Тарасик В.П., Пузанова О.В., Курстак В.И. Моделирование дифференциальных приводов ведущих колёс мобильных машин // Вестник Белорусско-Российского университета. 2009. № 3. С. 42–53.

16. Барыкин, А.Ю. Основы теории современных дифференциалов. Набережные Челны: КамПИ, 2001.

17. Круташов А. В. Методы формирования рационального распределения мощности в трансмиссии легкового полноприводного автомобиля. автореферат дисс. ... канд. техн. наук. М., 2009.

18. Keller A., Aliukov S. Efficient power distribution in an all-wheel drive truck // Lecture Notes in Engineering and Computer Science, London, 01–03 июля 2015 года. London: WCE, 2015. P. 1201–1206. EDN XFRNQZ

19. Высоцкий М.С., Ванцевич В.В., Кабанов В.И. и др. Энергонагруженность и надёжность дифференциальных механизмов транспортно-тяговых машин. Минск: Навука і тэхника, 1991.

20. Тарасик В.П. Теория движения автомобиля. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2022. EDN FOWIQZ

21. Платонов В.Ф. Полноприводные автомобили. М.: Машиностроение, 1989.

22. Тарасик В.П., Рынкевич С.А. Интеллектуальные системы управления автотранспортными средствами. Минск: Технопринт, 2004. EDN TIYBIX

REFERENCES

1. *Agriculture in Russia. 2021: Statistical collection.* Moscow: Rosstat; 2021. (In Russ.)

2. *Agro-industrial complex of Russia in 2021. Main indicators of the agro-industrial complex of the Russian Federation. Ministry of Agriculture of the Russian Federation.* Moscow: Rosinformagrotekh; 2022. (In Russ.)

3. Shkel AS, Zagarin DA, Kozlovskaya MA, et al. A new family of technological add-ons for the agro-industrial complex based on a specialized agricultural vehicle. *Tekhnologiya kolesnykh i gusenichnykh mashin.* 2015;6(22):12–19. EDN VBCYND (In Russ.)

4. Izmailov AYu, Dzotsenidze TD, Evtyushenkov NE, et al. Research of the market niche and justification of the functional features of agricultural trucks with a gross weight of up to 6 tons. In: *System of technologies and machines for the innovative development of the Russian agro-industrial complex: Collection of scientific reports of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 145th anniversary birthday of the founder of agricultural mechanics V.P. Goryachkina, Moscow, September 17–18, 2013. Volume Part 2.* Moscow: VNIIMSKh; 2013:127–133. EDN TTCANB (In Russ.)

5. Zagarin DA, Kozlovskaya MA, Dzotsenidze TD. Analysis of the need and demand for agricultural machinery in conditions of a structural crisis in the economy. *Avtomobilnaya promyshlennost.* 2020;9:1–7. EDN ULVGPB (In Russ.)

6. Godzhaev TZ, Zubina VA, Malakhov IS. The justification of functional properties of agricultural moving power units in the multi-objective scenario. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2022;89(6):411–420. (In Russ.) doi: 10.17816/0321-4443-121325

7. Lachuga YuF, Izmailov AYu, Lobachevsky YaP, et al. Priority directions of scientific and technical development of domestic tractor manufacturing. *Selskiy mekhanizator.* 2021;2:3–5. EDN AKRSBW (In Russ.)

8. Dzotsenidze TD, Kozlovskaya MA, Zagarin DA. The new technical appearance of cars and tractors as a way to overcome crisis phenomena in the domestic mechanical engineering. *Avtomobilnaya promyshlennost.* 2020;10:13–18. EDN NZCFCB (In Russ.)

9. Krasnikov GYa, Didmanidze ON, Sirotin PV, et al. Justification of the technical appearance of agricultural machinery and strategic approaches to its design. In: *Readings of Academician V. N. Boltinsky: Collection of articles, Moscow, January 25–26, 2023.* Moscow: OOO «Sam Poligrafist»; 2023:10–32. EDN OQHKER (In Russ.)

10. Vantsevich VV, Paldan JR, Farley BK. Mobility optimization and control of a 4x4 he-vehicle in curvilinear motion on stochastic terrain. In: *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference, Charlotte, NC, August 21–24, 2016.* Charlotte: ASME; 2016. doi: 10.1115/DETC2016-59207

11. Vantsevich VV, Bortolin G. Axle Drive and Brake-Based Traction Control Interaction. *SAE International Journal of Commercial Vehicles.* 2011;4(1):49–55. doi: 10.4271/2011-01-2160

12. Keller A, Aliukov S, Anchukov V, et al. Investigations of Power Distribution in Transmissions of Heavy Trucks. *SAE Technical Papers.* 2016. doi: 10.4271/2016-01-1100
13. Vysotsky MS, Dubovik DA, Kharitonchik SV. Control of inter-axle and inter-wheel drive of heavy-duty vehicles. *Vestsi NAN Belarusi.* 2005;3:30–35. (In Russ.)
14. Shukhman SB, Solovyov VI, Prochko EI, et al. *Theory of power drive of wheels of off-road vehicles.* Moscow: Agrobiznestsentr; 2007. EDN QNUPLT (In Russ.)
15. Tarasik VP, Puzanova OV, Kurstak VI. Modeling of differential drivetrain of driving wheels of mobile machines. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta.* 2009;3:42–53. (In Russ.)
16. Barykin AYu. *Fundamentals of the theory of modern differentials.* Naberezhnye Chelny: KamPI; 2001. (In Russ.)
17. Krutashov AV. Metody formirovaniya ratsionalnogo raspredeleniya moshchnosti v transmissii legkovogo polnoprivodnogo avtomobilya [dissertation] Moscow; 2009. (In Russ.)
18. Keller A, Aliukov S. Efficient power distribution in an all-wheel drive truck. In: *Lecture Notes in Engineering and Computer Science, London, July 01–03, 2015.* London: WCE; 2015:1201–1206. EDN XFRNQZ
19. Vysotsky MS, Vantsevich VV, Kabanov VI, et al. *Power loading and reliability of differential mechanisms of transport and traction machines.* Minsk: Navuka i tekhnika; 1991. (In Russ.)
20. Tarasik VP. *Theory of vehicle motion.* Saint Petersburg: BKhV-Peterburg; 2022. EDN FOWIQZ (In Russ.)
21. Platonov VF. Four-wheel drive vehicles. Moscow: Mashinostroenie; 1989. (In Russ.)
22. Tarasik VP, Rynkevich SA. Intelligent vehicle control systems. Minsk: Tekhnoprint; 2004. EDN TIYBIX (In Russ.)

ОБ АВТОРАХ

*** Келлер Андрей Владимирович,**
профессор, д-р техн. наук,
заведующий кафедрой «Наземные транспортные средства»,
и.о. директора;
адрес: Российская Федерация, 123104, Москва,
Тверской б-р, д. 13, стр. 1;
ORCID: 0000-0003-4183-9489;
eLibrary SPIN: 4622-5727;
e-mail: andreikeller@rambler.ru

Попов Андрей Вячеславович,
аспирант научно-образовательного центра;
ORCID: 0009-0006-3266-9464;
eLibrary SPIN: 2518-0935;
e-mail: popov.andrey@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

AUTHORS' INFO

*** Andrey V. Keller,**
Professor, Dr. Sci. (Engineering),
Head of the Land Vehicles Department,
Acting Director;
address: 13 B1 Tverskoy boulevard, 1123104 Moscow,
Russian Federation;
ORCID: 0000-0003-4183-9489;
eLibrary SPIN: 4622-5727;
e-mail: andreikeller@rambler.ru

Andrey V. Popov,
Postgraduate of the Scientific and Educational Center;
ORCID: 0009-0006-3266-9464;
eLibrary SPIN: 2518-0935;
e-mail: popov.andrey@gmail.com

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568438

Оригинальное исследование

Результаты производственной проверки макетного образца орудия с активным приводом ротационных рабочих органов с оценкой агротехнических показателей

Р.И. Кравченко

Костанайский региональный университет имени А. Байтұрсынұлы, Костанай, Казахстан

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Модернизация с целью улучшения конструкции и повышения качества работы кольцевых рабочих органов, достигается за счет изменения конструктивных параметров (использования режущих ножей эллипсоидальной формы, устанавливаемых на ступице посредством спиц). Однако, принцип работы указанными рабочими органами остается малоизученным и требует проверки в полевых условиях с целью изучения качественных показателей работы для улучшения операций поверхностной обработки почвы и, как следствие, дальнейшего повышения урожая зерновых культур.

Цель работы — проверка в полевых условиях разработанного макетного образца орудия и установление соответствия полученных показателей агротребованиям, предъявляемым к предпосевной обработке почвы и пара.

Материалы и методы. Полевые исследования орудия и оценка показателей выполнены в соответствии со стандартами: «ГОСТ 20915–2011», «СТ РК 1559–2006». При проведении исследований соблюдались следующие требования: почва обрабатывалась на глубину h = 5..6 см, угол атаки β=40°, λ = 0,9...0,96, υ = 9...10 км/ч. В соответствии с приведёнными нормативными документами определялись качественные показатели работы орудия.

Результаты. По итогам полевых исследований установлено, что после прохода агрегата на поверхности поля остается менее 98,18–98,26%, сорняков. При этом с целью недопущения возникновения ветровой эрозии на поле сохраняется порядка 64,45% стерни, одновременно выравнивая поверхность поля – показатель крошения равен 84,46–83,87% и гребнистость поверхности поля 1,41–1,63 см. Гребни на дне образуемых борозд не более 1,6–1,81 см. Содержание ЭОЧ при выполнении операций поверхностной обработки почвы сократилось на 4,22–4,43% в сравнении с результатами до проведения полевых исследований.

Заключение. По полученным данным показателей качества работы следует, что применение орудия с данными рабочими органами способно повысить качество работы при проведении предпосевной и паровой обработок почвы.

Ключевые слова: ротационный рабочий орган; ВОМ; макетный образец орудия; дно борозды; гребень; агротехнические показатели; профиль дна борозды.

Как цитировать:
Кравченко Р.И. Результаты производственной проверки макетного образца орудия с активным приводом ротационных рабочих органов с оценкой агротехнических показателей // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 6. С. 515–522. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568438

Рукопись получена: 14.08.2023 **Рукопись одобрена:** 01.10.2023 **Опубликована онлайн:** 15.12.2023

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2023

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568438

Original Study Article

The results of the operational test of a mock-up sample of the tool with an active drive of rotary working bodies with an assessment of agrotechnical indicators

Ruslan I. Kravchenko

Kostanay Regional University named after A. Baitursynuly, Kostanay, Kazakhstan

ABSTRACT

BACKGROUND: Modernization aimed to improve the design and to increase the quality of operation of the ring-type working bodies, is possible with changing the design parameters such as the use of ellipsoidal cutting knives mounted on the hub by means of spokes. However, the principle of operation of these working bodies remains poorly understood and requires verification in the field conditions in order to study the qualitative performance indicators to improve surface tillage operations and, consequently, to increase the yield of grain crops further.

AIM: Field testing of the developed mock-up sample of the tool in order to define the compliance of the obtained indicators with the agricultural requirements for pre-sowing and fallow treatment..

METHODS: The field study of the tool and the evaluation of the indicators were carried out in accordance with the GOST 20915-2011 and the ST RK 1559-2006 standards. During the study, the following requirements were met: the depth of soil treatment h = 5...6 cm, angle of attack β = 40°, λ = 0.9...0.96, υ = 9...10 km/h. Qualitative indicators of the tool operation were defined in accordance with the given regulatory documents.

RESULTS: According to the results of the field study, it was found that after the passage of the unit, less than 98.18–98.26% of weeds remain on the field surface. At the same time, in order to prevent the occurrence of wind erosion, about 64.45% of stubble is preserved on the field, while leveling the field surface – the crumbling index is 84.46–83.87% and the ridge of the field surface is 1.41–1.63 cm. The ridges at the bottom of formed furrows are no more than 1.6-1.81 cm. The content of erosion-hazardous particles during surface tillage operations decreased by 4.22–4.43% in comparison with the results before the field study.

CONCLUSIONS: According to the obtained data of operation quality indicators, the use of tools with these working bodies can improve the quality of operation during pre-sowing and fallow treatments.

Keywords: rotary working body; power takeoff shaft; mock-up sample of the tool; furrow bottom; ridge; agrotechnical indicators; furrow bottom profile.

To cite this article:
Kravchenko RI. The results of the operational test of a mock-up sample of the tool with an active drive of rotary working bodies with an assessment of agrotechnical indicators. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2023;90(6):515–522. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568438

Received: 14.08.2023 **Accepted:** 01.10.2023 **Published online:** 15.12.2023

moscow polytech

The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International license
© Eco-Vector, 2023

ECO•VECTOR

ВВЕДЕНИЕ

Орудия, рабочими органами которых являются различные по конфигурации и исполнению диски, активно используются во всем мире на операциях поверхностной обработки почвы. Сферические диски довольно хорошо работают на высоко увлажнённых полях, на засоренных почвах, при этом они не забиваются пожнивными остатками и стерней. Однако, дисковые рабочие органы со сплошной поверхностью обладают недостатком. На рабочую часть дисков налипает почва, что приводит к увеличению энергоемкости и снижению качества обработки почвы. В районах, где в виду природно-климатических условий преобладают высокие скорости ветра, почвы наиболее подвержены ветровой эрозии, для их возделывания применяют орудия и машины, оснащенные кольцевыми рабочими органами [1]. Вместе с тем, и у данного типа рабочих органов происходит налипание почвы на рабочую поверхность, тем самым происходит увеличение тягового сопротивления и ухудшается качество работы. «На базе данных рабочих органов разработан и изготовлен РРО с режущими ножами эллипсоидальной формы [2, 3]. Особенностью конструкции являются режущие элементы (ножи), косо установленные к оси вращения рабочего органа, при этом сам рабочий орган имеет угол атаки и приводится в работу от ВОМ трактора. Режущим элементам придана эллиптическая форма, которая позволяет избегать налипания почвы на рабочую поверхность и обеспечивать требуемое качество поверхностной обработки почвы МОО. [4, 1]». Научная новизна настоящего исследования заключается в разработке макетного образца орудия (далее МОО), оснащенного РРО, приводимыми в движение от ВОМ трактора, которые по результатам производственной проверки обеспечивают требуемое качество на операциях поверхностной обработки почвы (предпосевной и паровой обработках) по глубине обработки (конструкция РРО защищена патентом на ПМ РК № 3272). Предпосевная обработка почвы — это прием механической обработки почвы, выполняемый непосредственно перед посевом зерновых культур с целью выравнивания поверхности поля и борьбы с сорной растительностью [5]. «Согласно ГОСТ 26244-84. Обработка почвы предпосевная. Требования к качеству и методы определения. Поверхность обработанного поля должна быть выровнена, почвенные комья не должны превышать 10 см. Гребнистость поверхности поля не более 4 см, отклонение от глубины обработки не более 1 см. Полное подрезание сорной растительности, сохранение не менее 60% растительных остатков на поверхности поля [5]».

Как известно, природно-климатические условия Северного Казахстана характеризуются сильными ветрами и малым количеством осадков, что приводит к быстрому испарению продуктивной влаги с поверхности поля. Во избежание потери влаги аграриям следует обрабатывать почву на как можно меньшую глубину, в тоже время, обеспечивая качество выполняемых операций. В данном регионе наибольшее распространение при подготовке поля к посеву получают механические способы обработки почвы. Согласно данным М.К. Сулейменова наиболее широко поля под посев пшеницей (а это 85–90% всех площадей в РК) обрабатывают по 2 технологиям: почвозащитной и по технологии Mini-Till [6].

Для того, чтобы иметь высокий урожай зерновых культур, необходимо обеспечить все условия для своевременного всхода семян зерновых. Качественным показателем в таком случае служит создание благоприятного ложа семян, т.е. дно сформированной борозды должно быть достаточно уплотнено и выровнено. С этой целью применяются различные машины и орудия с РРО.

Цель исследований — проверка в полевых условиях разработанного макетного образца орудия с целью соответствия полученных показателей агротребованиям на предпосевную обработку почвы и обработки пара.

Условные обозначения:

РОО — ротационный рабочий орган;
МОО — макетный образец орудия;
ВОМ — вал отбора мощности;
ЭОЧ — эрозионно-опасные частицы;
λ — кинематический параметр;
υ — скорость движения агрегата, м/с;
β — угол атаки рабочего органа, °;
h — глубина обработки почвы, см.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для обеспечения качественной обработки почвы на операциях предпосевной обработки и паровой обработок почвы разработан МОО, оснащенный РРО, которые приводятся в действие непосредственно от ВОМ трактора, рис. 1. МОО по типу агрегатирования: навесная машина, состоящая из несущей рамы I, откоса II, РРО III, опорного колеса IV, карданного вала V, служащего для передачи крутящего момента посредством цепи VI к рабочим органам, углового редуктора VII, предохранительной VIII и обгонной муфт IX [7].

С помощью гидравлической системы трактора МОО переводится в состояние агрегатирования до поля. В рабочее положение для установки заданной глубины обработки секция РРО приводится с помощью винтового механизма, расположенного на опорном катке. Рама с секцией (батареей) рабочих органов крепится к раме несущей. На валу с батареями РРО имеются звездочки, которые посредством цепной передачи передают вращение от ВОМ трактора к рабочим органам.

Рабочий процесс включает в себя следующие технологические операции (рис. 2):

- с помощью рукоятки на опорном катке устанавливается требуемая глубина обработки почвы;
- батарея РРО приводится в действие от ВОМ трактора;
- за счет ВОМ батарея с рабочими органами вращается, заглубляется и обрабатывает требуемый слой почвы, разбивая почвенные комья и уничтожая сорняки.

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568438

Рис. 1. Конструкция макетного образца орудия на предпосевной обработке почвы: I — несущая рама, II — откос, III — батарея ротационных рабочих органов, IV — опорное колесо, V — карданный вал, VI — цепь, VII — угловой редуктор, VIII — муфта предохранительная, IX — муфта обгонная.
Fig. 1. Design of the mock-up sample of the tool at the pre-sowing soil treatment: I — a carrying frame; II — a sloping link; III — a pack of rotational working bodies; IV — a supporting wheel; V — a driveshaft; VI — a chain; VII — a bevel reduction gear; VIII — a slip clutch; IX — an overrunning clutch.

Рис. 2. Технологический процесс предпосевной обработки почвы с помощью макетного образца орудия, агрегируемого трактором МТЗ-82.
Fig. 2. A technological process of the pre-sowing soil treatment using the mock-up sample of the tool coupled with the MTZ-82 tractor.

Полевые исследования по определению агротехнических показателей (крошение почвы, подрезание сорняков, сохранение растительных остатков, содержание ЭОЧ и высота гребней дна борозды) для поверхностной обработке почвы проводились на 2 ее операциях (предпосевной и паровой) в соответствии с «ГОСТ 20915–2011» [8, с. 11] и «СТ РК 1559–2006» [9]. Агротехнические показатели оцениваются согласно «СТ РК 1559–2006». Глубина обработки почвы в обоих случаях не превышала 6 см, при этом отношение окружной скорости РРО к поступательной скорости агрегата было в пределах λ = 0,9–0,96, скорость движения почвообрабатывающего агрегата составляла υ = 9–10 км/ч.

Одним из значимых показателей качества обработки почвы для получения хорошего урожая зерновых является гребнистость на дне сформированной борозды после прохода агрегата. Частная методика измерения $h_{гребней}$ дна борозды включала в себя 4-х кратную повторность проведения измерений, два из которых — по направлению движения агрегата, два — против (всего 24).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Условия проведения испытаний МОО на предпосевной и паровой обработках почвы определялись в соответствии

Таблица 1. Условия проведения производственной проверки МОО
Table 1. Conditions of conducting the operational test of the mock-up sample

Показатель	Почвенный слой		
	до 5 см	5–10 см	более 10 см
Влажность почвы, %			
– Предпосевная обработка	12,57	26,68	27,25
– Паровая обработка	15,12	26,68	26,91
Твердость почвы, МПа			
– Предпосевная обработка	0,45	1,48	2,11
– Паровая обработка	1,28	2,01	2,32
Масса стерни, г/м^2			
– Предпосевная обработка		87,9	
– Паровая обработка		не измеряется	
Гребнистость поверхности, см			
– Предпосевная обработка		1,41	
– Паровая обработка		1,63	

с «ГОСТ 20915–2011» и представлены в таблице 1. Почва — чернозём.

Результаты полученных и обработанных данных по определению агротехнических показателей на поверхностную обработку почвы, таких как: сохранение стерни, подрезание сорных растений, гребнистость поверхности поля, гребнистости дна сформированной борозды, крошение почвы и содержание ЭОЧ на двух операциях поверхностной обработки почвы (предпосевной и паровой) представлены в таблице 2.

В таблице 3 приведены результаты обработки данных по определению сохранения стерни на предпосевной обработке почвы.

В таблице 4 приведены результаты обработки данных по подрезанию сорных растений на предпосевной и паровой обработках почвы при скорости движения агрегата 9,6 км/ч.

Согласно требованиям ГОСТ на поверхностную обработку почвы после производственной проверки орудия проведена оценка следующих показателей: крошение почвы, степень подрезания сорных растений, сохранение растительных остатков (стерни), гребнистость поверхности поля, содержания ЭОЧ, а также hгребней на дне борозды, рис. 3.

Оценка и измерение гребней на дне борозды, сформированной МОО с активным привоом РРО проводилась при 4-х кратной повторности (всего 24 опыта) по ранее указанной частной методике представлены в таблице 5. Все результаты подвергались математической обработке данных.

Таким образом, в результате производственной проверки макетного образца орудия (МОО) на 2 операциях поверхностной обработки почвы с оценкой агротехнических показателей можно сделать вывод, что применение данного орудия способно обеспечить требуемое качество при подготовке почвы к посеву зерновых культур.

Таблица 2. Результаты полученных показателей на 2 операциях поверхностной обработки почвы

Table 2. Results of the indicators obtained at two operation of surface soil treatment

Показатель	Величина показателя
υ, км/ч	
– Предпосевная обработка	9,57
– Паровая обработка	9,29
h, см	
– Предпосевная обработка	5,8
– Паровая обработка	6,1
Крошение почвы, %	
– Предпосевная обработка	84,46
– Паровая обработка	83,87
Подрезание сорняков, %	
– Предпосевная обработка	98,26
– Паровая обработка	98,19
Сохранение растительных остатков (стерни), %	
– Предпосевная обработка	64,45
– Паровая обработка	не измеряется
Высота гребней поверхности поля, см	
– Предпосевная обработка	1,41
– Паровая обработка	1,63
Высота гребней дна борозды, см	
– Предпосевная обработка	1,81
– Паровая обработка	не измеряется
Изменение содержания ЭОЧ в слое до 5 см после прохода агрегата, %	
– Предпосевная обработка	-4,22
– Паровая обработка	-4,43

Таблица 3. Результаты обработки данных по определению сохранения стерни

Table 3. Results of data processing on definition the stubble preserving

Повторность	Масса стерни, г		Сохранение стерни, %
	До прохода	После прохода	
1	275,4	166,3	60,38
2	256,4	175,6	68,19
3	263,7	165,5	62,76
4	267,1	167,8	62,72
5	256,8	181,2	70,56
Сумма			325,02
Среднее			64,45
Средняя масса стерни, г/м^2	87,9		

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568438

Таблица 4. Результаты обработки данных по подрезанию сорных растений
Table 4. Results of data processing on weeds cutting

Повторность	Кол-во сорных растений, шт		Подрезание сорных растений, %
	До прохода	После прохода	
1	51/40	0/1	100,0 / 97,5
2	44/59	1/0	97,5 / 100,0
3	37/45	1/1	97,3 / 97,6
4	46/34	1/1	97,2 / 97,1
5	52/41	0/0	100,0 / 100,0
6	50/46	0/1	100,0 / 97,7
Среднее			98,26 / 98,19

Примечание: числитель — предпосевная обработка почвы, знаменатель — обработка пара.

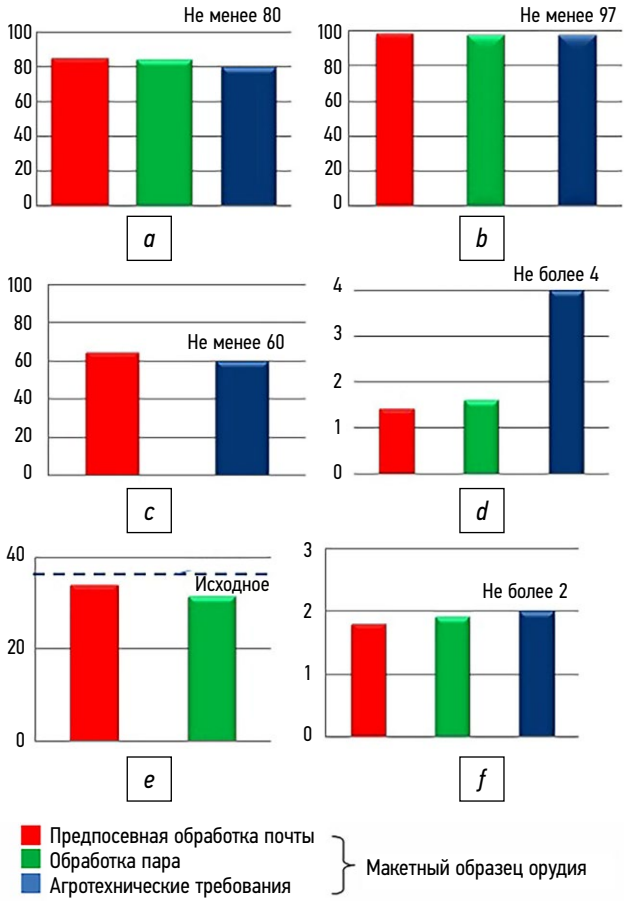

Рис. 3. Результаты производственной проверки с оценкой агротехнических показателей макетного образца орудия: *a* — крошение почвы, %; *b* — подрезание сорной растительности, %; *c* — сохранение растительных остатков (стерни), %; *d* — высота гребней на поверхности поля, см; *e* — содержание ЭОЧ, %; *f* — высота гребней дна борозды, см.
Fig. 3. Results of the operational test with the assessment of agrotechnical indicators of the mock-up sample of the tool: *a* — soil crumbling, %; *b* — weed cutting, %; *c* — stubble preserving, %; *d* — height of ridges on field surface, cm; *e* — content of erosion-hazardous particles; %; *f* — height of ridges at the bottom of a furrow, cm.

ВЫВОДЫ

1. Производственная проверка МОО, оснащенного РРО эллипсоидальной формы с оценкой агротехнических показателей на предпосевной и паровой обработках почвы (не более 6 см), характеризуется требуемым качеством — подрезание сорняков более 98,18–98,26%. Одновременно достигается выравнивание поверхности поля — высота гребней не более 1,41–1,63 см, крошение почвенных комьев до 84,46–83,87%. Создается плотное ложе для семян — высота гребней дна борозды не превышает требуемую величину — 1,81 см.
2. Во избежание возникновения ветровой эрозии почв на поверхности поля сохраняется 64,45% растительных остатков (стерни), при этом содержание ЭОЧ при выполнении операций поверхностной обработки почвы сократилось на 4,22–4,43% в сравнении с результатами до проведения полевых исследований.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад автора. Р.И. Кравченко — проведение экспериментальной части, определение показателей качества для поверхностной обработки почвы, разработка частной методики для определения высоты гребней на дне борозды, обработка результатов. Автор подтверждает соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (автор внес существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочел и одобрил финальную версию перед публикацией).
Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.
Источник финансирования. Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Таблица 5. Результаты измерений высоты гребней дна борозды на предпосевной обработке почвы
Table 5. Results of measuring height of ridges at the bottom of a furrow at the pre-sowing soil treatment

Опыт	$h_{гребней}$ дна борозды, см				Опыт	$h_{гребней}$ дна борозды, см			
	Повторность					Повторность			
	1	2	3	4		1	2	3	4
I	1,6	2,0	2,0	2,0	XVI	1,8	2,0	1,6	2,0
II	2,0	1,6	1,6	1,6	XVII	1,6	2,0	2,0	1,6
III	1,8	2,0	2,0	1,8	XVIII	2,0	1,6	1,6	2,0
IV	1,6	1,4	2,0	2,0	XIX	1,6	1,8	2,0	2,0
V	2,0	2,0	1,8	2,0	XX	1,6	1,8	2,0	1,6
VI	2,0	1,6	2,0	2,0	XXI	2,0	1,6	1,8	1,6
VII	1,6	1,8	1,4	1,8	XXII	2,0	2,0	2,0	2,0
VIII	2,0	1,8	2,0	1,6	XXIII	1,8	1,6	1,8	1,6
IX	1,8	1,6	1,8	1,6	XXIV	2,0	1,6	1,8	2,0
X	2,0	1,8	1,8	1,8					
XI	1,4	2,0	2,0	1,6	Средняя высота гребней дна борозды, см	1,81			
XII	2,0	2,0	2,0	2,0	Дисперсия, $см^2$	0,2456			
XIII	2,2	1,6	1,6	1,8	Среднеквадратическое отклонение, см	0,498			
XIV	1,4	1,8	1,8	1,8					
XV	1,6	1,6	2,0	1,6	Коэффициент вариации, %	27,536			

ADDITIONAL INFORMATION

Author's contribution. R.I. Kravchenko — conducting the experimental part, determining quality indicators for surface soil treatment, developing a privately-owned methodology for determining the height of ridges at the bottom of a furrow, processing the results. The author made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agrees to be accountable for all aspects of the work.

Competing of interests. The author declares the absence of obvious and potential conflicts of interest.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Amantayev , Gaifullin G., Kravchenko R., et al. Investigation of the furrow formation by the disc tillage tools // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2018. Vol. 24, N. 4. P. 704–709.

2. Amantayev M.A., Gaifullin G.Z., Kushnir V.G., et al. Soil body formation in front of the rotary tillage tools // Biosciences, Biotechnology Research Asia. 2016. Vol. 13, N. 4. P. 1983–1988.

3. Benyukh O.A., Kravchenko R.I. Features of furrow formation with rotary and arrow-headed working bodies // Tractors and Agricultural Machinery. 2023. Vol. 90. N. 2. P. 179–186. doi: 10.17816/0321-4443-188660

4. Кравченко Р.И. Обоснование параметров батарей орудия для поверхностной обработки почвы с активным приводом ротационных рабочих органов, режущие лезвия которых выполнены по эллиптической линии: дисс... доктора философии (PhD). Костанай, 2019.

5. ГОСТ 26244-84. Обработка почвы предпосевная. Требования к качеству и методы определения. Введ. 1986–01–01. М.: Изд-во стандартов, 1984.

6. Сулейменов М.К. Технология No-till на Казахстанских просторах, реально ли? // Сельскохозяйственная техника. 2011. № 8 (56). С. 37–38.

7. Гайфуллин Г.З., Кравченко Р.И., Амантаев М.А. Макетный образец орудия с активным приводом ротационных рабочих органов // Матер. XIV междунар. научн.-практ. конф. «Европейская наука XXI века». Пржемысл, 2018. С. 43–46.

8. ГОСТ 20915-2011. Сельскохозяйственная техника. Методы определения условий испытаний. Введ. 2013-01-01. М.: Стандартинформ, 2013.

9. СТ РК 1559-2006. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и орудия для поверхностной обработки почвы. Методы

оценки функциональных показателей. Введ. 2006-11-24. — Астана: Комитет по техническому регулированию и метрологии Министерства индустрии и торговли Республики Казахстан, 2006.

10. Гайфуллин Г.З., Кравченко Р.И., Амантаев М.А. Выравненность дна борозды, формируемой орудием с активным приводом ротационных рабочих органов // 3i: intellect, idea, innovation. Многопрофильный научный журнал КГУ имени А. Байтурсынова. Костанай, 2019. № 2. С. 44–51.

REFERENCES

1. Amantayev M, Gaifullin G, Kravchenko R, et al. Investigation of the furrow formation by the disc tillage tools. *Bulgarian Journal of Agricultural Science.* 2018;24(4):704–709.

2. Amantayev MA, Gaifullin GZ, Kushnir VG, et al. Soil body formation in front of the rotary tillage tools. *Biosciences, Biotechnology Research Asia.* 2016;13(4):1983–1988.

3. Benyukh OA, Kravchenko RI. Features of furrow formation with rotary and arrow-headed working bodies. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2023;90(2):179–186. doi: 10.17816/0321-4443-188660

4. Kravchenko RI. Obosnovanie parametrov batarey orudiya dlya poverkhnostnoy obrabotki pochvy s aktivnym privodom rotatsionnykh rabochikh organov, rezhushchie lezviya kotorykh vypolneny po ellipticheskoy linii [dissertation] Kostanay, 2019.

5. GOST 26244-84. Obrabotka pochvy predposevnaya. Trebovaniya k kachestvu i metody opredeleniya. Vved. 1986–01–01. Moscow: Izd-vo standartov; 1984.

6. Suleimenov MK. Is no-till technology possible in Kazakhstan's open spaces? *Selskokhozyaystvennaya tekhnika.* 2011;8(56):37–38.

7. Gaifullin GZ, Kravchenko RI, Amantaev MA. A prototype of a weapon with an active drive of rotary working bodies. In: *Mater. XIV international scientific-practical conf. "European science of the 21st century."* Premysl; 2018:43–46.

8. GOST 20915-2011. Selskokhozyaystvennaya tekhnika. Metody opredeleniya usloviy ispy-taniy. Vved. 2013-01-01. Moscow: Standartinform; 2013.

9. ST RK 1559-2006. Testing of agricultural machinery. Machines and tools for surface tillage. Methods for assessing functional indicators. Enter. 2006-11-24. Astana: Komitet po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii Ministerstva industrii i tor-govli Respubliki Kazakhstan; 2006.

10. Gaifullin GZ, Kravchenko RI, Amantaev MA. Levelness of the bottom of the furrow formed by a tool with an active drive of rotary working parts. 3i: intellect, idea, innovation. *Mnogoprofilnyy nauchnyy zhurnal KGU imeni A. Baytursynova.* Kostanay; 2019;2:44–51.

ОБ АВТОРЕ

Кравченко Руслан Иванович,
доктор (PhD),
и.о. ассоциированного профессора кафедры аграрной техники и транспорта;
адрес: Республика Казахстан, 110000, Костанай, ул. А. Байтурсынова, д. 47;
ORCID: 0009-0007-7456-9901;
eLibrary SPIN: 8479-4468;
e-mail: ruslan_kravchenko_15@mail.ru

AUTHOR`S INFO

Ruslan I. Kravchenko,
PhD,
Acting Associate Professor of the Agricultural Technology and Transport Department;
address: 47 Baitursynov street, 110000 Kostanay, Kazakhstan
ORCID: 0009-0007-7456-9901;
eLibrary SPIN: 8479-4468;
e-mail: ruslan_kravchenko_15@mail.ru

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-569403

Оригинальное исследование

Разработка оптимизационных математических моделей для принятия компромиссных решений по эффективности парка сельскохозяйственных мобильных энергетических средств

В.А. Зубина, Т.З. Годжаев, И.С. Малахов

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Структуризация и выбор компромиссного решения из множественного числа противоречивых критериев облегчает лицу, принимающему решение (ЛПР) на стадии проектирования определение конструктивных характеристик и взаимосвязанных с ними выходных воздействий.

Цель работы — разработка наиболее значимых критериев для решения задачи многокритериальной оптимизации эффективности парка мобильных энергетических средств (МЭС) в условиях цифровизации сельского хозяйства.

Материалы и методы. В основе анализа лежит обзор научных публикаций и других источников информации по разработке НИОКР, направленных на создание интеллектуальных транспортно-технических средств и совершенствование методического и программного обеспечения многокритериальных оптимизационных расчётов эффективности парка МЭС. В ходе настоящего исследования использованы методы научного обобщения и статистической обработки имеющихся информационных и аналитических материалов по отечественным и зарубежным источникам.

Результаты. В результате анализа были выбраны наиболее предпочтительные критерии оптимизации парка МЭС, сформирован перечень варьируемых параметров для дальнейшего решения задачи оптимизации.

Заключение. Практическая ценность настоящей работы заключается в определении главенствующих критериев оптимизации парка МЭС, с целью проведения последующих оптимизационных расчетов.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация; мобильные энергосредства; функциональные свойства, критерии качества; варьируемые параметры; принятие компромиссных решений.

Как цитировать:
Зубина В.А., Годжаев Т.З., Малахов И.С. Разработка оптимизационных математических моделей для принятия компромиссных решений по эффективности парка сельскохозяйственных мобильных энергетических средств // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 6. С. 523–529. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-569403

Рукопись получена: 29.08.2023 **Рукопись одобрена:** 01.10.2023 **Опубликована онлайн:** 15.12.2023

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2023

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-569403

Original Study Article

Development of optimization mathematical models for making compromise decisions on the efficiency of the fleet of agricultural moving power units

Valeria A. Zubina, Teymur Z. Godzhaev, Ivan S. Malakhov

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Structurization and selection of a compromise solution from a multiple number of contradictory criteria facilitates the decision-maker (DM) to determine the design characteristics and output impacts related to them at the design stage.

AIM: Determination of the most significant criteria for solving the optimization problem using the software and hardware system of multi-criteria optimization in terms of the efficiency of the MPU fleet for the selection of a compromise decision by the decision-maker.

METHODS: The analysis is based on the collection of scientific papers, scientific articles and other information sources on R&D works on the creation of intelligent transport-technical units and on the improvement of methodology and software of multi-criteria optimization analysis of efficiency of the MPU fleet. In addition, methods of scientific generalization and statistical processing of available information and analytical materials from domestic and foreign sources were used.

RESULTS: As a result of the analysis, the most preferable criteria of the MPU fleet optimization were chosen, the list of variable parameters for further solution of the optimization problem was formed.

CONCLUSIONS: The practical value lies in determining the main criteria for optimization of the MPU fleet in order to perform subsequent optimization analysis.

Keywords: multicriteria optimization; mobile energy vehicles; functional properties; quality criteria; variable parameters; making compromise decisions.

To cite this article:

Zubina VA, Godzhaev TZ, Malakhov IS. Development of optimization mathematical models for making compromise decisions on the efficiency of the fleet of agricultural moving power units. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2023;90(6):523–529. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-569403

Received: 29.08.2023 **Accepted:** 01.10.2023 **Published online:** 15.12.2023

The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International license
© Eco-Vector, 2023

ВВЕДЕНИЕ

При формировании оптимального по составу и по количеству парка МЭС очень сложно определить единую целевую функцию, т.е. математическую модель, характеризующую эффективность парка МЭС, которая учитывала бы все выбранные критерии оптимизации парка МЭС. Последнее обстоятельство связано с тем, что каждый критерий представляет собой отдельные функции, зачастую являющимися противоречивыми и зависящими от различных варьируемых параметров (факторов). В условиях эксплуатации МЭС могут возникать различные приоритеты для выбора критериев качества, затрудняющие разработку единой целевой функции для оптимизации. Поэтому, подобные задачи необходимо решать в многокритериальной постановке. В рамках указанных многокритериальных оптимизационных расчетов в качестве критериев, характеризующих эффективность парка МЭС, выбрались основные функциональные и эксплуатационные показатели парка.

Цель исследования — разработка наиболее значимых критериев для решения задачи многокритериальной оптимизации эффективности парка МЭС в условиях цифровизации сельского хозяйства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основание для постановки и решения задачи оптимизации составили научные публикации об экономических и функциональных показателях эксплуатации МЭС, а также информация о разработке НИОКР по созданию мобильных средств сельскохозяйственного назначения. В работе применялись методы теории оптимизации, теория принятия решений, математического моделирования, теория трактора, программирования. Кроме того, использовались методы научного обобщения и статистической обработки имеющихся информационных и аналитических материалов по отечественным и зарубежным источникам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время в условиях цифровизации сельского хозяйства была установлена основная задача выявить и подобрать такой общий критерий или систему критериев, объединяющую все наиболее важные функциональные, производственно-экономические и эксплуатационные показатели парка МЭС, отражающие полную его работу и позволяющие достоверно оценить эффективность всего парка МЭС [1–6].

Для полноценной корректной постановки задачи необходимо было включить все 25 критериев, но было принято решение ограничиться 67.

Основными аргументами при выборе данных критериев были следующие:

1. По мнению ЛПР 5 выбранных критериев наиболее значимы для оценки эффективности парка МЭС в целом.
2. Оставшиеся 17 критериев очень сильно коррелируются с выбранными нами 7 критериями, поэтому согласно алгоритму постановки решения задачи многокритериальной оптимизации (МКО) можно без ущерба и без серьезных потерь рассмотреть для решения оптимизационной задачи эти перечисленные критерии.
3. Выбранные нами 5 критериев доминируют над остальными. Их исследование достаточно для того, чтобы достоверно оценить эффективность парка МЭС.

Таким образом, исходя из значимости перечисленных 25 характеристик парка МЭС, нами выбраны следующие основные критерии для включения в многокритериальную постановку задачи оптимизации, универсальные математические модели которых представлены ниже [2, 4–11]:

- критерий минимизации потерь сельскохозяйственной продукции;
- критерий максимальной производительности;
- критерий максимального коэффициента надежности парка МЭС;
- критерий минимизация средней стоимости эксплуатации техники за единицу времени;
- критерий максимального КПД парка МЭС.

Согласно анализу решения подобных задач в других отраслях промышленности, нами была установлена следующая постановка решения многокритериальной задачи для принятия компромиссных решений по эффективности парка сельскохозяйственных МЭС (рис. 1).

С учетом выбранных нами доминирующих критериев, общая постановка задачи многокритериального обоснования эффективности парка МЭС имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} F_1(x_1, x_2, ..., x_n) = W \\ F_2(x_1, x_2, ..., x_n) = k_{\text{над}} \\ F_3(x_1, x_2, ..., x_n) = C_{\text{ср}} \\ F_4(x_1, x_2, ..., x_n) = \Pi \\ F_5(x_1, x_2, ..., x_n) = З_{\text{сум}} \end{bmatrix} \Rightarrow \text{opt}$$

(Паретовское множество вариантов).

где F — критерия качества, $x_1, x_2, ..., x_n$ — варьируемые параметры.

В данной задаче главной целью является поиск Паретовского множества. Паретовское множество — это точки, где значения всех критериев качества нельзя улучшить одновременно по всем критериям, не ухудшив хотя бы одно из них [8, 9].

В дальнейшем были разработаны математические модели указанных 5 критериев, которые приведены в табл. 1 [2, 10–13]. Коэффициент весомости для всех критериев принят равным к 1.

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-569403

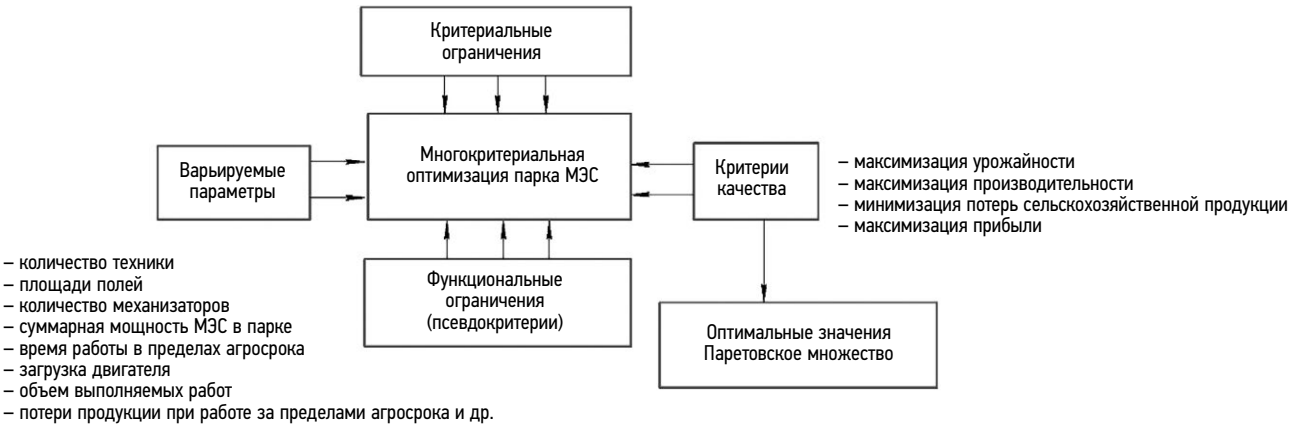

Рис. 1. Постановка задачи многокритериальной оптимизации эффективности парка МЭС.
Fig. 1. Formulation of the multi-criteria optimization problem of efficiency of the MPU fleet.

Таблица 1. Математические модели критериев качества, характеризующих эффективность парка МЭС
Table 1. Mathematical models of quality criteria describing efficiency of the MPU fleet

Критерий качества	Математическая модель
F_1 — Производительность	$W = 0{,}1 \cdot B_к \cdot V_р \cdot \tau_{эксп}$ га/ч
F_2 — Коэффициент надежности парка МЭС	$k_{над} = \frac{(K_{ср} - K_{i-1})}{K_t} \cdot 100\%$
F_3 — Средняя стоимость эксплуатации техники за единицу времени	$C_{ср} = C_Т + C_{рем} + C_{аморт} + C_{доп} + C_{аренды}$ руб./ч
F_4 — Потери сельскохозяйственной продукции	$П = \frac{U_{нач} - U_{кон}}{U_{нач}}$ руб.
F_5 — Суммарные затраты на проведение работы	$З_{сум} = \frac{\sum i(E_н + ae) \cdot Б_е \cdot k_n}{w_{ij} \cdot t_i \cdot k_{см} \cdot k_{им} \cdot T_i} + П_у$ руб.

Критерий максимальной производительности ориентирован на максимизацию производительности тракторов. В расчет включаются такие факторы, как скорость работы, тяговое усилие, мощность двигателя и другие технические характеристики. Для этого необходимо рассчитать производительность каждого трактора (например, площадь, которую он может обработать за единицу времени) и определить среднюю производительность для всего парка. Затем можно проанализировать, как изменение состава парка (добавление или удаление тракторов) влияет на эту производительность.

Формула расчета максимальной чистой производительности одного трактора (например, площадь, которую он может обработать за единицу времени) может быть представлена следующим образом:

$$W_{max} = \frac{S}{t} \text{ га/ч}, \quad (1)$$

где S — площадь (гектары), которую может обработать трактор за заданное время; t — время (часы), необходимое для выполнения заданной площади обработки.

Для оптимизации критерия максимальной производительности необходимо рассчитать производительность каждого трактора в парке и определить среднюю производительность для всего парка. Затем можно проанализировать, как изменение состава парка (добавление или удаление тракторов) влияет на эту производительность.

$$F_1 = W = 0{,}1 \cdot B_к \cdot V_р \cdot \tau_{эксп} \text{ га/ч}, \quad (2)$$

здесь $B_к$ — конструктивная ширина захвата сельхозмашин, м; $V_р$ — скорость трактора в составе МТА при выполнении работы, км/ч; $\tau_{эксп}$ — коэффициент использования эксплуатационного времени $(\tau_{см} = 1)$.

Целью применения ***критерия максимизации коэффициента надежности парка МЭС*** является максимизация надежности и долговечности тракторов. В расчет включаются такие факторы, как степень износа, частота поломок и ремонтов, срок службы.

Формула расчета критерия максимальной надежности тракторов может быть представлена следующим образом через коэффициент надежности тракторов:

$$F_2 = k_{\text{над}} = \frac{N_{\text{нач}} - N_{\text{уб}}}{N_{\text{нач}}} \cdot 100\%, \qquad (3)$$

где $N_{\text{нач}}$ — количество МЭС в начале периода наблюдения, шт.; $N_{\text{уб}}$ — количество тракторов, вышедших из строя в течение периода наблюдения, шт.

Формула (3) позволяет определить коэффициент надежности совокупности МЭС в парке.

Для того, чтобы рассчитать затраты на эксплуатацию каждого трактора (топливо, масла, ремонт, амортизация и т.д.) и определить среднюю стоимость эксплуатации на единицу времени для всего парка нами был выбран ***критерий минимизации средней стоимости эксплуатации тракторов за единицу времени***.

Проанализируем теперь, как изменение состава парка МЭС влияет на стоимость.

$$F_3 = C_{\text{ср}} = C_{\text{Т}} + C_{\text{рем}} + C_{\text{аморт}} + C_{\text{доп}} + C_{\text{аренды}} \text{ руб/ч}, \qquad (4)$$

где $C_{\text{Т}}$ — стоимость топлива за единицу времени, руб/ч; $C_{\text{рем}}$ — стоимость ремонта и обслуживания за единицу времени, руб/ч; $C_{\text{аморт}}$ —– стоимость использования трактора (амортизация) за единицу времени, руб/ч; $C_{\text{доп}}$ — стоимость дополнительных материалов и расходных материалов за единицу времени, руб/ч; $C_{\text{аренды}}$ — стоимость аренды, страховки, налогов и других затрат за единицу времени, руб/ч.

Без учета потерь сельскохозяйственной продукции в настоящее время в условиях цифровизации невозможно спрогнозировать эффективный парк МЭС, потому следующим критерием нами был выбран ***критерий минимизации потерь сельскохозяйственной продукции***. Критерий ориентирован на максимальное сохранение качества и количества собранной продукции. Для этого необходимо рассчитать потери сельскохозяйственной продукции на каждом этапе ее обработки и сбора, такие как потери при транспортировке, уборке, сушке, хранении и т.д. Затем можно проанализировать, какие изменения в процессе сбора и обработки продукции могут помочь минимизировать потери.

Формула расчета потерь сельскохозяйственной продукции может выглядеть следующим образом:

$$F_4 = \Pi = \frac{U_{\text{нач}} - U_{\text{кон}}}{U_{\text{нач}}} \text{ руб}, \qquad (5)$$

где $U_{\text{нач}}$ — объем продукции, полученной после сбора урожая; $U_{\text{кон}}$ — объем продукции, который может быть реализован на рынке или использован на хозяйстве.

Для минимизации потерь сельскохозяйственной продукции также может быть полезным рассчет показателей эффективности на каждом этапе обработки продукции и определение наиболее уязвимых моментов в процессе, где потери могут быть сокращены.

Суммарные затраты на проведение работы в рублях на 1 га — $З_{\text{сум}}$ можно вычислить по формуле:

$$F_5 = З_{\text{сум}} = \frac{\sum i(E_{\text{н}} + ae) \cdot Б_{\text{с}} \cdot k_n}{w_{ij} \cdot t_i \cdot k_{\text{см}} \cdot k_{\text{им}} \cdot T_i} + \Pi_{\text{у}} \text{ руб}, \qquad (6)$$

где $E_{\text{н}}$ — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений; i — количество тракторов в парке, шт.; ae — норматив годовых отчислений на реновацию e машины и трактора; $Б_{\text{с}}$ — балансовая стоимость машины и трактора; k_n — коэффициент использования машины и трактора на работе относительно ее годовой загрузки на всех работах, т.е. отношение времени использования трактора на i-ой работе к суммарному времени; w_{ij} — производительность j-го агрегата за час эксплуатационного времени; t_i — продолжительность смены; $k_{\text{см}}$ — смежность работы; $k_{\text{им}}$ — коэффициент использования календарного времени по метеоусловиям при выполнении i-ой работы; T_i — продолжительность выполнения i-ой работы (количество календарных дней); $\Pi_{\text{у}}$ — стоимость потерь (недобора урожая), соответствующая определённой продолжительности проведения полевых работ.

Для проведения дальнейших оптимизационных расчетов в исследуемом пространстве параметров сформирован перечень варьируемых параметров, который включает около 30 наименований: конструктивная ширина захвата агрегатируемой сельхозмашины, скорость трактора в составе МТА при выполнении работы, балансовая стоимость машины и трактора и другие параметры. Диапазоны изменения варьируемых эксплуатационных параметров МЭС выбирались с учетом реальных условий эксплуатации МЭС — существующих показателей сельскохозяйственных организаций Центральной Нечерноземной зоны России.

По результатам проведенных пробных оптимизационных расчетов получены допустимые и Паретовские модели, т.е. наиболее лучшие варианты значений критериев качества для обеспечения эффективности парка МЭС. Для выбранного нами модельного хозяйства среди 5 Паретовских моделей лицо принимающее решение (ЛПР) выбрал следующий предпочтительный вариант (точку) со значениями критериев: производительность 30 га/ч; потери сельскохозяйственной продукции 763 ц; суммарные затраты 1,135 тыс. рублей; коэффициент надежности парка МЭС 0,88; средняя стоимость эксплуатации техники. 674 тыс. руб.

Согласно многокритериальной постановке задачи и предпочтений ЛПР для принятия компромиссных решений по эффективности парка сельскохозяйственных МЭС выбранные и усовершенствованные математические

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-569403

модели, и диапазоны изменения варьируемых параметров играют ключевую роль.

ВЫВОДЫ

Исходя из значимости рассматриваемых всех 25 характеристик парка МЭС, были выбраны следующие наиболее значимые критерии для включения в многокритериальную постановку задачи оптимизации эффективности парка МЭС: минимизация потерь сельскохозяйственной продукции; максимальная производительность; максимальный коэффициент надежности парка МЭС; минимизация средней стоимости эксплуатации техники за единицу времени; минимальные суммарные затраты на проведение работы в рублях. Разработаны и усовершенствованы математические модели критериев качества, входящие в постановку задачи и зависящие от многих варьируемых параметров. Сформирован перечень варьируемых параметров, в количестве около 30 наименований, а также диапазон их варьирования для принятия компромиссных решений по эффективности парка МЭС на примере модельного хозяйства Центральной Нечерноземной зоны РФ. При формировании постановки и решения задачи многокритериальной оценки эффективности парка МЭС, разработанные математические и программные обеспечения позволяют ЛПР принимать компромиссное решение.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. В.А Зубина. — постановка задачи, разработка математических моделей функциональных характеристик МЭС, подготовка ввденеия и выводов; Т.З. Годжаев — разработка математических моделей экономиеских критериев качества МЭС, оптимизационных моделей, формирование перечня варьируемых параметров; И.С. Малахов — выполнение расчета компромиссных решений на примерах модельных хозяйств, оформление иллюстраций. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).
Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.
Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. V.A. Zubina — formulation of the problem, development of mathematical models of the functional characteristics of the MPU fleet, preparation of introductions and conclusions; T.Z. Godzhaev — development of mathematical models of economic criteria for the quality of the MPU, optimization models, formation of a list of variable parameters; I.S. Malakhov — calculation of compromise solutions using examples of model farms, design of illustrations. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.
Competing of interests. The authors declares the absence of obvious and potential conflicts of interest.
Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Годжаев З.А., Фараджев Ф.А., Матвеев Е.А. Надеждин В.С. Перспективные методы проектирования несущих систем автотранспортных средств с учетом многих критериев // Технология колесных и гусеничных машин. 2012. № 3. С. 18–24. EDN: PDVCLR
2. Годжаев З.А., Сергеев В.Н., Фараджев Ф.А. Многокритериальный выбор эффективной конструкции рамы // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2006. Т. 73, № 3. С. 20–24. EDN: KWPMXR
3. Карпенко А.П., Федорук В.Г. Обзор программных систем многокритериальной оптимизации. Отечественные системы // Информационные технологии. 2008. № 1. С. 15–22. EDN: KFPWDJ
4. Годжаев З.А., Лавров А.В., Шевцов В.Г., Зубина В.А. О методике оценки уровня локализации производства сельскохозяйственных тракторов // Тракторы и сельхозмашины. 2020. Т. 87, №5. С. 18–24. EDN: JAZNGW doi: 10.31992/0321-4443-2020-5-18-24
5. Шевцов В.Г., Лавров А.В., Зубина В.А., Гурылев Г.С. Принципиальные признаки суженного типа воспроизводства в сельском хозяйстве // Научно-техническое обеспечение АПК Сибири. Материалы Международной научно-технической конференции. Краснообск: СФНЦА РАН, 2017. С. 235–241.
6. Скороходов А.Н. Методы повышения надежности и эффективности агрегатов и технологических комплексов: Практикум. М.: МГАУ, 2003.
7. Зубина В.А. Обзор и анализ методов оптимизации и компьютерных программ для повышения эффективности МТП // Вестник аграрной науки Дона. 2018. № 1(41). С. 26–32. EDN: YWEECM
8. Шевцов В.Г., Годжаев З.А., Лавров А.В. и др. Методика определения оптимального состава тракторного парка в условиях нарушенного воспроизводства ресурсов // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2016. №4. С. 9–14. EDN: WLZXPN
9. Скороходов А.Н., Левшин А.Г. Производственная эксплуатация машинно-тракторного парка. М.: БИБКОМ, 2017. EDN: WWONWA
10. Statnikov R., Matusov J., Statnikov A. Multicriteria Engineering Optimization Problems: Statement, Solution and Applications //

Journal of Optimization Theory and Applications. 2012. Vol. 155, N. 2. P. 355–375. EDN: SPBSOD doi: 10.1007/s10957-012-0083-9
11. Соболь И.М., Статников Р.Б., Соболь И.М. и др. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями: учеб. пособие. Москва: Дрофа, 2006. EDN: QJQRCT
12. Годжаев Т.З., Зубина В.А., Малахов И.С. Обоснование функциональных характеристик сельскохозяйственных мобильных энергосредств в многокритериальной постановке // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 6. С. 411–420. EDN: XTFDEB doi: 10.17816/0321-4443-121325
13. Лавров А.В., Зубина В.А. Систематизация элементов автоматизации, применяемых в сельском хозяйстве // Аграрный научный журнал. 2021. № 4. С. 94–97. EDN: FWMCBI doi: 10.28983/asj.y2021i4pp94-97

REFERENCES

1. Godzhaev Z.A, Faradzhev F.A, Matveev E.A, et al. Promising methods for designing load-bearing systems of automobile vehicles, taking into account many used means. *Tekhnologiya kolesnykh i gusenichnykh mashin.* 2012;3:18–24. (In Russ). EDN PDVCLR
2. Godzhaev Z.A, Sergeev V.N, Faradzhev F.A. Multi-criteria selection of efficient frame design. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2006;73(3):20–24. (In Russ). EDN: KWPMXR
3. Karpenko A.P, Fedoruk V.G. Review of software systems for multicriteria optimization. Domestic systems. *Informatsionnye tekhnologii.* 2008;1:15–22. (In Russ). EDN: KFPWDJ
4. Godzhaev Z.A, Lavrov A.V, Shevtsov V.G, et al. The methodology for assessing the level of localization of agricultural tractors production. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2020;87(5):18–24. (In Russ). EDN: JAZNGW doi: 10.31992/0321-4443-2020-5-18-24
5. Shevtsov V.G, Lavrov A.V, Zubina V.A, et al. Fundamental features of a narrowed type of reproduction in agriculture. *Scientific and technical support of the agro-industrial complex of Siberia. Materials of the International Scientific and Technical Conference.* Krasnoobsk: SFNTsA RAN; 2017:235–241. (In Russ).
6. Skorokhodov A.N. *Methods for increasing the reliability and efficiency of units and technological complexes. Workshop.* Moscow: MGAU; 2003. (In Russ).
7. Zubina V.A. Review and analysis of optimization methods and computer programs for increasing the efficiency of MTP. *Vestnik agrarnoy nauki Dona.* 2018;1(41):26–32. (In Russ). EDN: YWEECM
8. Shevtsov V.G, Godzhaev Z.A, Lavrov A.V, et al. Methodology for determining the optimal composition of the tractor fleet in conditions of disrupted reproduction of resources. *Selskokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii.* 2016;4:9–14. (In Russ). EDN: WLZXPN
9. Skorokhodov A.N, Levshin A.G. *Production operation of the machine and tractor fleet.* Moscow: BIBKOM; 2017. (In Russ). EDN: WWONWA
10. Statnikov R, Matusov J, Statnikov A. Multicriteria Engineering Optimization Problems: Statement, Solution and Applications. *Journal of Optimization Theory and Applications.* 2012;155(2):355–375. EDN: SPBSOD doi: 10.1007/s10957-012-0083-9
11. Sobol IM, Statnikov RB, Sobol IM. et al. *Selection of optimal parameters in problems with many criteria: textbook. allowance.* Moscow: Drofa; 2006. (In Russ). EDN: QJQRCT
12. Godzhaev TZ, Zubina VA, Malakhov IS. The justification of functional properties of agricultural moving power units in the multi-objective scenario. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2022;89(6):411–420. (In Russ). EDN: XTFDEB doi: 10.17816/0321-4443-121325
13. Lavrov AV, Zubina VA. Systematization of automation elements used in agriculture. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal.* 2021;4:94–97. (In Russ). EDN: FWMCBI doi: 10.28983/asj.y2021i4pp94-97

ОБ АВТОРАХ

*** Зубина Валерия Александровна,**
канд. техн. наук,
старший научный сотрудник лаборатории системы мобильных энергетических средств;
адрес: Российская Федерация, 109428, Москва, 1-й Институтский пр-д, д. 5;
ORCID: 0000-0002-6657-1899;
eLibrary SPIN: 3410-5062;
e-mail: lera_zubina@mail.ru

Годжаев Теймур Захидович,
заведующий сектором моделирования и оптимизации МЭС;
ORCID: 0000-0002-4496-0711;
eLibrary SPIN: 1892-8405;
e-mail: tgodzhaev95@yandex.ru

Малахов Иван Сергеевич,
младший научный сотрудник сектора моделирования и оптимизации МЭС;
ORCID: 0000-0001-8162-7718;
eLibrary SPIN: 7067-6972;
e-mail: malakhovivan2008@mail.ru

AUTHORS' INFO

*** Valeria A. Zubina,**
Cand. Sci. (Engineering),
Senior Researcher of the Laboratory of Moving Power Units;
adress: 5 1st Institutsky proezd, 109428 Moscow, Russian Federation;
ORCID: 0000-0002-6657-1899;
eLibrary SPIN: 3410-5062;
e-mail: lera_zubina@mail.ru

Teymur Z. Godzhaev,
Head of the Sector of Modeling and Optimization of Moving Power Units;
ORCID: 0000-0002-4496-0711;
eLibrary SPIN: 1892-8405;
e-mail: tgodzhaev95@yandex.ru

Ivan S. Malakhov,
Junior Researcher of the Sector Modeling and Optimization of Moving Power Units;
ORCID: 0000-0001-8162-7718;
eLibrary SPIN: 7067-6972;
e-mail: malakhovivan2008@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-569416

Оригинальное исследование

Законы управления индивидуальным тяговым электроприводом фронтального погрузчика

В.А. Гартфельдер[1], А.А. Стадухин[2], Н.А. Мокрецов[2]

[1] Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, Чебоксары, Российская Федерация;
[2] Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Работа технологических машин сопряжена с постоянным буксованием ведущих колёс, что может привести к повышенному износу шин и повреждению почвы. Это обуславливает актуальность исследований, направленных на изучение и уменьшение буксования.

Цель работы — анализ рассматриваемых стратегий управления индивидуальным тяговым электроприводом фронтального погрузчика с точки зрения буксования ведущих колёс.

Материалы и методы. В статье рассмотрены три стратегии управления индивидуальным тяговым электроприводом фронтального погрузчика: исходная, с одинаковыми степенями использования электродвигателей колес (стратегия 1), имитация блокированного привода (стратегия 2), а также предложен вариант организации противобуксовочной системы (стратегия 3). С использованием имитационной компьютерной модели динамики был исследован рабочий процесс фронтального погрузчика при выполнении бульдозерных операций и при разгоне.

Результаты. Получено, что при бульдозировании применение стратегии 2 позволяет обеспечить практически одинаковый коэффициент буксования ведущих колес, что потенциально позволяет уменьшить износ шин и расход топлива (по сравнению со стратегией 1). Применение стратегии 3 в таких условиях оказалось нецелесообразно, так как ограничение буксования в данном случае ограничит и скорость выполнения операции. Моделирование процесса разгона фронтального погрузчика продемонстрировало некоторое преимущество стратегии 3 перед остальными по затраченной энергии.

Заключение. По результатам исследования определено, что при выполнении фронтальным погрузчиком тяжелых технологических операций, таких как бульдозирование, рационально использовать стратегию управления 2, которая имитирует блокированную трансмиссию. В случае процесса разгона, который характерен для выполнения транспортных операций и движения по дорогам общего пользования, эффективно использование стратегии 3.

Ключевые слова: фронтальный погрузчик; индивидуальный привод; закон управления; блокированный привод; противобуксовочная система.

Как цитировать:
Гартфельдер В.А., Стадухин А.А., Мокрецов Н.А. Законы управления индивидуальным тяговым электроприводом фронтального погрузчика // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 6. С. 531–541. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-569416

Рукопись получена: 07.09.2023 **Рукопись одобрена:** 10.11.2023 **Опубликована онлайн:** 06.12.2023

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2023

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-569416

Original Study Article

Control laws for individual traction electric drive of a front loader

Viktor A. Gartfelder[1], Anton A. Stadukhin[2], Nikolay A. Mokretsov[2]

[1] Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary, Russian Federation;
[2] Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: The operation of technological machinery is associated with regular slipping of driving wheels, which can lead to increased tire wear and soil damage. This determines the relevance of works aimed at study and reduction of slip.

AIM: Analysis of the considered control strategies of individual traction electric drive of a front loader with regard to driving wheels slipping.

METHODS: The paper considers three control strategies of individual traction electric drive of a front loader — initial, with equal utilization rates of electric motor-wheels (strategy 1), simulation of locked drive (strategy 2), and the proposed option of building traction control system (strategy 3). Using a simulation computer model of dynamics, the working process of the front loader was studied during earthmoving operations and when accelerating.

RESULTS: It was obtained that the application of the strategy 2 during earthmoving helps to ensure almost the equal slip coefficient of the driving wheels, which potentially helps to reduce tire wear and fuel consumption (in comparison to the strategy 1). The application of the strategy 3 in such conditions turned out to be unsuitable, as the slip limitation in this case reduces the operation speed as well. The simulation of the front loader acceleration process showed some advantage of strategy 3 over the others in terms of energy consumed.

CONCLUSIONS: According to the results of the study, it is reasonable to use the control strategy 2, which simulates a locked transmission, in case of performing heavy technological operations by a front loader such as earthmoving. In the case of the acceleration process, typical for transportation operations and driving on public roads, it is effective to use the strategy 3.

Keywords: front loader; individual drive; control law; locked drive; traction control system.

To cite this article:
Gartfelder VA, Stadukhin AA, Mokretsov NA. Control laws for individual traction electric drive of a front loader. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2023;90(6):531–541. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-569416

Received: 07.09.2023 **Accepted:** 10.11.2023 **Published online:** 06.12.2023

The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International license
© Eco-Vector, 2023

ВВЕДЕНИЕ

Колесные фронтальные погрузчики (ФП) способны эффективно перемещаться по дорогам с твердым покрытием. Однако, технологические операции (погрузка или бульдозирование) такие машины осуществляют в более сложных условиях: на разбитом или заснеженном природном грунте и на строительных площадках. По этой причине ФП должны сочетать сравнительно высокую скорость на асфальте с хорошей проходимостью и управляемостью на слабонесущем грунте.

В работах [1, 2] были рассмотрены вопросы выбора параметров и оценки энергоэффективности электромеханической трансмиссии ФП. Однако, расходы на эксплуатацию подобных машин характеризуются не только режимами работы двигателя внутреннего сгорания и трансмиссии, но также потерями на буксование и сопровождающим их повышенным износом шин и повреждением почвы. Оценка буксования транспортно-технологической машины является широко разработанной задачей, но до сих пор привлекает внимание исследователей [3, 4]. Также активно исследуются подходы и алгоритмы управления машиной, позволяющие ограничить буксование при выполнении технологических операций [5].

У ФП с индивидуальным электромеханическим приводом ведущих колес существует возможность достаточно гибко управлять распределением тяги, что следует использовать для получения дополнительных преимуществ при эксплуатации.

Так, возможна имитация дифференциальной механической трансмиссии, при которой к каждому из ведущих колёс будет приложен одинаковый крутящий момент, независимо от скорости вращения колеса. Следует отметить, что такая стратегия управления при тяжелых технологических операциях неэффективна, также, как и механическая дифференциальная трансмиссия, которая на фронтальных погрузчиках обычно имеет какой-либо способ блокировки. Вместо этого предлагается использовать стратегию управления, когда крутящий момент уменьшается при увеличении скорости ведущего колеса, которая должна быть менее склонна к избыточному буксованию.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является анализ рассматриваемых стратегий управления индивидуальным тяговым электроприводом ФП с точки зрения буксования ведущих колёс при прямолинейном движении.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования буксования ФП в зависимости от закона управления индивидуальным тяговым электроприводом предлагаются три стратегии управления.

Стратегия 1 предполагает уменьшение крутящего момента на каждом колесе при увеличении скорости его вращения и обеспечивается одинаковыми степенями использования всех электродвигателей, соответствующими уровню нажатия водителем на педаль акселератора, то есть:

$$h_{\text{ЭД}i} = h_{\text{в}},$$

где $h_{\text{ЭД}i}$ — степень использования i-го электродвигателя; $h_{\text{в}}$ — управляющее воздействие со стороны водителя (нажатие педали акселератора).

Реакция двигателя на управляющее воздействие, независимо от стратегии управления, моделируется следующим образом:

$$M_{\text{ЭД}i}\left(\omega_{\text{ЭД}i}, h_{\text{ЭД}i}\right) = \begin{cases} M_{\text{ЭД}}^{\max} \cdot h_{\text{ЭД}i}, \text{ если } \omega_{\text{ЭД}i} < \dfrac{N_{\text{ЭД}}^{\max}}{M_{\text{ЭД}}^{\max}}; \\ \dfrac{M_{\text{ЭД}}^{\max} \cdot h_{\text{ЭД}i}}{\omega_{\text{ЭД}i}}, \text{ если } \omega_{\text{ЭД}i} \geq \dfrac{N_{\text{ЭД}}^{\max}}{M_{\text{ЭД}}^{\max}} \text{ и } \omega_{\text{ЭД}i} < \omega_{\text{ЭД}}^{\max}; \\ 0, \text{ если } \omega_{\text{ЭД}i} \geq \omega_{\text{ЭД}}^{\max}, \end{cases}$$

где $M_{\text{ЭД}i}\left(\omega_{\text{ЭД}i}, h_{\text{ЭД}i}\right)$ — текущий крутящий момент i-го электродвигателя; $\omega_{\text{ЭД}i}$ — текущая угловая скорость вала i-го электродвигателя; $M_{\text{ЭД}}^{\max}$ — максимальный крутящий момент электродвигателя; $N_{\text{ЭД}}^{\max}$ — максимальная мощность электродвигателя; $\omega_{\text{ЭД}}^{\max}$ — максимальная угловая скорость вала электродвигателя.

Из вышесказанного следует, что любое изменение водителем управляющего воздействия $h_{\text{в}}$ приведет к изменению крутящего момента каждого электродвигателя. В данной работе привод, управляемый по описанной стратегии, принят за исходный.

Стратегия 2 представляет собой имитацию блокированного привода ведущих колес. Вездеходные полноприводные колесные машины с механической трансмиссией обычно имеют возможность так или иначе блокировать привод, что выражается в одинаковой угловой скорости всех ведущих колес (если ведущие колеса одинакового радиуса). Такое решение само по себе не гарантирует ограничение буксования в желаемых пределах, однако, обеспечивает естественное перераспределение тяги в зависимости от сопротивления движению каждого ведущего колеса.

Для имитации блокированного привода вычисляется медианная угловая скорость всех ведущих колёс. Медианное значение угловой скорости определяется следующим образом: производится сортировка всех угловых скоростей вращения ведущих колес (например, по возрастанию), затем берется среднее между вторым и третьим значением сортированного списка. Разности

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-569416

между найденной медианной и действительными угловыми скоростями колёс формируют ошибки e_i, на основе которых ПИ-регулятор определяет корректирующие управляющие воздействия hкi для каждого электродвигателя:

$$h_{\text{к}i} = k_P e_i + k_I \int e_i dt ,$$

где k_P — пропорциональный коэффициент ПИ-регулятора; k_I — интегральный коэффициент ПИ-регулятора.

Скорректированное управляющее воздействие $h'_{\text{Э}\text{Д}i}$ определяется следующим образом:

$$h'_{\text{Э}\text{Д}i} = h_{\text{в}} + h_{\text{к}i} .$$

Стоит отметить, что возможна ситуация, когда значение управляющего воздействия $h_{\text{в}}$ близко к единице, а одно из колёс движется в условиях с большим сопротивлением движению. В таком случае система управления будет стремиться увеличить степень использования электродвигателя, связанного с отстающим колесом, за счёт корректирующего воздействия $h_{\text{к}i}$. Однако, итоговая величина степени использования электродвигателя $h_{\text{Э}\text{Д}i}$ не может быть больше единицы. Таким образом, в этом случае корректирующее воздействие $h_{\text{к}i}$ не будет реализовано в полной мере, и электродвигатель отстающего колеса лишь незначительно увеличит крутящий момент. Это приведет к тому, что различие в угловых скоростях не сможет быть устранено и блокированный тип связи между колесами не будет сымитирован. Чтобы избежать этого явления, в рассматриваемой системе управления итоговая степень использования электродвигателей $h_{\text{Э}\text{Д}i}$ дополнительно корректируется на величину, на которую максимальное из скорректированных управляющих воздействий $h'_{\text{Э}\text{Д}i}$ превышает единицу:

$$h_{\text{Э}\text{Д}i} = h'_{\text{Э}\text{Д}i} - \left(\max\left(h'_{\text{Э}\text{Д}i}\right) - \max\left(\min\left(1,\ h'_{\text{Э}\text{Д}i}\right)\right)\right).$$

Принципиальная схема реализации стратегии 2 представлена на рис. 1.

Стратегия 3 представляет собой некоторую реализацию противобуксовочной системы (ПБС) на основе исходного привода. В данной постановке задача управления сводится к поддержанию значения коэффициента буксования колёс $S_{\text{б}i}$ не более заданного $S_{\text{б}\max}$.

Для определения коэффициентов буксования $S_{\text{б}i}$ используется следующая формула:

$$S_{\text{б}i} = \frac{\omega_{\text{к}i} - \omega_{\text{к}0i}}{\omega_{\text{к}i}},$$

где $\omega_{\text{к}i}$ — угловая скорость i-го колеса; $\omega_{\text{к}0i}$ — угловая скорость i-го колеса, соответствующая движению без проскальзывания, вычисляется по формуле:

$$\omega_{\text{к}0i} = \frac{v_{\text{к}xi}}{r_{\text{к}0}};$$

$r_{\text{к}0}$ — радиус качения колеса без скольжения; $v_{\text{к}xi}$ — оценка линейной скорости центра i-го колеса, которая вычисляется по формуле: $v_{\text{к}xi} = v_x + \omega_z \cdot y_{\text{к}i}$; v_x — оценка линейной скорости центра масс ФП; ω_z — угловая скорость поворота ФП; $y_{\text{к}i}$ — поперечная координата центра i-го колеса относительно центра масс.

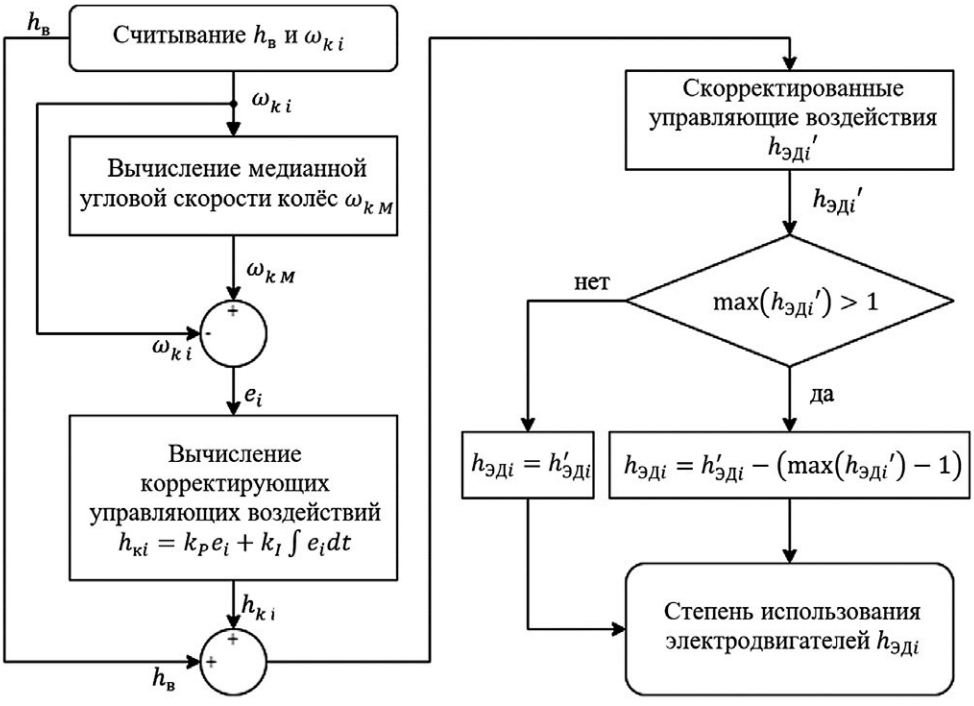

Рис. 1. Принципиальная схема управления трансмиссией по стратегии 2.
Fig. 1. Principal block diagram of transmission control according to the strategy 2.

В данной работе предполагается, что угловая скорость поворота ФП ω_z будет измеряться с помощью датчика угловых скоростей. Скорость погрузчика v_x оценивается с применением датчика ускорений, то есть с использованием интегрирования продольного ускорения корпуса машины.

Необходимо иметь ввиду, что при использовании датчика ускорений (даже идеализированного, как в данном исследовании) в результате интегрирования при оценке скорости накапливается ошибка. Это ведёт к расхождению прогнозируемой и реальной скорости движения машины и обуславливает необходимость регулярного уточнения значения скорости. Поэтому в случае малой величины задаваемой водителем степени нажатия на педаль акселератора скорость машины принимается равной кинематической. Это означает, что накопленное при интегрировании ускорения значение сбрасывается до кинематической скорости $v_{\text{кин}}$, определяемой из средней скорости вращения ведущих колес погрузчика:

$$v_x = \begin{cases} \int a_x dt, \text{ при } h_{\text{в}} > 0{,}1; \\ v_{\text{кин}} = \dfrac{\sum_i \omega_{k\,i} \cdot r_{k0}}{n}, \text{ при } h_{\text{в}} \le 0{,}1, \end{cases}$$

где a_x — продольное ускорение машины; n — общее число колёс ФП.

Принципиальная схема реализации стратегии 3 представлена на рис. 2.

В целях исследования различных стратегий управления тяговым электроприводом была составлена компьютерная имитационная модель ФП. Данная модель подробно была описана в статье [2]. Для выполнения рабочих операций в модели предусмотрена имитация управляющих действий водителя, которые определяют работу индивидуального электропривода в соответствии с выбранной стратегией. Для наглядности результатов, проводимых заездов, принимается, что силовая установка ФП полностью обеспечивает потребности тяговых электродвигателей в питании. В таком случае имеется возможность исследовать выбранные стратегии управления электроприводом вне зависимости от силовой установки и состава трансмиссии.

Оценку эффективности выбранных стратегий управления тяговым электроприводом предлагается производить по буксованию колёс, выраженному коэффициентом буксования $S_{\text{б}i}$ и по мощности буксования $N_{\text{б}i}$. Вычислять мощность буксования $N_{\text{б}i}$ предлагается следующим образом:

$$N_{\text{б}i} = R_{\text{кх}i} \cdot \left(\omega_{k\,i} \cdot r_{k0} - v'_{\text{кх}i}\right),$$

где $R_{\text{кх}i}$ — продольная составляющая реакции, действующей в пятне контакта i-го колеса в плоскости опорной поверхности; $v'_{\text{кх}i}$ — действительная линейная скорость центра i-го колеса.

Следует отметить, что необходимая для определения буксования и мощности буксования действительная линейная скорость центра колеса $v'_{\text{кх}i}$ вычисляется на основе действительной продольной скорости движения корпуса ФП, которая в реальных условиях неизвестна, но легко определяется при имитационном моделировании.

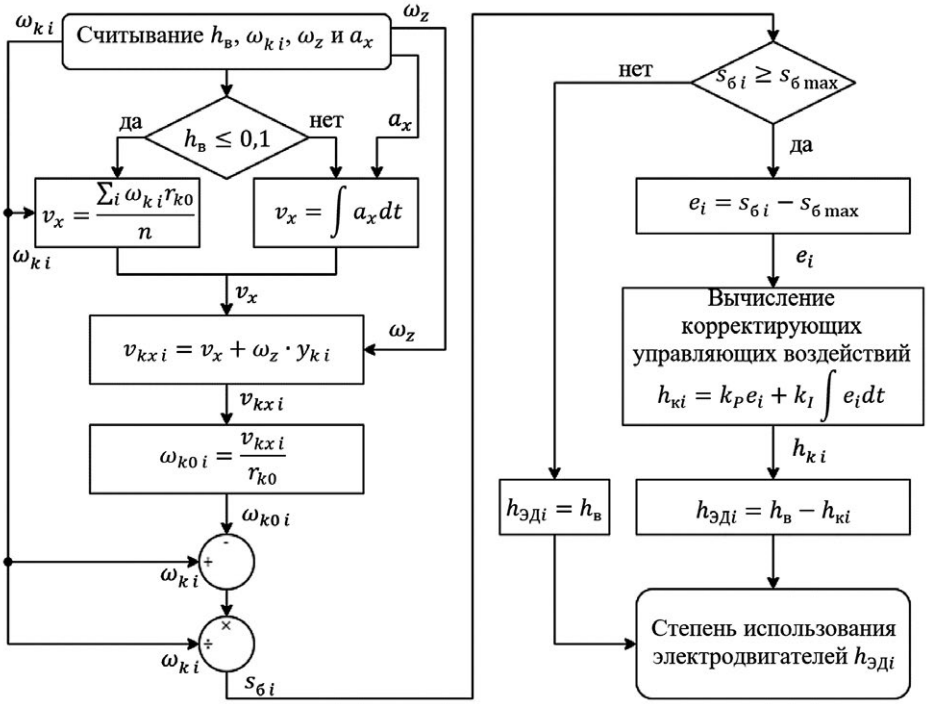

Рис. 2. Принципиальная схема управления трансмиссией по стратегии 3.
Fig. 2. Principal block diagram of transmission control according to the strategy 3.

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-569416

Имитационная модель, используемая в настоящей работе, описывает ФП с электромеханической трансмиссией. Технические характеристики исследуемого ФП представлены в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки предлагаемых стратегий управления было исследовано выполнение ФП бульдозерных операций, так как этот рабочий режим хотя и является редко встречающимся, но характеризуется высоким сопротивлением движению, и, соответственно, высоким буксованием колёс.

В рамках проведённого исследования рабочий цикл бульдозирования представляет собой заезд, состоящий из набора призмы грунта и последующего её волочения [6]. Набор призмы происходит на протяжении 5 метров пути и предполагает линейное повышение значения сопротивления движению от 0,055 до 0,505. Волочение продолжается до конца цикла и характеризуется сохранением достигнутого значения сопротивления движению. На протяжении всего рабочего цикла управляющие воздействия водителя имитируются такими, чтобы поддерживать кинематическую скорость движения ФП 1 м/с. Кинематическая скорость при этом оценивается через усреднённую скорость колёс ФП.

Помимо разной вертикальной нагрузки на переднюю и заднюю ось ФП ведущим колёсам были назначены коэффициенты сцепления с опорной поверхностью, значения которых представлены в таблице 2. Подразумевается, что борта погрузчика находятся на опорных поверхностях с различными свойствами, что может наблюдаться, например, при очистке обочины дороги.

Результаты моделирования бульдозирования ФП при реализации разных стратегий управления представлены на рис. 3–6.

Графики на рис. 3, соответствующие управлению тяговым электроприводом по стратегии 1, показывают наличие значительного буксования, так как высокая степень использования назначается в том числе и тем двигателям, колеса которых имеют слабое сцепление с опорным основанием. Энергия, затраченная на буксование всех колес за время бульдозирования при управлении по стратегии 1, составила 422 кДж.

На рис. 4, *а* видно, что коэффициенты буксования для всех колёс близки по значению, так как при стратегии управления 2 (блокированный привод) удалось обеспечить их одинаковые угловые скорости. Суммарная энергия буксования всех колёс при управлении по стратегии 2 составила 402 кДж.

Изображения на рис. 5 соответствуют режиму бульдозирования ФП при управлении по стратегии 3. Потраченная на буксование энергия составила 402 кДж. Во время

Таблица 1. Технические характеристики образца фронтального погрузчика
Table 1. Technical specification of an example of a front loader

Параметр	Значение
Грузоподъёмность погрузчика, кг	3500
Снаряжённая масса погрузчика, кг	10800
Максимальная мощность тягового электродвигателя, кВт	26
Максимальный момент тягового электродвигателя, Нм	1040
Максимальная частота вращения ротора тягового электродвигателя, об/мин	2790
Свободный радиус колеса, м	0,7
Передаточное число колёсного редуктора	19,7
Доля вертикальной нагрузки на переднюю/заднюю ось	0,48/0,52
Колея погрузчика, м	1,93

Таблица 2. Коэффициенты сцепления колёс фронтального погрузчика с опорной поверхностью во время бульдозирования
Table 2. Grip coefficients of front loader wheels with ground surface during earthmoving

Колесо	Значение
Переднее левое (колесо 1)	0,550
Переднее правое (колесо 2)	0,700
Заднее левое (колесо 3)	0,550
Заднее правое (колесо 4)	0,700

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-569416

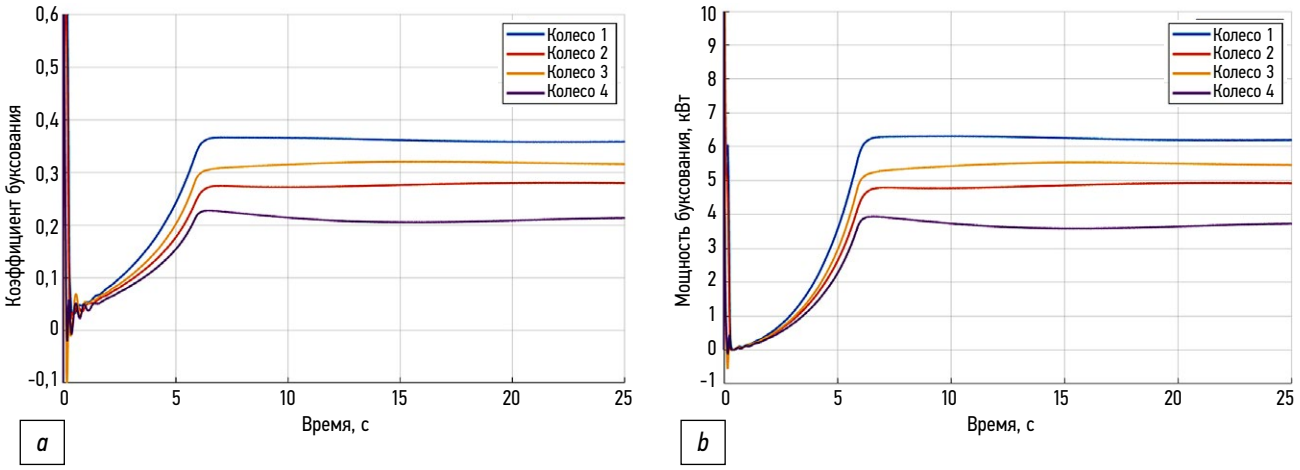

Рис. 3. Графики коэффициентов (*a*) и мощностей (*b*) буксования колёс фронтального погрузчика при выполнении бульдозирования с управлением тяговым электроприводом по стратегии 1 (исходный привод).
Fig. 3. Graphs of slip coefficient (*a*) and slip power (*b*) of front loader wheels during earthmoving with traction electric drive control according to the strategy 1 (the initial drive).

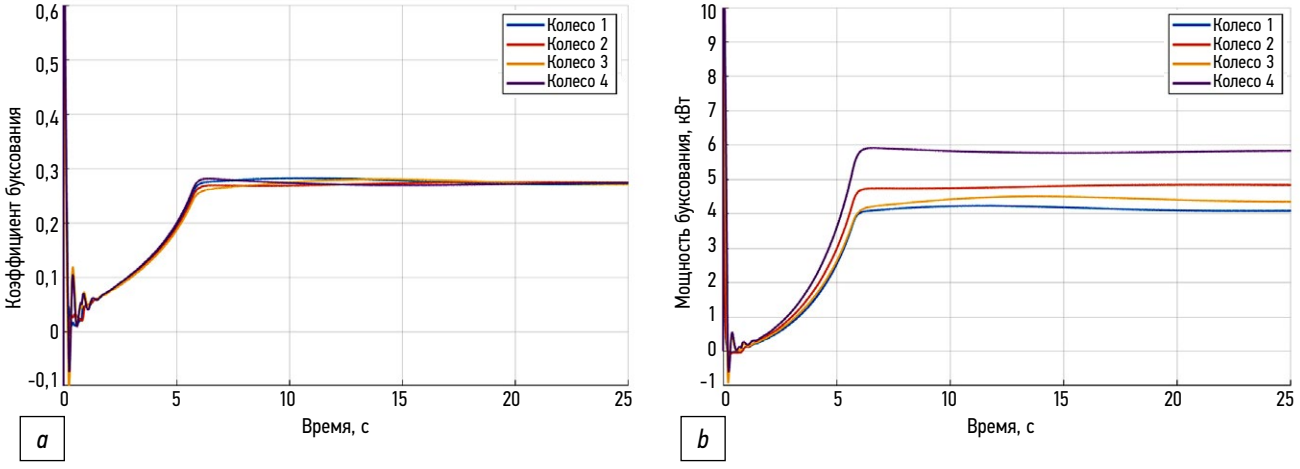

Рис. 4. Графики коэффициентов (*a*) и мощностей (*b*) буксования колёс фронтального погрузчика при выполнении бульдозирования с управлением тяговым электроприводом по стратегии 2 (имитация блокированного привода).
Fig. 4. Graphs of slip coefficient (*a*) and slip power (*b*) of front loader wheels during earthmoving with traction electric drive control according to the strategy 2 (simulation of locked drive).

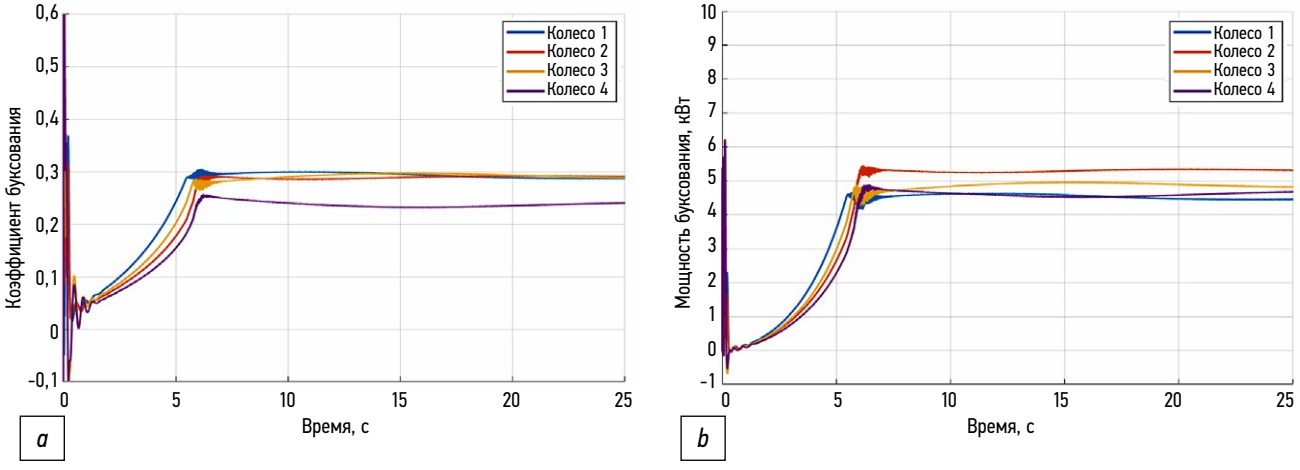

Рис. 5. Графики коэффициентов (*a*) и мощностей (*b*) буксования колёс фронтального погрузчика при выполнении бульдозирования с управлением тяговым электроприводом по стратегии 3 (исходный привод с противобуксовочной системой).
Fig. 5. Graphs of slip coefficient (*a*) and slip power (*b*) of front loader wheels during earthmoving with traction electric drive control according to the strategy 3 (the initial drive with the traction control system).

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-569416

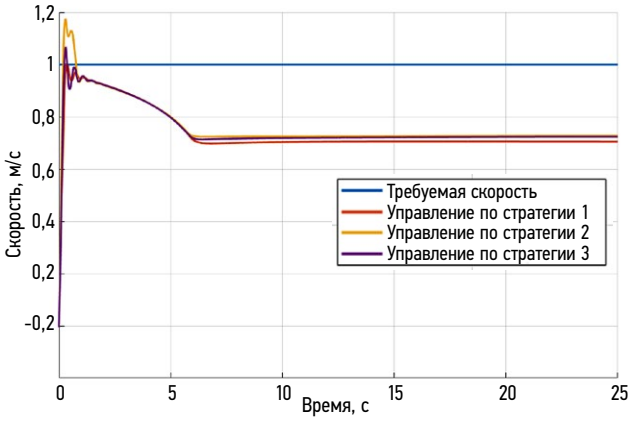

Рис. 6. Сравнение скоростей фронтального погрузчика при выполнении бульдозирования с управлением трансмиссией по различным стратегиям.
Fig. 6. Comparison of front loader velocities during earthmoving with transmission control according to various strategies.

проведения предварительных испытаний было установлено, что при задании некорректного буксования $s_{б\,max}$ при выбранных условиях работы ФП система управления препятствует развитию необходимой силы тяги. При этом было установлено, что минимальное значение $s_{б\,max}$ составляет 0,2, что, с некоторой погрешностью, было обеспечено. Из сказанного следует, что для обеспечения требуемой производительности перед началом технологической операции водителю придется подбирать значение максимального буксования в зависимости от свойств грунта, которые заранее неизвестны. Эта особенность не позволит использовать стратегию управления 3 для бульдозирования в реальных условиях. Однако, данная стратегия может быть полезной и позволит уменьшить расход топлива и износ шин в других режимах движения, например, при разгоне.

Моделирование разгона ФП включает разгон ФП с места до 15 км/ч на опорной поверхности при значениях коэффициента сопротивления движению 0,02 и коэффициента сцепления 0,4, которые одинаковы для всех колес.

Результаты моделирования разгона ФП при реализации разных стратегий представлены на рис. 7–10.

Графики показывают преимущество (меньшая максимальная мощность буксования, рис. 9, *b*) стратегии 3 над остальными. Блокированный привод (стратегия 2) имеет значительное преимущество перед стратегией 1. Энергия, затраченная на буксование всех колес за время разгона, составила для стратегии 1 — 43 кДж, для стратегии 2 — 23 кДж, для стратегии 3 — 20 кДж.

ВЫВОДЫ

В статье были рассмотрены три стратегии управления индивидуальным электроприводом ФП: исходная, характеризующаяся одинаковым управляющим воздействием электродвигателей ведущих колес (стратегия 1), имитация блокированного привода (стратегия 2) и реализация противобуксовочной системы (стратегия 3). С использованием имитационной компьютерной модели динамики ФП были исследованы такие режимы работы как выполнение бульдозерных операций и разгон. Получено, что при бульдозировании применение стратегии 2 позволяет обеспечить одинаковый коэффициент буксования ведущих колес, что потенциально позволяет уменьшить износ шин и расход топлива (по сравнению со стратегией 1). Напротив, применение стратегии 3 в таких условиях нецелесообразно, так как ограничение буксования на некотором заранее заданном уровне не позволит достичь необходимой производительности данной технологической операции — ограничение буксования в данном случае ограничит и развиваемую тягу ФП.

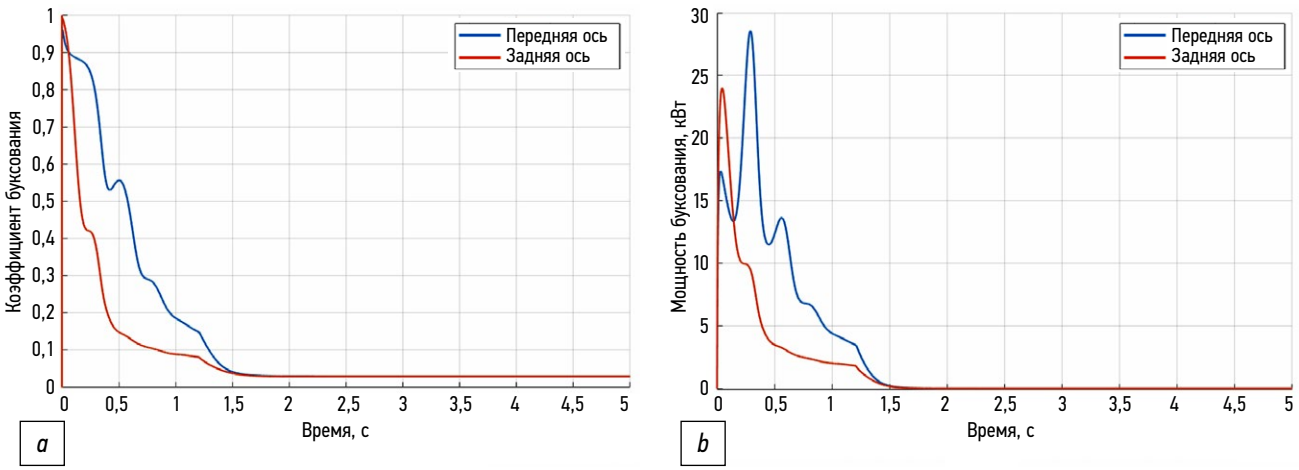

Рис. 7. Графики коэффициентов (*a*) и мощностей (*b*) буксования колёс фронтального погрузчика при разгоне с управлением тяговым электроприводом по стратегии 1 (исходный привод).
Fig. 7. Graphs of slip coefficient (*a*) and slip power (*b*) of front loader wheels during acceleration with traction electric drive control according to the strategy 1 (the initial drive).

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-569416

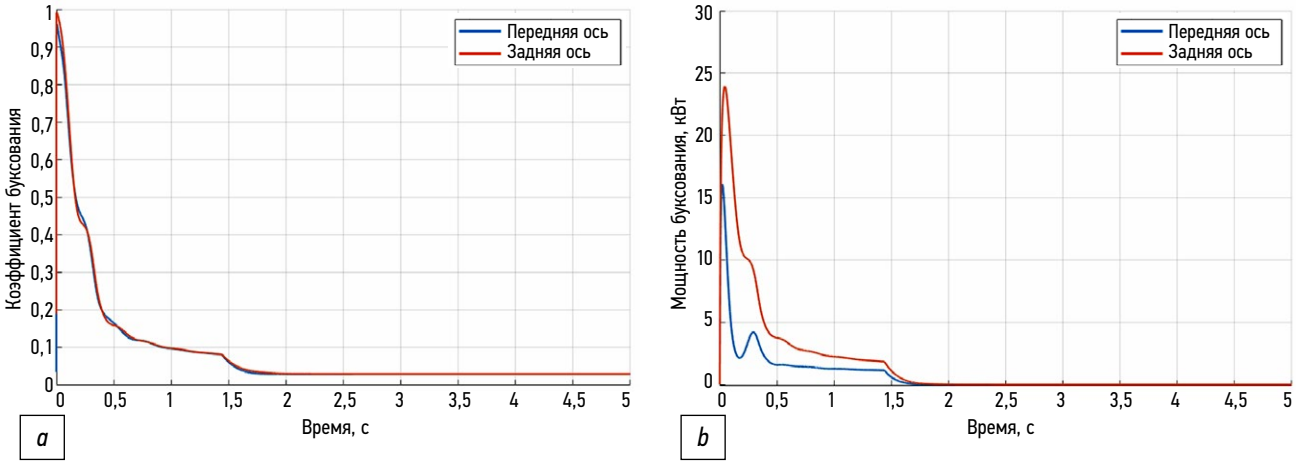

Рис. 8. Графики коэффициентов (*a*) и мощностей (*b*) буксования колёс фронтального погрузчика при разгоне с управлением тяговым электроприводом по стратегии 2 (блокированный привод).
Fig. 8. Graphs of slip coefficient (*a*) and slip power (*b*) of front loader wheels during acceleration with traction electric drive control according to the strategy 2 (simulation of locked drive).

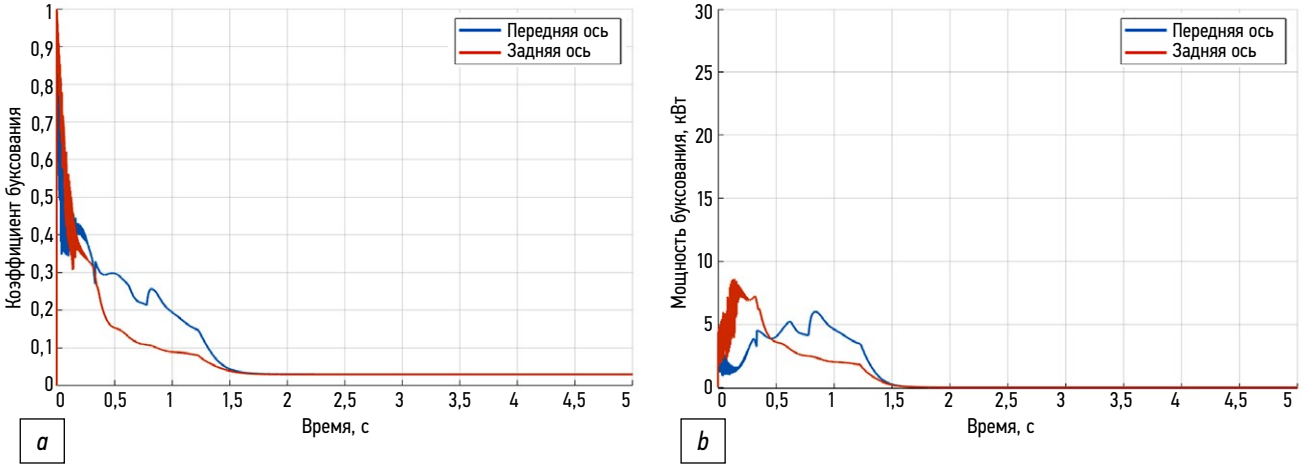

Рис. 9. Графики коэффициентов (*a*) и мощностей (*b*) буксования колёс фронтального погрузчика при разгоне с управлением тяговым электроприводом по стратегии 3 (исходный привод с противобуксовочной системой).
Fig. 9. Graphs of slip coefficient (*a*) and slip power (*b*) of front loader wheels during acceleration with traction electric drive control according to the strategy 3 (the initial drive with the traction control system).

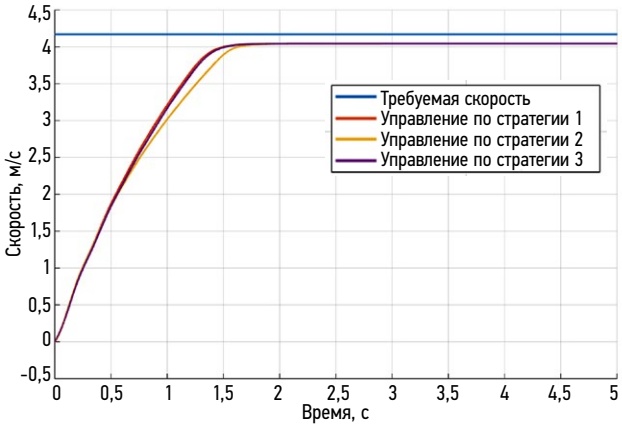

Рис. 10. Сравнение скоростей фронтального погрузчика при разгоне с управлением трансмиссией по различным стратегиям.
Fig. 10. Comparison of front loader velocities during acceleration with transmission control according to various strategies.

Моделирование процесса разгона ФП продемонстрировало эффективность стратегий 2 и 3 с некоторым преимуществом стратегии 3 (до 15% меньшая затраченная энергия по сравнению со стратегией 2).

Таким образом, можно заключить, что при тяжелых технологических операциях, таких как бульдозирование, на ФП рационально использование стратегии управления 2, которая имитирует блокированную трансмиссию. В случае разгона, который характерен для выполнения легких погрузочных или транспортных операций и движения по дорогам общего пользования эффективно использование стратегии 3, то есть противобуксовочной системы, при этом использование стратегии 2 (имитация блокированного привода) может привести к повышенному сопротивлению повороту, что не позволяет рекомендовать ее применении в данном случае.

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-569416

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. В.А. Гартфельдер — поиск публикаций по теме статьи, утверждение финальной версии; А.А. Стадухин — разработка законов управления тяговым электроприводом; Н.А. Мокрецов — проведение моделирования и анализ результатов. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Исследования выполнены ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова» по договору № 517-21 от 22 апреля 2021 г. при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по теме «Создание высокотехнологичного импортозамещающего производства семейства фронтальных погрузчиков с гибридным электроприводом» Соглашения № 075-11-2021-051 от 24 июня 2021 г.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. V.A. Gartfelder — search the publications on the topic of the article; approving the final version; A.A. Stadukhin — development of traction electric drive control laws; N.A. Mokretsov — performing simulations and results analysis. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agrees to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. The study was conducted by Chuvash State University named after I.N. Ulyanov according to the contract №517-21 of 22 April 2021 with financial support of Ministry of Education and Science as part of implementing the "Development the high-technological import-replacing manufacturing of the line-up of frontal loaders with hybrid electric drive" multipurpose project of the agreement № 075-11-2021-051 of 24 June 2021.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горелов В.А., Косицын Б.Б., Стадухин А.А., и др. Метод определения параметров электромеханической трансмиссии фронтального погрузчика // Тракторы и сельхозмашины. 2021. Т. 88. № 5. С. 38–45. doi: 10.31992/0321-4443-2021-5-38-45

2. Бяков К.Е., Стадухин А.А., Мокрецов Н.А. Сравнительная оценка топливной экономичности фронтального погрузчика // Транспортные системы. 2022. №4 (26). С. 51–62. doi: 10.46960/2782-5477_2022_4_51

3. Девянин С.Н., Бижаев А.В. Анализ буксования ведущего колеса трактора при влиянии комплексного фактора // Чтения академика В. Н. Болтинского: семинар, Москва, 20–21 января 2021 года. Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2021. С. 300–306.

4. Левшин А.Г., Гаспарян И. Н., Алсанкари А., и др. Методика экспресс-анализа буксования на эксплуатационных режимах работы трактора // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 4. С. 32–36. doi: 10.26897/2687-1149-2022-4-32-36

5. Heubaum M., Münch Ph., Costantini G., et al. Slip Detection and Control for Harvesting Machines // IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55, N 32. P. 18–23. doi: 10.1016/j.ifacol.2022.11.108

6. Чудаков О.И. Анализ условий эксплуатации фронтальных погрузчиков и синтез расчетных нагрузочных режимов // ИНТЕРСТРОЙМЕХ-2022. Материалы XXVI Международной научно-технической конференции. Ярославль, 2022. С. 134–142.

REFERENCES

1. Gorelov VA, Kositsyn BB, Stadukhin AA, et al. Method for determining the parameters of the front loader electromechanical transmission. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2021;88(5):38-45. (In Russ). doi: 10.31992/0321-4443-2021-5-38-45

2. Byakov KE, Stadukhin AA, Mokretsov NA. Comparative assessment of the fuel efficiency of a front loader. Transportnye sistemy. 2022;4(26):51–62. (In Russ). doi: 10.46960/2782-5477_2022_4_51

3. Devyanin SN, Bizhaev AV. Analysis of slipping of the tractor drive wheel under the influence of a complex factor. In: *Readings of Academician VN Boltinsky: seminar, Moscow, January 20–21, 2021.* Moscow: OOO "Sam Poligrafist", 2021:300–306. (In Russ).

4. Levshin AG, Gasparyan IN, Alsankari A, et al. Methodology for express analysis of slippage in tractor operating modes. *Agroinzheneriya.* 2022;24(4):32–36. (In Russ). doi: 10.26897/2687-1149-2022-4-32-36

5. Heubaum M, Münch Ph, Costantini G, et al. Slip Detection and Control for Harvesting Machines. *IFAC-PapersOnLine.* 2022;55(32):18–23. doi: 10.1016/j.ifacol.2022.11.108

6. Chudakov O.I. Analysis of operating conditions for front-end loaders and synthesis of design load modes. In: *INTERSTROYMEH-2022. Materials of the XXVI International Scientific and Technical Conference.* Yaroslavl; 2022:134–142. (In Russ).

ОБ АВТОРАХ

*** Мокрецов Николай Александрович,**
аспирант кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы»;
адрес: Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр.1;
ORCID: 0000-0002-7050-1914;
eLibrary SPIN: 4916-9707;
e-mail: mnasm@bmstu.ru

Гартфельдер Виктор Адольфович,
канд. техн. наук,
декан машиностроительного факультета;
ORCID: 0000-0002-6759-6756;
eLibrary SPIN: 6075-0549;
e-mail: harvik48@list.ru

Стадухин Антон Алексеевич,
д-р техн. наук,
доцент кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы»;
ORCID: 0000-0003-1414-3435;
eLibrary SPIN: 7669-7133;
e-mail: ant.m@bmstu.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

AUTHORS' INFO

*** Nikolay A. Mokretsov,**
Postgraduate of the Multipurpose Tracked Vehicles and Mobile Robots Department;
address: 5 bldg 1 2nd Baumanskaya, 105005 Moscow, Russian Federation;
ORCID: 0000-0002-7050-1914;
eLibrary SPIN: 4916-9707;
e-mail: mnasm@bmstu.ru

Viktor A. Gartfelder,
Cand. Sci. (Engineering),
Dean of the Mechanical Engineering Faculty;
ORCID: 0000-0002-6759-6756;
eLibrary SPIN: 6075-0549;
e-mail: harvik48@list.ru

Anton A. Stadukhin,
Dr. Sci. (Engineering),
Associate Professor of the Multipurpose Tracked Vehicles and Mobile Robots Department;
ORCID: 0000-0003-1414-3435;
eLibrary SPIN: 7669-7133;
e-mail: ant.m@bmstu.ru

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-567796

Оригинальное исследование

Вибронагруженность штанг самоходного опрыскивателя на шинах сверхнизкого давления

В.И. Прядкин, П.А. Колядин

Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящей статье приведены результаты экспериментальных исследований вибронагруженности штанг самоходного опрыскивателя, оборудованного шинами сверхнизкого давления 1020×420-18 модели Бел-79 при проезде через единичные искусственные неровности. По результатам проведенных испытаний получены зависимости влияния максимальных вертикальных ускорений на навеске штанг от скорости движения при различном давлении воздуха в шинах и уровнях заправки бака опрыскивателя технологической жидкостью. Установлено, что снижение заполнения емкости технологической жидкостью и увеличение скорости движения самоходного опрыскивателя позволило увеличить уровень колебаний на штангах опрыскивателя пропорционально относительно полной заправки. При переезде самоходного опрыскивателя через искусственные неровности с раскрытыми в рабочем положении штангами, расположенными на расстоянии 700 мм от опорной поверхности, во всем диапазоне скоростей движения от 3 м/с до 12 м/с, амплитуда колебаний на концах штанг не превышала 80 мм.

Цель работы — экспериментальная оценка влияния эксплуатационных параметров мобильного энергетического средства, оборудованного шинами сверхнизкого давления, на вибронагруженность штанг опрыскивателя.

Материалы и методы. Приведены методики лабораторно-полевых исследований по проезду мобильного энергетического средства, оборудованного штанговым опрыскивателем, через искусственные неровности. Максимальные вертикальные ускорения на навеске штанг опрыскивателя определялись при помощи приборного комплекса «АССИСТЕНТ TOTAL», состоящего из измерительного блока с анализатором вибрациии вибропреобразователя АР38Р.

Результаты. Получены зависимости влияния давления воздуха в шинах сверхнизкого давления и скорости движения МЭС-600 на уровень колебаний штанг опрыскивателя при движении по искусственным единичным неровностям. Минимальный уровень колебаний на штангах при различном давлении воздуха в шинах и различной степени заправки емкости достигается при скорости движения МЭС 9 м/с. Самым вибронагруженным для штанг опрыскивателя является режим движения в порожнем состоянии.

Выводы. Минимальный уровень колебаний на штангах опрыскивателя имеет место в диапазоне скоростей 7,5–10,5 м/с. При снижении давления воздуха в шинах с 80 кПа до 20 кПа вибронагруженность штанг снижается в 2,8 раза. Увеличение вибронагруженности имеет место в диапазоне уровня заполнения бака опрыскивателя от 50% до порожнего состояния. При движении по единичным неровностям в диапазоне скоростей от 3 м/с до 12 м/с штанги опрыскивателя устойчиво находились в горизонтальном положении, интенсивных колебаний и резонансных режимов секций штанг не наблюдалось.

Ключевые слова: мобильное энергосредство; самоходный опрыскиватель; штанга; шина сверхнизкого давления; вибронагруженность; искусственные неровности.

Как цитировать:
Прядкин В.И., Колядин П.А. Вибронагруженность штанг самоходного опрыскивателя на шинах сверхнизкого давления// Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 6. С. 543–550. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-567796

Рукопись получена: 28.07.2023 **Рукопись одобрена:** 01.10.2023 **Опубликована онлайн:** 15.12.2023

ЭКО•ВЕКТОР
Все права защищены
© Эко-Вектор, 2023
московский политех

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-567796

Original Study Article

Vibration loading of booms ofaself-propelled sprayer with ultra-low pressure tires

Vladimir I. Pryadkin, Pavel A. Kolyadin

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: The results of experimental studies of the vibration loading of booms of a self-propelled sprayer equipped with the Bel-79 1020x420-18 ultra-low pressure tires when driving through single artificial bumps are given in the paper. Based on the results of the tests, the dependences of maximal vertical accelerations of the booms suspension on motion velocity at various tire pressure and levels of filling the sprayer tank with process liquid were obtained. It has been found that with a decrease in level of filling of the tank with process liquid and an increase in motion velocity, the oscillations level of the sprayer booms increases proportionally relative to the full filling. When the self-propelled sprayer moves through artificial bumps with the booms opened in the operating position, located at a height of 700 mm above the ground surface, the oscillation amplitude at the ends of the booms did not exceed 80 mm in the entire velocity range from 3 m/s to 12 m/s.

AIM: Experimental evaluation of influence of operational parameters of a mobile power unit (MPU) equipped with ultra-low pressure tires on the vibration loading of sprayer booms.

METHODS: Methods of laboratory and field research on moving of a mobile power tool equipped with a boom sprayer through artificial bumps are given. The maximal vertical accelerations on the sprayer booms were determined using the ASSISTANT TOTAL instrument facility consisting of a measuring unit with a vibration analyzer and the AR38R vibration transducer.

RESULTS: The dependences of the influence of air pressure in ultra-low pressure tires and motion velocity of the MES-600 on the oscillations level of the sprayer booms when moving through single artificial bumps are obtained. The minimal oscillations level on the booms at various tire pressure and various degrees of tank filling is reached at a velocity of the MPU of 9 m/s. The most vibration-loaded for sprayer booms mode is moving with empty tank.

CONCLUSIONS: The minimal oscillations level of the sprayer booms takes place in the velocity range of 7.5–10.5 m/s. When tire pressure is reduced from 80 kPa to 20 kPa, the vibration loading of the booms is decreased by 2.8 times. An increase in vibration loading takes place in the range of filling level of the sprayer tank from 50% down to being empty. When moving along single bumps in the velocity range from 3 m/s to 12 m/s, the sprayer booms were stable in a horizontal position, any intense vibrations and resonant modes of boom sections were not observed

Keywords: mobile power unit; self-propelled sprayer; boom; ultra-low pressure tire; vibration loading; artificial bumps.

To cite this article:
Pryadkin VI, Kolyadin PA. Vibration loading of booms of a self-propelled sprayer with ultra-low pressure tires. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2023;90(6):543–550. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-567796

Received: 28.07.2023 **Accepted:** 01.10.2023 **Published online:** 15.12.2023

moscow polytech

All rights reserved
© Eco-Vector, 2023

ECO•VECTOR

ВВЕДЕНИЕ

В Стратегии устойчивого развития сельскохозяйственных территорий России на период до 2030 г. важная роль отводится технико-технологическому обеспечению сельскохозяйственного производства с целью обеспечения продовольственной безопасности страны [1]. Инновационная модернизация агропромышленного комплекса России позволила обеспечить рост продукции растениеводства в условиях санкций, так в 2022 г. впервые было собрано рекордное количество около 150 млн. тонн зерна.

Повышение урожайности зерновых культур невозможно достичь без широкого применения средств химизации, позволяющих защитить культурные растения от вредителей, болезней и сорняков. В России значительный процент работ выполняется на почвах с низкой несущей способностью, которые составляют 11,2 млн. га пахотной площади земель. Особую сложность представляют технологические операции при работе агрегатов в ранний весенний и поздний осенний периоды, когда движение машин по полю в это время становится невозможным. При выполнении энергоемких технологических процессов в растениеводстве широко используются колесные и гусеничные тракторы различной мощности, однако, проблема обработки полей гербицидами не может быть решена за счет использования этих мобильных средств и их увеличения в парке. Поэтому важную роль в экономике производства сельскохозяйственной продукции растениеводства играет использование специализированных мобильных энергосредств (МЭС) и высокоэффективная организация их применения [2–5].

Эффективным путем повышения агротехнической проходимости и обеспечения выполнения технологических операций в заданные агросроки на почвах с низкой несущей способностью является применение МЭС на шинах сверхнизкого давления. За последние два десятилетия были разработаны различные самоходные опрыскиватели, с различным расположением штанг: с центральным расположением, на передней и задней навесках.

Исследования по целесообразности применения МЭС на шинах сверхнизкого давления проводились многими исследователями. Проведенными исследованиями теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что диапазон давлений воздуха в шинах должен составлять 5–40 кПа при движении МЭС по почвам с низкой несущей способностью в ранний весенний период. Авторами проведен ряд исследований по оценке контактных давлений МЭС, оборудованных шинами сверхнизкого давления, на почвенно-растительный покров (например, см. [6]). Также проведены теоретические и экспериментальные исследования по оценке вибронагруженности самоходных опрыскивателей и обоснованию движения на повышенных рабочих скоростях 20–40 км/ч [7–10]. Исследования по оценке вибронагруженности штанг опрыскивателей проводились в основном для выявления резонансных режимов при движении самоходных и прицепных опрыскивателей на повышенных рабочих скоростях, а также оценки влияния резонансных режимов на ресурс штанг [11, 12]. Однако, исследования по оценке вибронагруженности штанг опрыскивателя МЭС на шинах сверхнизкого давления малой грузоподъемности, в настоящее время изучены недостаточно.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью работы является экспериментальная оценка влияния эксплуатационных параметров мобильного энергетического средства, оборудованного шинами

Рис. 1. Мобильное энергетическое средство на шинах сверхнизкого давления МЭС-600.
Fig. 1. The MES-600 mobile power unit with ultra-low pressure tires.

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-567796

сверхнизкого давления, на виброзащитные свойства штангового опрыскивателя (рис. 1).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения настоящих исследований было разработано и изготовлено МЭС на шинах сверхнизкого давления, оборудованное опрыскивателем, с расположением штанг на задней навеске. При движении в транспортном положении штанги складывались. Левое и правое крылья штанг выполнены их трех секций. Первая и вторая секции имеют пространственную ферменную конструкцию, выполненную из алюминиевого проката. Третья секция выполнена из алюминиевого проката, шарнир этой секции оборудован автомат возврата в исходное положение при контакте края штанги с почвой либо другим препятствием.

Лабораторно-полевые испытания по определению вибронагруженности навески штангового опрыскивателя производились на горизонтальном участке дороги с твердым покрытием длиной 1200 м и с максимальным уклоном на отдельных участках, не превышающих 2%. С целью определения максимального вертикального ускорения на навеске, были изготовлены две единичные искусственные неровности для колес правого и левого бортов МЭС, имеющих трапециевидный профиль, с длиной нижнего основания 700 мм, длиной верхнего основания 100 мм и общей высотой неровностей 75 мм.

Испытания по определению амплитуды колебаний на концах штанг опрыскивателя поводились при раскрытых штангах и опущенных на расстоянии 700 мм от опорной поверхности. Согласно рекомендаций превышение отклонения от заданной высоты не должно превышать 100 мм [13, 14]. На концах штанг устанавливались специальные маркеры, регистрация производилась с применением стационарно установленной высокоскоростной видеокамеры, установленной на расстоянии 12 м от края штанги.

Максимальное вертикальное ускорение на навеске штанг опрыскивателя определяли при помощи приборного комплекса АССИСТЕНТ TOTAL» (SIU V3RT), состоящего из измерительного блока с анализатором вибрации, размещенного в кабине оператора и вибропреобразователя AP38P, крепление которого осуществлялось резьбовым соединением к нижней части навески, проходящей по оси штанг опрыскивателя. Обработка полученных данных от анализатора и их перевода в формат Microsoft Excel производилась с применением программ для приборного комплекса «АССИСТЕНТ TOTAL» — «AssistentDataCenter».

Мобильное энергетическое средство эксплуатируется при выполнении технологических операций как по полям с почвой различной несущей способностью, так и по грунтовым полевым дорогам в широком диапазоне давления воздуха в шинах и скоростей движения. Уровень заполнения бака изменяется по мере расхода жидкости опрыскивателем и его последующей заправке. Поэтому при проведении лабораторно-полевых исследований скорость варьировалась в интервале от 3 м/с до 12 м/с и контролировалась оператором с помощью GPS приёмника компьютера для полевых опрыскивателей серии «Bravo 180S». Давление в шинах сверхнизкого давления устанавливалось соответственно: 80 кПа, 60 кПа, 40 кПа и 20 кПа; и контролировалось перед каждой серией проведения испытаний. Уровень заполнения бака на лабораторно-полевых испытаниях определили значениями: 0% (0 л), 50% (300 л) и 100% (600 л).

Определяемыми параметрами эксперимента являлись значения максимальных вертикальных ускорений на задней навеске МЭС и амплитуды колебаний на концах штанг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Лабораторно-полевые исследования по оценке вибрационной нагруженности штанг опрыскивателя МЭС на шинах сверхнизкого давления проводились в три этапа.

На первом этапе была проведена оценка влияния скорости движения МЭС и степени заполнения емкости технологической жидкостью при максимальном и оптимальном давлении воздуха в шинахна вибронагруженность штанг [15, 16] (рис. 2).

Результаты испытаний показали, что степень заполнения емкости технологической жидкостью от 50% до 100% не оказывает существенного влияния на вибронагруженность штанг. Со снижением заполнения емкости технологической жидкостью и увеличением скорости движения уровень колебаний на штангах опрыскивателя пропорционально увеличивается относительно полной заправки. При движении МЭС со скоростью 3 м/с имеет место максимальный уровень вибронагруженности, далее с увеличением скорости движения, время взаимодействия шин с неровностью уменьшается, и как следствие снижается вибронагруженность штанг. Минимальный уровень колебаний на штангах при различном давлении воздуха в шинах и различной степени заправки емкости достигает при скорости движения МЭС 9 м/с. Установлено, что в диапазоне скоростей 7,5–10,5 м/с имеет место минимальный уровень колебаний при различной степени заполнения емкости технологической жидкостью и давлениях воздуха в шинах. В диапазоне скоростей от 9 до 12 м/с уровень колебаний незначительно увеличивается, что обусловлено возникновением галопирования МЭС.

Самым вибронагруженным является режим движения МЭС в порожнем состоянии. Так, при движении в порожнем состоянии, в диапазоне скоростей от 3 до 6 м/с уровень колебаний штанг остается практически постоянным, далее снижается до минимального значения при скорости 9 м/с, затем незначительно возрастает при давлении воздуха в шинах 80 кПа, а при давлении 40 кПа имеет место более интенсивный рост колебаний штанг до скорости 12 м/с.

При движении МЭС со скоростью 9 м/с и давления воздуха в шинах 80 кПа уровень колебаний на навеске штанг относительно порожней заправки снижается в 3 раза

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-567796

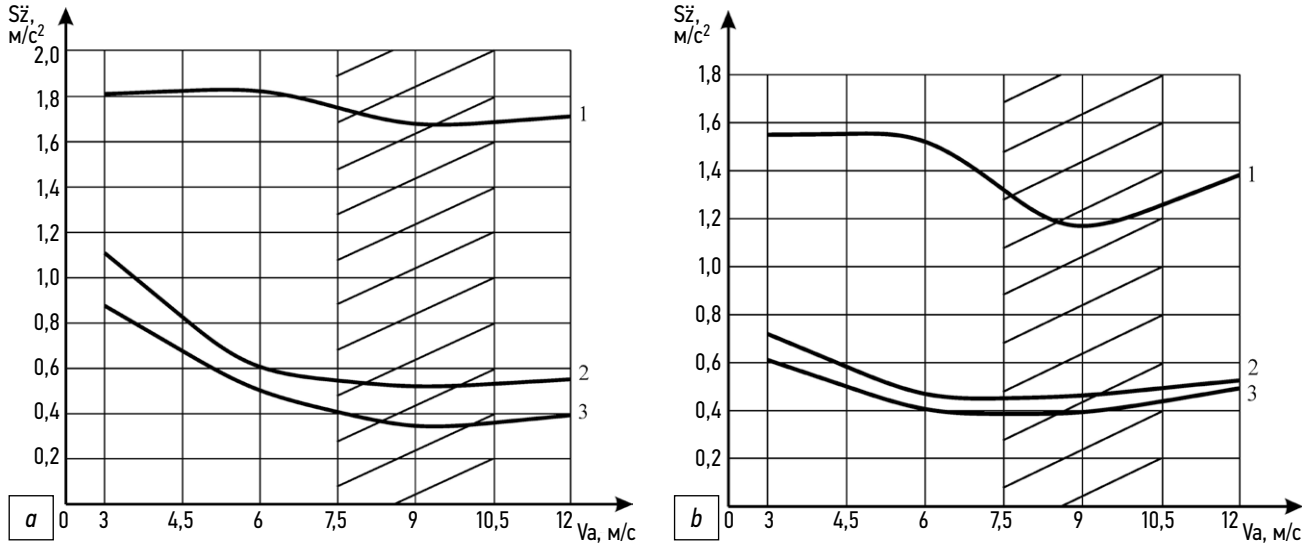

Рис. 2. Зависимость максимального вертикального ускорения на навеске штанг от скорости движения при давлении в шинах: *a* — 80 кПа; *b* — 40 кПа. Уровень заполнения бака: *1* — 0%; *2* — 50%; *3* — 100%.
Fig. 2. Dependence of maximal vertical acceleration of booms suspension on motion velocity at tire pres-sure of: *a* — 80 kPa; *b* — 40 kPa. Tank filling level: *1* — 0%; *2* — 50%; *3* — 100%.

при заправке емкости на 50%, и в 4,8 раза при полной заправке. При движении МЭС с этой же скоростью, но давлении воздуха в шинах 40 кПа уровень колебаний на навеске штанг относительно порожней заправки снизился в 2,6 раза при заправке емкости на 50%, и в 2,9 раза снизился при полной заправке.

Стоит отметить тенденцию снижения максимального вертикального ускорения на навеске штанг опрыскивателя мобильного энергетического средства в диапазоне скоростей от 3 м/с до 9 м/с и небольшое возрастание в диапазоне от 9 м/с до 12 м/с. Для обоснования зависимостей ускорений от скорости движения МЭС были рассмотрены спектры вертикальных ускорений на задней навеске при давлении в шинах 40 кПа и уровня заполнения бака опрыскивателя 0 % (рис. 3).

Рассматривая полученные спектры ускорения, необходимо отметить два диапазона резонансных частот: первый диапазон в интервале от 1,6 Гц до 4 Гц, а второй — от 4 Гц до 8 Гц. Резонансная частота на первом диапазоне смещается в область более высоких частот при увеличении скорости движения МЭС с 2 Гц при скорости движения 3 м/с до 3,15 Гц при скорости 9 и 12 м/с. Одновременно со смещением резонансной частоты вертикальное ускорение снижается с 0,1583 g при скорости движения 3 м/с до 0,1065 g при скорости 12 м/с (в 1,49 раз).

В то же время, на втором диапазоне также резонансная частота смещается с 5 Гц при скорости 3 м/с на 6,3 Гц при скоростях движения МЭС 6, 9 и 12 м/с. Но с увеличением скорости от 3 м/с до 12 м/с в рассматриваемом интервале наблюдается рост ускорения с 0,0725 g до 0,1414 g (в 1,95 раз).

Таким образом, при снижении ускорений на первом резонансном интервале частот, на втором резонансном интервале ускорения возрастают. На скорости движения мобильного средства до 6 м/с первый резонансный участок имеет большее ускорение, а при скорости более 9 м/с — уже второй. Соответственно максимальное вертикальное ускорение на навеске штанг будет снижаться до скорости движения 9 м/с из-за уменьшения времени взаимодействия движителя с единичной неровностью и с 9 м/с будет только возрастать, что объясняется увеличением воздействия на навеску от шин и трансмиссии.

Вторым этапом экспериментальных исследований предусматривалась оценка влияния на вибронагруженность штанг опрыскивателя давления воздуха в шинах и скорости движения МЭС в порожнем состоянии, без заправки бака технологической жидкостью (рис. 4). Установлено, что со снижением давления воздуха в шинах также снижается уровень колебаний на навеске штанг опрыскивателя. В диапазоне скоростей 7,5–10,5 м/с, имеет место минимальный уровень колебаний при различных давлениях воздуха в шинах, минимум колебаний достигается при скорости 9 м/с. Давление воздуха в шинах 80 кПа устанавливается при переезде с поля на поле при движении по грунтовым укатанным дорогам и по дорогам с покрытием. При выполнении технологических операций предыдущими исследованиями было рекомендовано давление воздуха в шинах 40 кПа. Давление воздуха в шинах 20 кПа рекомендовано для кратковременного преодоления труднопроходимых участков поля при выполнении работ на почвах с низкой несущей способностью.

Максимальный уровень колебаний на навеске штанг при движении МЭС в порожнем состоянии со скорости 9 м/с имеет место при давлении воздуха в шинах 80 кПа, при давлениях 60 кПа и 40 кПа уровень колебаний снижается соответственно в 1,1 и 1.4, а при давлении 20 кПа уровень колебаний снизился в 2,8 раза.

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-567796

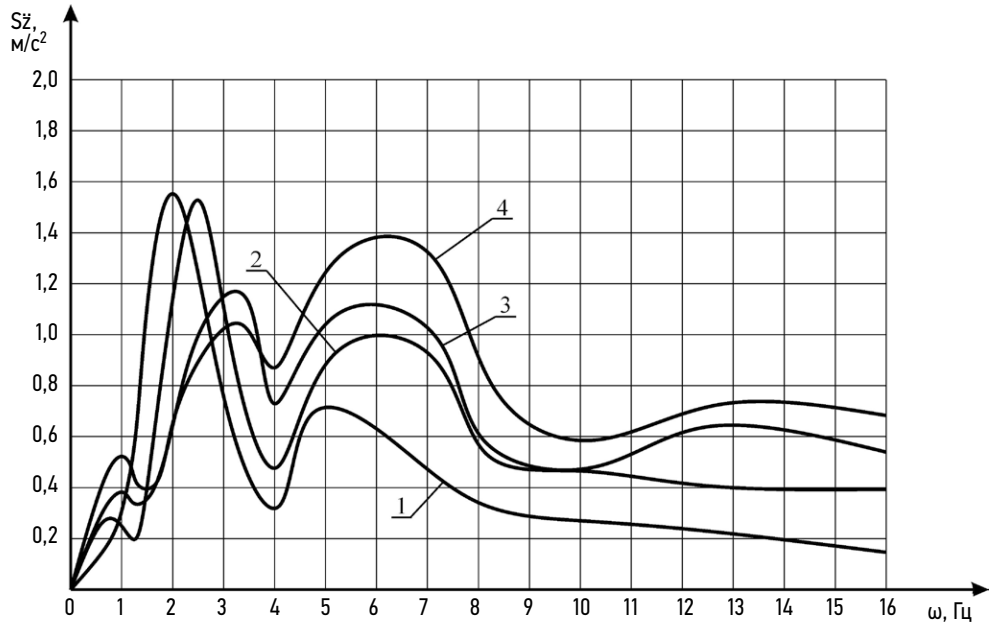

Рис. 3. Спектры вертикальных ускорений на навеске штанг при уровне заполнения бака 0% и давлении в шинах 40 кПа на скорости движения: *1* —3 м/с; *2* — 6 м/с; *3* — 9 м/с; *4* — 12 м/с.
Fig. 3. Spectra of vertical accelerations of booms suspension at a tank filling level of 0% and tire pres-sure of 40 kPa at motion velocity of: *1* — 3 m/s; *2* — 6 m/s; *3* — 9 m/s; *4* — 12 m/s.

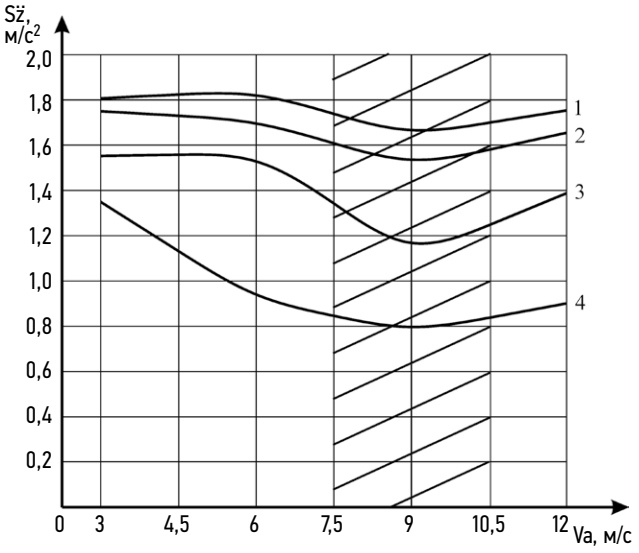

Рис. 4. Спектры вертикальных ускорений на навеске штанг при уровне заполнения бака 0% и давлении в шинах 40 кПа на скорости движения: *1* —3 м/с; *2* — 6 м/с; *3* — 9 м/с; *4* — 12 м/с.
Fig. 4. Spectra of vertical accelerations of booms suspension at a tank filling level of 0% and tire pres-sure of 40 kPa at motion velocity of: *1* — 3 m/s; *2* — 6 m/s; *3* — 9 m/s; *4* — 12 m/s.

Третьим этапом экспериментальных исследований предусматривалось определение амплитуды колебаний на концах штанг опрыскивателя для наиболее вибронагруженного режима движения. Установлено, что при переезде через искусственные неровности с раскрытыми в рабочем положении штангами, расположенными на расстоянии 700 мм от опорной поверхности, во всем диапазоне скоростей движения от 3 м/с до 12 м/с, амплитуда колебаний на концах штанг не превышала 80 мм.

Проведённые исследования вибронагруженности штанг опрыскивателя показали, что оборудование МЭС шинами сверхнизкого давления оказывает щадящее воздействие на штанги опрыскивателя. На всех режимах испытаний резонансных явлений не было выявлено, при этом амплитуда колебаний на концах штанг при переезде через единичные неровности не превышал критических значений.

ВЫВОДЫ

Минимальный уровень колебаний на штангах опрыскивателя при различных режимах работы имеет место в диапазоне скоростей 7,5–10,5 м/с. При этом снижение давления воздуха в шинах с 80 кПа до 20 кПа позволяет снизить вибронагруженность штанг в 2,8 раза.

Проведенные исследования показали, что снижение заправки бака технологической жидкостью со 100% до 50%, не оказывает существенного влияния на вибронагруженность штанг опрыскивателя. Увеличение вибронагруженности имеет место в диапазоне заправок от 50% до порожнего состояния. Самым вибронагруженным для штанг опрыскивателя является режим движения в порожнем состоянии.

Экспериментально установлено, что при движении по единичным неровностям в диапазоне скоростей от 3 м/с до 12 м/с штанги опрыскивателя устойчиво находились в горизонтальном положении, интенсивных колебаний и резонансных режимов секций штанг не наблюдалось.

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-567796

Амплитуда колебаний на концах штанг при переезде через единичные неровности не превышала 80 мм, что удовлетворяет агротехническим требованиям при выполнении технологических процессов по обработки культурных растений.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. В.И. Прядкин — общее руководство исследованиями, инициатор разработки и создания объекта исследований, разработка программы и методики исследований, участие в написании текста рукописи; П.А. Колядин — участие в создании объекта исследований, разработка программы исследований, участие в проведении испытаний, обработка результатов исследований; редактирование текста. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследований.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. V.I. Pryadkin — general management of the study, initiation of development and creation of the object of the study, development of the program and methodology of the study, writing the text of the manuscript; P.A. Kolyadin — creation the object of the study, development of the program of the study, conducting tests, results processing; text editing. The authors confirm that their authorship complies with the international *ICMJE* criteria (all authors made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Competing interests. The authors declare no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

Funding source. Authors state that this research was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прогноз научно-технологического развития агропромышленного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года. М.: МинСельХоз РФ, НИУ ВШЭ, 2017.

2. Безуглов В.Г. Анализ технологий и техники для внесения химических средств защиты растений // Техника и оборудования для села. 2013. № 2. С. 7–10.

3. Быков С.Н. Показатель «значимость информационной технологии» конкурентоспособности наукоемкой машиностроительной продукции // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 12. С. 25–30.

4. Демин Е.Е., Старцев А.С., Павлов П.И., и др. Результаты исследований мощности установленных двигателей и массы самоходных штанговых опрыскивателей // Аграрный научный журнал. 2022. № 12. С. 73–76. doi: 10.28983/asj.y2022i12pp73-76

5. Щеголихина Т.А. Тенденции развития зарубежных самоходных опрыскивателей. В кн.: Современные ресурсоэффективные технологии и технические средства в АПК; материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, г. Курск, 31 марта 2021. Курск, 2021. С.116–120.

6. Прядкин В.И., Шапиро В.Я., Годжаев З.А., и др. Транспортно-технологические средства на шинах сверхнизкого давления. Воронеж: ВГЛТУ. 2019.

7. Константинов М.М., Петренко Е.С. Технико-экономическое обоснование ширины захвата штангового опрыскивателя // Известия ОГАУ. 2018. № 1 (68). С. 122–125.

8. Крук И.С., Гордеенко О.В., Карпович С.К., и др. Направления повышения эффективности использования полевых штанговых опрыскивателей // Агропанорама. 2022. № 5 (153). С. 2–10.

9. Петухов Д.А., Юзенко Ю.А. Технико-эксплуатационные показатели самоходных опрыскивателей // АгроСнабФорум. 2018. № 2. С. 13–16.

10. Полищук Ю.В., Лаптев Н.В., Комаров А.П. Эффективность использования самоходного опрыскивателя оборудованного системой автоматического вождения // Нива Поволжья. 2021. № 4 (57). С. 86–92.

11. Карпович С.К., Маринич Л.А., Крук И.С., и др. Методика оценки технического состояния полевых штанговых опрыскивателей и технологические требования к ним. Минск: БГАТУ, 2016.

12. Шмелев А.В., Лопух Д.Г., Дробышевская О.В. Моделирование и анализ силовой нагруженности системы штанг самоходного опрыскивателя в среде MSC.ADAMS // Актуальные вопросы машиноведения. 2016. № 5. С. 91–94.

13. Башкирев А.П., Шварц А.А., Шкабенко А.Ю. Анализ полевых опрыскивателей // Наука в центральной России. 2019. № 6 (42). С. 50–58.

14. Крук И.С., Кот Т.П., Гордеенко О.В. Способы и технические средства защиты факела распыла от прямого воздействия ветра в конструкциях полевых опрыскивателей. Минск: БГАТУ, 2022.

15. Годжаев З.А., Гончаренко С.В., Артёмов А.В., и др. Упругие характеристики шины сверхнизкого давления 1020х420-18 модели Бел-79. Ч. I. Вертикальные нагрузки// Автомобильная промышленность. 2020. № 8. С. 18-21.

16. Годжаев З.А., Прядкин В.И., Колядин П.А., и др. Перспективные мобильные средства на шинах сверхнизкого давления для сельскохозяйственного производства // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 4. С. 277–286. doi: 10.17816/0321-4443-115016

REFERENCES

1. *Forecast of scientific and technological development of the agro-industrial complex of the Russian Federation for the period until 2030.* Moscow: MinSelKhoz RF, NIU VShE; 2017. (In Russ).
2. Bezuglov VG. Analysis of technologies and equipment for applying chemical plant protection products. *Tekhnika i oborudovaniya dlya sela.* 2013;2:7–10.(In Russ).
3. Bykov SN. Indicator "importance of information technology" of competitiveness of high-tech engineering products. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii.* 2018;12:25–30. (In Russ).
4. Demin EE, Startsev AS, Pavlov PI, et al. Results of studies of the power of installed engines and the weight of self-propelled boom sprayers. *Agrarian Scientific Journal.* 2022;(12):73–76. doi: 10.28983/asj.y2022i12pp73-76
5. Shchegolikhina TA. Development trends of foreign self-propelled sprayers. In: *Modern resource-efficient technologies and technical means in the agro-industrial complex; materials of the All-Russian (national) scientific and practical conference*, Kursk, March 31, 2021. Kursk; 2021:116–120. (In Russ).
6. Pryadkin VI, Shapiro VYa, Godzhaev ZA, et al. *Transport and technological means on ultra-low pressure tires.* Voronezh: VGLTU; 2019. (In Russ).
7. Konstantinov MM, Petrenko ES. Feasibility study of the working width of a boom sprayer. *Izvestiya OGAU.* 2018;1(68):122–125. (In Russ).
8. Kruk IS, Gordeenko OV, Karpovich SK, et al. Directions for increasing the efficiency of using field boom sprayers. *Agropanorama.* 2022;5(153):2–10. (In Russ).
9. Petukhov DA, YuzenkoYuA. Technical and operational indicators of self-propelled sprayers. *AgroSnabForum.* 2018;2:13–16. (In Russ).
10. Polishchuk YuV, Laptev NV, Komarov AP. Efficiency of using a self-propelled sprayer equipped with an automatic driving system. *Niva Povolzhya.* 2021;4(57):86–92. (In Russ).
11. Karpovich SK, Marinich LA, Kruk IS, et al. *Methodology for assessing the technical condition of field boom sprayers and technological requirements for them.* Minsk: BGATU; 2016. (In Russ).
12. Shmelev AV, Lopukh DG, Drobyshevskaya OV. Modeling and analysis of the force load of the boom system of a self-propelled sprayer in the MSC.ADAMS environment. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya.* 2016;5:91–94. (In Russ).
13. Bashkirev AP, Shvarts AA, ShkabenkoAYu. Analysis of field sprayers. *Nauka v tsentralnoy Rossii.* 2019;6(42):50–58. (In Russ).
14. Kruk IS, Kot TP, Gordeenko OV. Methods and technical means of protecting the spray torch from direct exposure to wind in the designs of field sprayers. Minsk: BGATU; 2022. (In Russ).
15. GojaevZA, Goncharenko SV, Artyomov AV, et al. Elastic characteristics of an ultra-low pressure tire 1020x420-18 model Bel-79. Part I. Vertical loads. *Avtomobilnaya promyshlennost.* 2020;8:18–21. (In Russ).
16. Gojaev ZA, Pryadkin VI, Kolyadin PA, etal. Promising mobile vehicles with ultra-low pressure tires for agricultural production. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2022;89(4):277–286. doi: 10.17816/0321-4443-115016

ОБ АВТОРАХ

*** Прядкин Владимир Ильич,**
д-р техн. наук,
профессор кафедры автомобилей и сервиса;
адрес: Россия, 394087, Воронеж,
ул. Тимирязева, д. 8;
ORCID: 0000-0002-5436-1122;
eLibrary SPIN: 6343-4430;
e-mail: vip16.vgltu@mail.ru

Колядин Павел Александрович,
аспирант кафедры автомобилей и сервиса;
ORCID: 0000-0003-3003-7894;
eLibrary SPIN: 7457-1844;
e-mail: kpa.022@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

AUTHORS' INFO

*** Vladimir I. Pryadkin,**
Dr. Sci. (Engineering),
Professor of the Cars and Service Department;
address: 8 Timiryazeva street, 394087 Voronezh,
Russian Federation;
ORCID: 0000-0002-5436-1122;
eLibrary SPIN: 6343-4430;
e-mail: vip16.vgltu@mail.ru

Pavel A. Kolyadin,
Postgraduate of the Cars and Service Department;
ORCID: 0000-0003-3003-7894;
eLibrary SPIN: 7457-1844;
e-mail: kpa.022@yandex.ru

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568992

Оригинальное исследование

Диагностирование гидроцилиндров строительно-дорожных машин с помощью гидравлического подпора

А.П. Миллер[1, 2], К.Г. Пугин[1, 2]

[1] Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация;
[2] Пермский государственный аграрно-технологический университет, Пермь, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Эффективность эксплуатации гидрофицированных машин существенно зависит от наличия современных методов и средств диагностирования машин в целом и гидравлических систем в частности. Изменяющиеся при эксплуатации параметры гидравлических систем технологических машин оцениваются различными диагностическими методами, обладающими определенными преимуществами и недостатками. Выбор методов диагностирования существенно зависит от типа, назначений и условий эксплуатации, а также от оснащенности эксплуатационных подразделений средствами диагностики.

Цель работы — разработка нового метода диагностики гидроцилиндров. Применить аппаратно-диагностический комплекс для испытаний гидроцилиндра; провести анализ графиков зависимости давления от времени, а также выявить основной диагностический показатель, характеризующий техническое состояние гидроцилиндра.

Материалы и методы. В качестве диагностических показателей, используемых для диагностики технического состояния гидравлических систем и отдельных элементов, в настоящее время, используются: давление, расход и температура рабочей жидкости. Изменение этих показателей позволяет судить о состоянии гидросистемы строительной машины. Однако, указанные показатели помогают оценить существующее состояние и, как правило, не дают возможности оценить остаточный ресурс элементов гидросистемы.

Результаты. Техническое состояние и остаточный ресурс гидроцилиндров можно определить путем сравнения угла повышения давления на эталонном и на испытуемом гидроцилиндре. Угол повышения давления при организации подпора в сливной линии может быть диагностическим параметром при определении технического состояния гидроцилиндра и позволяет определить изменение его технического состояния.

Заключение. Практическая ценность исследования заключается в определении технического состояния гидроцилиндра при совместном использовании аппаратно-диагностического комплекса и разработанного метода диагностики. Предлагаемый метод оценки технического состояния позволяет оценивать ресурс гидроцилиндров, как на стенде, так и при выполнении производственных процессов на машине. Это позволяет сократить время простоя машин, а также уменьшаеть расход денежных средств на их обслуживание и ремонт.

Ключевые слова: строительно-дорожные машины; гидроцилиндр; гидравлическая система; надёжность; диагностика.

Как цитировать:
Миллер А.П., Пугин К.Г. Диагностирование гидроцилиндров строительно-дорожных машин с помощью гидравлического подпора // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 6. С. 551-559. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568992

Рукопись получена: 02.09.2023 **Рукопись одобрена:** 15.11.2023 **Опубликована онлайн:** 15.12.2023

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2023

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568992

Original Study Article

Diagnostics of hydraulic cylinders of road building machines using hydraulic support

Alexander P. Miller[1, 2], Konstantin G. Pugin[1, 2]

[1] Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation;
[2] Perm State Agro-Technological University, Perm, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: The efficiency of operation of hydroficated machines significantly depends on the availability of modern methods and means of diagnosing machines in general and hydraulic systems in particular. The parameters of hydraulic systems of technological machines that change during operation are evaluated by various diagnostic methods that have certain advantages and disadvantages. The choice of diagnostic methods significantly depends on the type, purpose and operating conditions of hydraulic systems, as well as on the equipment of operational units with diagnostic tools.

AIM: Development of a new method for diagnosing hydraulic cylinders. Application of a hardware diagnostic facility for testing a hydraulic cylinder. Analysis of time-domain graphs of pressure. Identification of main diagnostic indicator characterizing the technical condition of the hydraulic cylinder.

METHODS: The pressure, flow rate and temperature of the working fluid are currently used as diagnostic indicators of technical condition of hydraulic systems as a whole and their individual elements. Changes in these indicators makes it possible to judge the state of the hydraulic system of the construction machine. However, these indicators help to assess the current state and, as a rule, are not enough to assess the remaining service life of hydraulic system elements.

RESULTS: The technical state and remaining service life of hydraulic cylinders can be determined by comparing the angle of pressure increase of the reference hydraulic cylinder and of the tested hydraulic cylinder. With the hydraulic support in the drain line, the angle of pressure increase can serve as a diagnostic parameter when determining the technical state of the hydraulic cylinder, makes it possible to determine the change in its technical state.

CONCLUSIONS: The practical value of the study lies in the fact that with the help of a hardware diagnostic facility used together with the developed diagnostic method, it is possible to assess technical state of the hydraulic cylinder. The proposed method of assessing the technical state helps to evaluate the service life of hydraulic cylinders, both on the bench and during their operation. It helps to decrease the downtime of machines, as well as to decrease costs their maintenance and repair.

Keywords: road building machines; hydraulic cylinder; hydraulic system; reliability; diagnostics.

To cite this article:
Miller AP, Pugin KG. Diagnostics of hydraulic cylinders of road building machines using hydraulic support. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2023;90(6):551-559. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568992

Received: 02.09.2023 **Accepted:** 15.11.2023 **Published online:** 15.12.2023

moscow polytech

The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International license
© Eco-Vector, 2023

ECO•VECTOR

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается рост парка сложной и дорогостоящей техники, к которой относятся строительно-дорожные машины. В данных машинах применяются гидравлические приводы. Высокий уровень сложности гидравлических систем, а также высокие требования к их безопасности, безотказности и долговечности требуют точной оценки их технического состояния в процессе эксплуатации [1, 2].

Эффективность эксплуатации гидрофицированных машин существенно зависит от наличия современных методов и средств диагностирования машин в целом и гидравлических систем в частности [3]. Изменяющиеся при эксплуатации параметры гидравлических систем технологических машин оцениваются различными диагностическими методами, обладающими определенными преимуществами и недостатками [4, 5]. Выбор методов диагностирования существенно зависит от типа, назначений и условий эксплуатации гидравлических систем, а также от оснащенности эксплуатационных подразделений средствами диагностики [6-9].

Эксплуатационные расходы на техническое обслуживание строительно-дорожных машин в течение всего срока службы могут быть в несколько раз выше, чем ее первоначальная стоимость [10]. Расходы на эксплуатацию строительно-дорожных машин в значительной степени зависят от условий эксплуатации, нагрузки, региона эксплуатации, производителя и типа машины. [11]. Повысить надёжность гидравлических систем и тем самым снизить расходы на проведение внезапных ремонтов можно, сосредоточив внимание на диагностике гидравлической системы.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель исследования состоит в разработке нового метода диагностики гидроцилиндров. Применить аппаратно-диагностический комплекс для испытаний гидроцилиндра. Провести анализ графиков зависимости давления от времени, а также выявить основной диагностический показатель, характеризующий техническое состояние гидроцилиндра.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве диагностических показателей, используемых для диагностики технического состояния гидравлических систем в целом и её отдельных элементов в настоящее время используются давление, расход и температура рабочей жидкости [12–14]. Изменение этих показателей позволяют судить о состоянии гидросистемы строительной машины. Однако эти показатели помогают оценить существующее состояние и как правило не дают возможности оценить остаточный ресурс элементов гидросистемы.

В статье Чиликина А.А. и Трушина Н.Н. [11], как один из предпочтительных методов диагностики, представлен виброакустический метод, основывающийся на измерении акустической эмиссии, обусловленной вибрациями объектов диагностирования. По мере износа механизмов или при возникновении в них дефектов характер шума и вибраций меняется. Указанный выше метод предусматривает измерение зазоров в сопряжениях деталей по величинам их вибрационных характеристикам и акустическим шумам, возникающих в работе диагностируемой машины. Достоинствами данного метода контроля являются высокая информативность виброакустических сигналов, простота их преобразования в электрические сигналы и, следовательно, возможность автоматизации процесса контроля. Недостатком метода является необходимость применения специальных преобразователей для разделения полезных сигналов и помех.

В статье Бурмистрова В.А., Волкова В.Н., Тимохов Р.С. [1] представлен метод диагностики, который основывается на измерении времени запуска и прогрева двигателя, температуры масла и охлаждающей жидкости, времени вынужденных остановок. По мере прогрева гидросистемы в её трубопроводах появляются области с не равномерно прогретой рабочей жидкостью, что может провести к повышенному износу гидроагрегатов. Метод предусматривает измерение температуры в разных точках узлов и гидроприводов. Достоинствами данного метода контроля является использование температуры, как показателя, простота ее преобразования в электрические сигналы и, следовательно, возможность автоматизации процесса контроля. Недостатком метода является необходимость применения специальных устройств для обработки и преобразования аналоговых сигналов.

В статье Тарбеева А.А., А.И. Павлова [10] представлен метод диагностики гидроцилиндров с использованием искусственного гидроудара (переходного процесса) в его сливной магистрали. По мере износа механизмов или при возникновении в них дефектов меняется характер переходного процесса. Метод предусматривает создание искусственного гидроудара при нагружении гидроцилиндра. Контроль технического состояния осуществляется по трём показателям: величина повышения, частота колебания и период колебания давления. Достоинствами данного метода являются простота преобразования указанных параметров в электрические сигналы и, следовательно, возможность автоматизации процесса контроля. Недостатком метода, как и в предыдущих случаях, является необходимость применения специальных преобразователей для преобразования аналоговых сигналов.

Анализ выше указанных методов диагностики позволил разработать собственный метод диагностики гидроцилиндров. Суть этого метода заключатся в использовании эффекта «гидроподпора» для создания нагрузки на элементы гидроцилиндра и получения характеристики отклика на эту нагрузку. В качестве параметра отклика

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568992

предложено использовать скорость нарастания давления в напорной магистрали. Сделано предположение, что техническое состояние элементов гидроцилиндра будет влиять на скорость нарастания давления при резком изменении внешней нагрузки (формировании подпора в сливной магистрали). Это обусловлено перетоком рабочей жидкости из поршневой полости в штоковую (и обратно) при резком изменении давления в напорной магистрали (обусловленное изменением внешней нагрузки) за счет инерции поршня и штока при их неустановившемся движении. Примерная схемы перетечки жидкости через изношенные уплотнения поршня под воздействием представлена на рис. 1 чёрными стрелками.

Для изучения предложенного метода оценки работоспособности гидроцилиндров был разработан стенд и программа исследования. Стенд позволяет проводить

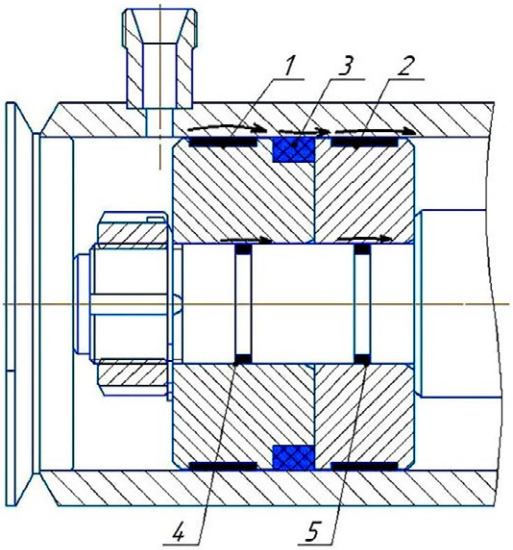

Рис. 1. Примерная схема перетечки жидкости через уплотнения поршня: *1, 2* — направляющие кольца, *3* — уплотнительное кольцо, *4, 5* — штоковые уплотнения поршня.
Fig. 1. An approximate scheme of fluid flow through the piston seals: *1, 2* — guide rings, *3* — a sealing ring, *4, 5* — piston rod seals.

гидравлические испытания гидроцилиндров при номинальном давлении 2 МПа и при максимальном 3 МПа.

В качестве испытуемого гидроцилиндр был использован гидроцилиндр двухстороннего действия с односторонним штоком ГЦ-100.50.400.700(690).40. В качестве уплотнений на поршне использованы два направляющих и одно уплотнительное кольцо. Также для уплотнения в соединении поршень-шток использованы два уплотнительных кольца. Поршень изготовлен из стали 40. Гильза изготовлена из стали 45. Испытуемый гидроцилиндр, установленный на стенде с подключённым к нему преобразователем избыточного давления (ПИД указан стрелкой), представлен на рис. 2. В испытании использовался гидроцилиндр со штатными уплотнениями поршня, которые ранее участвовали в его работе.

3D-модель стенда, собственной конструкции, представлена на рис. 3. В качестве привода гидронасоса используется электродвигатель марки АИР 112 М4 с мощностью 5,5 кВт, с частотой вращения 1440 об/мин и крутящим моментом 36,5 н·м. Использован гидронасос марки НШ 10 Г-3 с рабочим объёмом 10 см^3, с подачей 21 л/мин, с максимальной частотой вращения 3600 об/мин, с номинальным давлением 16 МПа. В качестве трубопроводов используются рукава высокого давления с предельным рабочим давлением 40 МПа. В качестве рабочей жидкости использовано гидравлическое масло с товарной маркой ВМГЗ.

Принципиальная гидравлическая схема стенда представлена на рис. 4.

Алгоритм предлагаемого метода диагностирования гидроцилиндров заключается в следующем. Рабочая жидкость из бака Б насосом Н подается в штоковую (или поршневую) полость гидроцилиндра через фильтр Ф, после чего проходит через дроссель ДР, с помощью которого производится регулирование давления в системе, поступает в гидрораспределитель Р1. Гидрораспределитель направляет рабочую жидкость в штоковую или поршневую полость гидроцилиндра. Для формирования подпора на сливной линии установлен шаровой запорный клапан (ШЗК). Перед подачей рабочей жидкости в гидроцилиндр производится перекрытие сливной магистрали

Рис. 2. Испытуемый гидроцилиндр с подключённым к нему ПИД.
Fig. 2. The tested hydraulic cylinder with the excessive pressure transmitter connected to it.

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568992

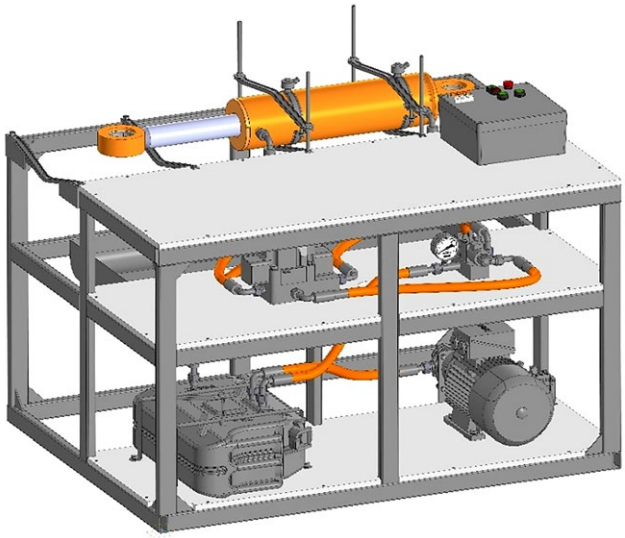

Рис. 3. 3D-модель стенда.
Fig. 3. The 3D model of the bench.

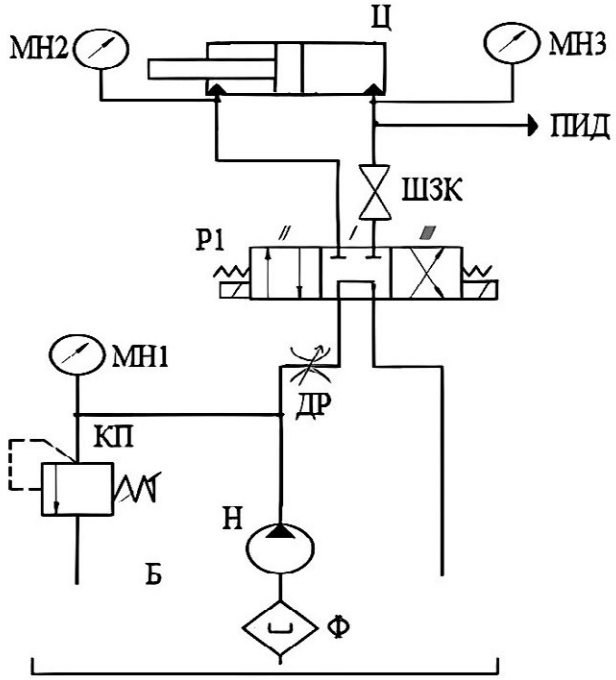

Рис. 4. Принципиальная гидравлическая схема стенда: *Б* — бак, *Ф* — фильтр, *Н* — насос, *КП* — клапан предохранительный, *ШЗК* — шаровой запорный клапан, *МН1* — манометр, *ДР* — регулируемый дроссель, *Р1* — гидрораспределитель, *МН2* и *МН3* — дублирующие манометры избыточного давления по магистралям, *ПИД* — преобразователь избыточного давления, *Ц* — исследуемый гидроцилиндр.
Fig. 4. Schematic hydraulic diagram of the bench: *Б* — a tank, *Ф* — a filter, *Н* — a pump, *КП* — a safety valve, *ШЗК* — a ball shut–off valve, *МН1* — a pressure gauge, *ДР* — an adjustable throttle, *Р1* — a hydraulic distributor, *МН2* and *МН3* — secondary excessive pressure gauges at circuit branches, *ПИД* — an excessive pressure transmitter, *Ц* — a studied hydraulic cylinder.

с помощью ШЗК. Далее с помощью электромагнитных клапанов гидрораспределителя Р1 по напорной магистрали в поршневую полость гидроцилиндра происходит подача рабочей жидкости. Регистрация характера повышения давления в штоковой полости производится преобразователем избыточного давления (ПИД). Манометры избыточного давления МН3 и МН2 служат для дублирования показаний при проведении испытаний. Манометр МН1 используется для контроля давления в гидросистеме при её работе и регулировке. Предохранительный клапан КП не допускает повышения давления в гидросистеме сверх его регулировки.

Таблица 1. Технические характеристики Arduino Uno
Table 1. Technical characteristics of the Arduino Uno

Характеристика	Значение характеристики
Микроконтроллер	ATmega328
Рабочее напряжение, В	5
Входное напряжение (рекомендуемое), В	7–12
Входное напряжение (предельное), В	6–20
Цифровые Входы/Выходы	14 (6 из которых могут использоваться как выходы широтно-импульсной модуляции (ШИМ))
Аналоговые входы	6
Постоянный ток через вход/выход, мА	40
Постоянный ток для вывода 3.3 В, мА	50
Флеш-память	32 Кб из которых 0.5 Кб используются для загрузчика
ОЗУ, Кб	2
EEPROM, Кб	1
Тактовая частота, МГц	16

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568992

Диагностический комплекс состоит из аппаратно-программного средства (АПС), ЭВМ (ноутбук), ПО (разработанная компьютерная программа для отображения графика повышения давления), преобразователя избыточного давления ((ПИД), модель ПД-100ДИ) и блока питания (БП). В качестве АПС выступает Arduino Uno. Arduino — это открытая платформа, которая позволяет создавать различные устройства для измерения, преобразования и управления аналоговыми и цифровыми сигналами. Принципиальная схема диагностического комплекса представлена на рис. 6.

Рис. 5. Общий вид диагностического комплекса.
Fig. 5. General view of the diagnostic facility.

Технические характеристики Arduino Uno представлены в таблице 1.

Обмен информацией между ПИД-АПС-ЭВМ осуществляется по протоколу USB 2.0.

Компьютерная программа была написана в среде Arduino IDE и позволяет анализировать аналоговый сигнал и преобразовать его в цифровой, затем представляя в виде графика зависимости давления от времени. В интерфейсе программы есть две команды «Обновить» и «Подключиться». Под командой «Обновить» понимается, что при её нажатии автоматически выбирается порт подключения в АПС. Команда «Подключиться» соответственно означает установить связь с портом подключения. По результатам проведённого опыта получаем график зависимости давления от времени.

На компьютере при проведении испытания автоматически строится график повышения давления. На графиках по оси X отложено время в секундах, а по оси Y давление в мегапаскалях (Мпа). Интервалы между вертикальными осями на графике равны 10 секундам. По отклонению от эталонных значений графика судят о техническом состоянии испытуемого гидроцилиндра. Пример графиков эталонного и неисправного гидроцилиндра представлены на рис. 7 и 8 соответственно.

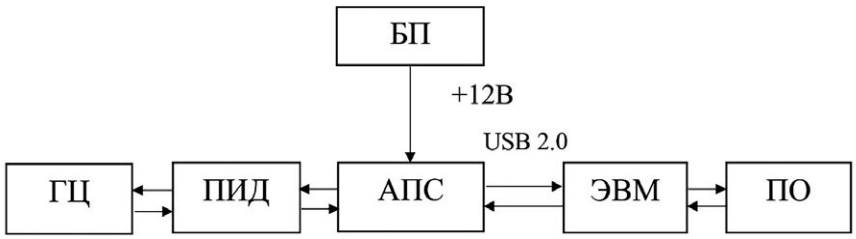

Рис. 6. Принципиальная схема диагностического комплекса.
Fig. 6. Schematic diagram of the diagnostic facility.

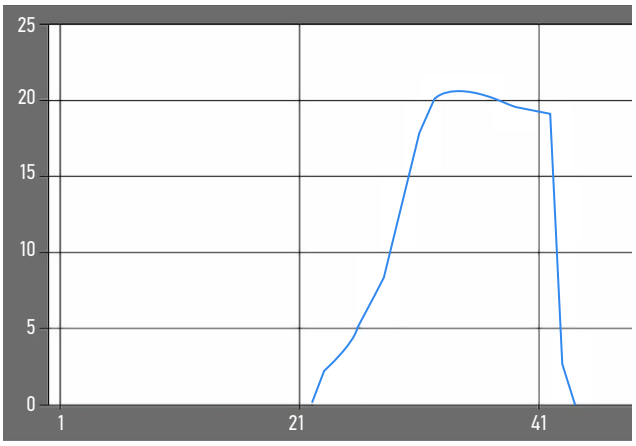

Рис. 7. График повышения давления эталонного гидроцилиндра.
Fig. 7. Graph of pressure increase of the reference hydraulic cylinder.

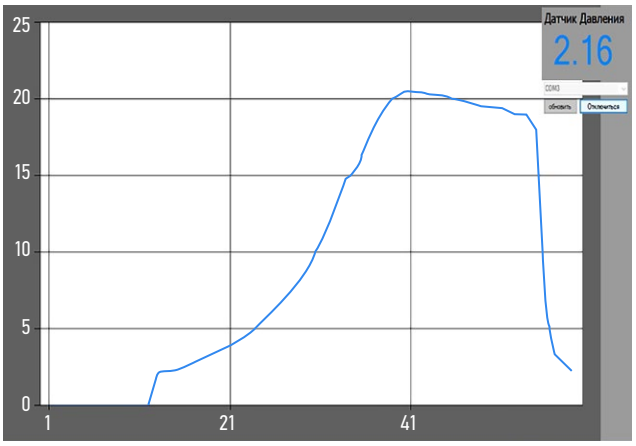

Рис 8. График повышения давления гидроцилиндра, имеющего внутренние утечки.
Fig. 8. Graph of pressure increase of a hydraulic cylinder with internal leaks.

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568992

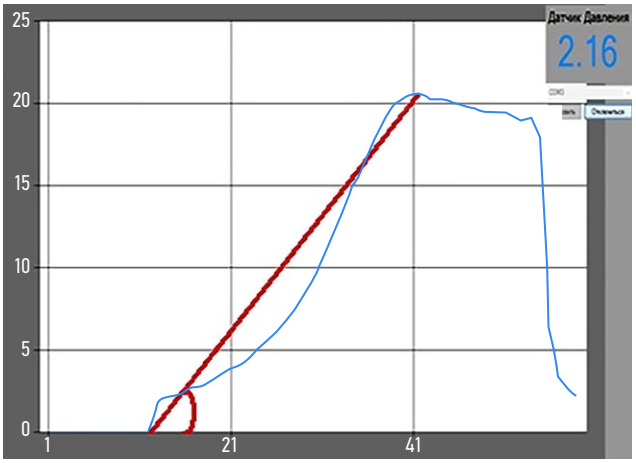

Рис. 9. Угол повышения давления у исправного цилиндра.
Fig. 9. The angle of pressure increase of the fault-free cylinder.

Рис. 10. Поршень гидроцилиндра вместе с уплотнениями.
Fig. 10. A hydraulic cylinder piston together with seals.

В качестве диагностического параметра предлагаем использовать угол повышения давления, пример указан на рис. 9.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Скорость нарастания давления (угол повышения давления) можно использовать в качестве диагностического параметра, который характеризует степень износа уплотнительных элементов на поршне или степень износа внутренней поверхности гильзы гидроцилиндра. При проведении испытаний (при давлении 2,1 МПа) было зафиксировано, что на новых уплотнительных кольцах на поршне угол нарастания давления составил 58 градусов. При установленных поршневых уплотнениях, имеющих износ, угол нарастания давления составил 49 градусов. Сами уплотнения вместе с поршнем испытуемого гидроцилиндра представлены на рис. 10. На направляющих и уплотнительном кольце присутствуют следы абразивного износа и экструзии, что приводит к перетечкам рабочей жидкости между полостями.

С помощью данного метода диагностики можно определить область износа внутренней поверхности гильзы. При эксплуатации внутренняя поверхность гильзы гидроцилиндра может испытывать разные контактные усилия, передаваемые поршнем от действия внешней нагрузки. Во время выполнения рабочих операций поршень как правило не использует всю длину гильзы. В зависимости от характера выполняемой работы поршень может большее количество рабочих циклов совершать в средней части или в конце хода поршня. Это формирует разные участники износа внутренней поверхности гильзы. Зоны износа гильзы гидроцилиндра представлены на рис. 11.

Для оценки степени износа разных зон гильзы можно использовать предлагаемый метод. Останавливая поршень в разных зонах и получая угол повышения давления возможно получить качественную и количественную оценку степени износа гильзы в разных зонах. При обнаружении зоны с повышенным износом, возможно определить ее размеры (по длине), а также скорость увеличения зоны износа (при проведении замеров во время производственной эксплуатации).

ВЫВОДЫ

Проведенные испытания позволяют сделать ряд выводов. Техническое состояние и остаточный ресурс гидроцилиндров можно определить путем сравнения угла повышения давления на эталонном и на испытуемом гидроцилиндре. Угол повышения давления при организации подпора в сливной линии может быть диагностическим параметром при определении технического состояния гидроцилиндра, позволяет определять изменение его технического состояния.

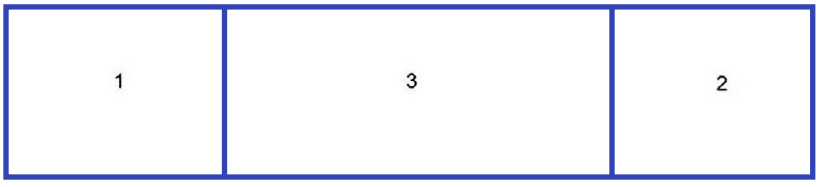

Рис. 11. Зоны износа гильзы гидроцилиндра: 1, 2 — зоны крайних положений поршня, 3 — зона основной работы поршня.
Fig. 11. Wear zones of the hydraulic cylinder sleeve: 1, 2 — the zones of the extreme positions of piston, 3 — the zone of the main operation of a piston.

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-568992

Данный параметр предназначен для косвенного определения степени износа гильзы и уплотнений гидроцилиндра, при котором дальнейшая его эксплуатация является экономически нецелесообразной.

Предлагаемый метод оценки технического состояния позволяет оценивать ресурс гидроцилиндров, как на стенде, так и при выполнении производственных процессов на машине. Это позволит сократить время простоя машин, а также уменьшить расход денежных средств на их обслуживание и ремонт.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. А.П. Миллер — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, подготовка и написание текста статьи; поиск публикаций по теме статьи, проведение опытов, редактирование текста рукописи, создание изображений, экспертная оценка; К.Г. Пугин — написание текста и редактирование статьи. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. A.P. Miller — literature review, collection and analysis of literary sources, preparation and writing of the text of the manuscript; search for publications on the topic of the article, conducting experiments, editing the text of the manuscript, creating images, expert opinion; K.G. Pugin — writing the text and editing the text of the manuscript. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурмистров, В. А., Волков В.Н., Тимохов Р.С. Методика проведения эксплуатационных испытаний гидравлических систем тракторов// Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 8-5. С. 855–858.

2. Зорин, В. А., Минь Н.Ч., Нефелов И.С. Повышение надёжности гидравлических систем строительных машин методами технического диагностирования // Вестник (МАДИ). 2020. № 3(62). С. 24–30.

3. Максименко А. Н., Антипенко Г. Л., Бездников Д. В. и др., Повышение работоспособности гидропривода строительно-дорожных машин // Вестник Белорусско-Российского университета. 2007. №4, С. 24–30.

4. Миллер А.П., Пугин К.Г., Шаихов Р.Ф. Совершенствование диагностики гидравлических систем строительных машин // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2022. Т. 1. С. 15–20. EDN: LKUPQB

5. Конев В.В., Мерданов Ш.М., Бородин Д.М. и др. Условия эксплуатации строительно-дорожных машин// Фундаментальные исследования. 2016. № 12–3. С. 502–507.

6. Шаякбаров И.Э., Пугин К.Г., Власов Д.В. Повышение надежности строительно-дорожных машин в условиях низких температур // Химия. Экология. Урбанистика. 2020. Т. 3. С. 279–283.

7. Рынкевич С.А., Хадкевич И.Ю. Экспериментальные исследования физических свойств гидропривода мобильной машины // Вестник Белорусско-Российского университета. 2015. № 4(49). С. 68–78.

8. Тащилин Л.Н. Место гидро- и пневмоприводов в современной технике // Наука России: Цели и задачи: Сборник научных трудов по материалам XIX международной научной конференции, Екатеринбург, 10 февраля 2020 года. Ч. 1. Екатеринбург: Л-Журнал, 2020. С. 43–50. doi: 10.18411/sr-10-02-2020-03

9. Таепов Э.Ф. Методы повышения надежности деталей гидроприводов строительно-дорожных машин // Актуальные проблемы науки и техники: Сборник научных статей по материалам VIII Международной научно-практической конференции, Уфа, 15 апреля 2022 года. Уфа: Вестник науки, 2022. С. 18–22.

10. Павлов А.И., Тарбеев А.А. Методика определения стратегии замены элементов гидропривода транспортно-технологических машин // Современные наукоёмкие технологии. 2018. № 4. С. 108–112.

11. Павлов А.И., Тарбеев А.А. Результаты исследования гидроцилиндров лесных машин для обоснования диагностических параметров // Вестник ПГТУ. 2019. № 4. С. 135–139.

12. Чиликин А.А., Трушин Н.Н. Сравнительный анализ современных методов диагностики состояния гидравлических систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 3. С. 117–127.

13. Чистоклетов А. А., Пугин К.Г. Оценка состояния элементов гидропривода строительно-дорожных машин с применением современных подходов // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2022. № 4. С. 51–57. doi: 10.15593/24111678/2022.04.06

14. Piramatov U.A., Pugin K.G. Improving the efficiency of existing methods of diagnosing the hydraulic drive of road-building machines // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020, Vol. 786(1). P. 012007. doi: 10.1088/1757-899X/786/1/012007

15. Ni S.X., Zhang Y.F., Liang X.F. Intelligent Fault Diagnosis Mehthod Based on Fault Tree // Journal of Shang Hai Jiaotong University. 2008. Vol. 42(8). P. 1372–1375.

REFERENCES

1. Burmistrov VA, Volkov VN, Timokhov RS. Methodology for conducting operational tests of hydraulic systems of tractors. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy.* 2015;8–5:855–858. (In Russ).
2. Zorin VA, Min NCh, Nefelov IS. Increasing the reliability of hydraulic systems of construction machines using technical diagnostic methods. *Vestnik MADI.* 2020;3(62):24–30. (In Russ).
3. Maksimenko AN, Antipenko GL, Bezdnikov DV, et al. Improving the performance of the hy-draulic drive of road construction machines. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta.* 2007;4:24–30. (In Russ).
4. Miller AP, Pugin KG, Shaikhov RF. Improving diagnostics of hydraulic systems of construction machines. *Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse.* 2022;1:15–20. EDN: LKUPQB
5. Konev VV, Merdanov ShM, Borodin DM, et al. Operating conditions of road construction machines. Fundamentalnye issledovaniya. 2016;12–3:502–507. (In Russ).
6. Shayakbarov IE, Pugin KG, Vlasov DV. Improving the reliability of road construction machines at low temperatures. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika.* 2020;3:279–283.
7. Rynkevich SA, Khadkevich IYu. Experimental studies of the physical properties of a hydrau-lic drive of a mobile machine. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta.* 2015;4(49):68–78. (In Russ).
8. Tashchilin LN. The place of hydraulic and pneumatic drives in modern technology. In: *Science of Russia: Goals and objectives: Collection of scientific papers based on the materials of the XIX International Scientific Conference, Yekaterinburg, February 10, 2020.* Part 1. Ekaterinburg: L-Zhurnal; 2020:43-50. (In Russ). doi: 10.18411/sr-10-02-2020-03
9. Taepov EF. Methods for increasing the reliability of parts of hydraulic drives of road construction machines. In: *Current problems of science and technology: Collection of scientific articles based on the materials of the VIII International Scientific and Practical Conference,* Ufa, April 15, 2022. Ufa: Vestnik nauki; 2022:18–22. (In Russ).
10. Pavlov AI, Tarbeev AA. Methodology for determining the strategy for replacing hydraulic drive elements of transport and technological machines. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii.* 2018;4:108–112. (In Russ).
11. Pavlov AI, Tarbeev AA. Results of a study of hydraulic cylinders of forestry machines to substantiate diagnostic parameters. *Vestnik PGTU.* 2019;4:135–139. (In Russ).
12. Chilikin AA, Trushin NN. Comparative analysis of modern methods for diagnosing the condition of hydraulic systems. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki.* 2014;3:117–127. (In Russ).
13. Chistokletov AA, Pugin KG. Assessment of the condition of hydraulic drive elements of road construction machines using modern approaches. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya.* 2022;4:51–57. (In Russ). doi: 10.15593/24111678/2022.04.06
14. Piramatov UA, Pugin KG. Improving the efficiency of existing methods of diagnosing the hydraulic drive of road-building machines. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020;786(1):012007. doi: 10.1088/1757-899X/786/1/012007
15. Ni SX, Zhang YF, Liang XF. Intelligent Fault Diagnosis Mehthod Based on Fault Tree. *Journal of Shang Hai Jiaotong University.* 2008;42(8):1372–1375.

ОБ АВТОРАХ

*** Миллер Александр Павлович,**
аспирант кафедры автомобили и технологические машины;
ассистент кафедры технического сервиса и ремонта машин;
адрес: Российская Федерация, 614990, Пермь,
Комсомольский пр-т, д. 29;
ORCID: 0000-0001-7741-8614;
eLibrary SPIN: 8388-0646;
e-mail: aleksandrmillera@mail.ru

Пугин Константин Георгиевич,
доцент, д-р техн. наук,
профессор кафедры автомобили и технологические машины;
заведующий кафедрой строительных технологий;
ORCID: 0000-0002-1768-8177;
eLibrary SPIN: 7972-1668;
e-mail: 123zzz@rambler.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

AUTHORS' INFO

*** Alexander P. Miller,**
Postgraduate of the Automobiles and Technological Machines Department; Assistant of the Technical Service and Repair of Machines Department;
address: 29 Komsomolsky avenue, Perm 614990, Russian Federation;
ORCID: 0000-0001-7741-8614;
eLibrary SPIN: 8388-0646;
e-mail: aleksandrmillera@mail.ru

Konstantin G. Pugin,
Associate Professor, Dr. Sci. (Engineering),
Professor of the Automobiles and Technological Machines Department, Head of the Construction Technologies Department;
ORCID: 0000-0002-1768-8177;
eLibrary SPIN: 7972-1668;
e-mail: 123zzz@rambler.ru

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-546006

Original Study Article

The procedure for improving the management of the maintenance and repair process using the neural network technology

Anton V. Shimokhin, Oleg M. Kirasirov

Omsk State Agrarian University, Omsk, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Stable significant degree of wear of on-ground vehicles of transport industry and of agricultural machinery keeps improvement of maintenance management relevant. Development of the procedure for improving the maintenance process using state-of-the-art digital technologies is a relevant technical problem.

AIM: Determination of parameters for development of the procedure of making good managing decisions in the process of maintenance and repair of products in conditions of planned and preventive repair system using the neural network technology.

METHODS: Simulation of operation of the proposed neural network was performed in the Deductor software. The built model of the neural network contains one hidden layer with 10 neurons. A sigmoidal function was used as an activation function in neurons of the neural network model. Tools and definitions of mathematical statistics and algorithms theory were used for solving the given problems.

RESULTS: The cycle variation coefficient is proposed for revealing the necessity of managing impact on the processes of maintenance and repair of products. The proposed values of the coefficient describe stability of product maintenance and repair process. Using these values, the block diagram of the procedure of improving the maintenance process was developed. The tool of the industry 4.0 neural networks was considered. The performed simulation based on the example of vibrational diagnostics of a bearing unit showed that neural networks are capable of defining defects using amplitude-frequency response of a vibration signal that means to interpret the diagnostic information that can be crucial in conditions of expert absence.

The scientific novelty of the study lies in presenting the values of the cycle variation coefficient for making managing decisions in maintenance and repair processes, as well as in obtaining the results of simulation of the neural network operation that confirms potential for their use for interpretation of diagnostic information which is presented in a form of various spectrographs.

CONCLUSIONS: The practical value of the study lies in the potential of using the proposed neural network for development of the system of diagnostic information analysis in condition of expert absence and using the proposed values of the cycle variation coefficient for decision-making in management of maintenance and repair.

Keywords: maintenance; planned and preventive repair system; neural networks.

To cite this article:
Shimokhin AV, Kirasirov OM. The procedure for improving the management of the maintenance and repair process using the neural network technology. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2023;90(6):561–573. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-546006

Received: 31.07.2023 **Accepted:** 01.10.2023 **Published online:** 15.12.2023

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2023

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-546006

Оригинальное исследование

Механизм совершенствования управления процессом технического обслуживания и ремонта с применением нейросетевой технологии

А.В. Шимохин, О.М. Кирасиров

Омский государственный аграрный университет, Омск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Все еще остается значимой степень износа на сухопутном транспорте транспортной отрасли и в сельскохозяйственной технике, что подтверждает актуальность дальнейшего совершенствования организации технического сервиса. С этим связана технической задачи разработки механизма совершенствования процесса технического сервиса с использованием современных цифровых технологий.

Цель работы — определение параметров для разработки механизма принятия качественных управленческих решений в процессе технического обслуживания и ремонта изделий в условиях планово-предупредительной системы ремонта с применением технологии нейронных сетей.

Материалы и методы. Моделирование исследуемого процесса с помощью предлагаемой нейронной сети выполнено в программе Deductor. Построенная модель нейронной сети содержит один скрытый слой с 10 нейронами. В качестве функции активации в нейронах модели нейронной сети использовалась сигмоидная функция. Для решения поставленных задач применялись методы и понятия математической статистики и теории алгоритмов.

Результаты. Для выявления необходимости управленческого воздействия на процессы технического обслуживания и ремонта изделия предложен коэффициент вариации цикла. Предлагаются значения коэффициента, которые характеризуют стабильность процесса ремонта и технического обслуживания изделия. На основе этих значений представлена блок-схема механизма совершенствования процесса технического сервиса. Рассмотрен инструмент индустрии 4.0 — нейронные сети. Проведённое на примере вибродиагностики подшипникового узла моделирование показало, что нейронные сети могут распознавать дефекты по амплитудно-частотной характеристики вибросигнала, то есть интерпретировать диагностическую информацию, что может быть критично в условиях отсутствия эксперта. Научная новизна исследования заключается в представлении значений коэффициента вариации цикла для принятия управленческих решений в процессах технического обслуживания и ремонта, а также в получении результатов моделирования работы нейронной сети, которые подтвердили возможность их использования для интерпретации диагностической информации, предоставляющейся в виде различных спектрограмм.

Заключение. Практическая ценность исследования заключается в возможности использования предложенной нейронной сети для разработки системы анализа диагностической информации в условиях отсутствия экспертов и применении предлагаемых значений коэффициента вариации цикла для принятий решений в управлении техническим сервисом и ремонтом.

Ключевые слова: технический сервис; система планово-предупредительного ремонта; нейронные сети.

Как цитировать:
Шимохин А.В., Кирасиров О.М. Механизм совершенствования управления процессом технического обслуживания и ремонта с применением нейросетевой технологии // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 6. С. 561–573. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-546006

Рукопись получена: 31.07.2023 **Рукопись одобрена:** 01.10.2023 **Опубликована онлайн:** 15.12.2023

moscow polytech

The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International license
© Eco-Vector, 2023

ECO•VECTOR

BACKGROUND

Machine operability can be ensured by improving the physical and mechanical properties of materials and the design of parts, timely and high-quality technical service, and, which is equally important, through high-quality repairs.

In conditions of high wear of equipment, the maintenance and repair system must be improved. One of the options for ensuring the quality of maintenance and repair is improvement of the organization's technical service management system. Using modern diagnostic systems can also ensure timely detection of defects in components and mechanisms. Not all enterprises with these systems may have qualified specialists who can analyze correctly the diagnostic information, a solution to which may be the use of modern digital technologies.

It is worth noting that in Russia, there are two types of maintenance and repair systems, namely, the traditional system of planned preventive maintenance [1–4] and the system of maintenance based on technical condition [5–8].

This study aimed to determine the parameters for developing a mechanism for making quality management decisions in the process of technical maintenance and repair of products under conditions of a planned preventive repair system using neural network technology.

The research was aimed at solving the following problems:

- determination of the general aspects or principles of implementation of a repair system for technical objects for various purposes;
- identification of a parameter for assessing the impact of management influences on the process of maintenance and repair;
- analysis of the application of neural network technology in technical diagnostics;
- development of a mechanism for improving the technical service process.

ANALYSIS OF THE STATE OF THE ART

The system of planned preventive maintenance involves the implementation of maintenance or repair of transport, technological, and industrial equipment at certain intervals of calendar time or operating time.

The alternation and frequency of technical maintenance and repairs based on the national standard GOST R 20793–2009 "Tractors and Agricultural Machines. Maintenance" are displayed in Fig. 1.

The types of car and tractor maintenance are almost the same. However, the period for routine repairs of tractors is not determined by the frequency of mileage; they are performed when necessary and combined with the next maintenance.

For example, the maintenance of agricultural machinery includes scheduled maintenance and overhaul and daily maintenance, maintenance No. 1 (M-1), maintenance No. 2 (M-2), and maintenance No. 3 (M-3).

Maintenance of agricultural machines is characterized by the fact that due to the short period of use of certain machines, some types of maintenance are not conducted. For example, self-propelled agricultural machines are limited to M-2, complex machines coupled with a tractor are limited to M-1, and simple machines (plows, tooth harrows, cultivators for broadcast tillage) are subject to only monthly maintenance. Meanwhile, all other types of maintenance and repairs are performed during the storage period.

The frequency of vehicle maintenance is determined by mileage and varies depending on operating conditions.

Data from the national standard GOST R 21624–81 "System for maintenance and repair of automotive equipment. Requirements for operational manufacturability

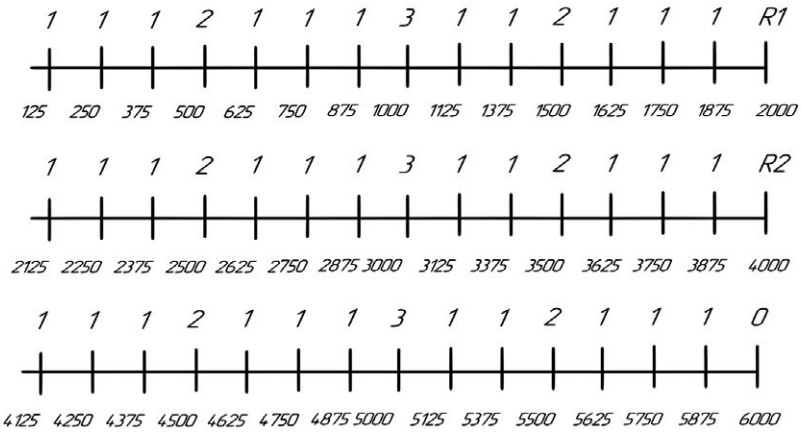

Рис. 1. Шкала периодичности и чередования технического обслуживания и ремонтов тракторов: *1* — ТО-1; *2* — ТО-2; *3* — ТО-3.
Fig. 1. Scale of frequency and sequence of maintenance and repairs of tractors: *1* — ТМ-1; *2* — ТМ-2; *3* — ТМ-3.

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-546006

and maintainability of products" for Central Russia and the frequency of maintenance are summarized in Table 1.

Thus, it is typical for a planned preventive repair system to assign equal intervals between maintenance (repairs), which can vary for different objects depending on the intensity and operating conditions.

The Federal State Statistics Service's "Transport of Russia. Information and statistical bulletin" noted the average wear in land transport of the transport industry of the Russian Federation to be 41.9%, while the "Industrial Production in Russia" indicated the wear value for 2021 for fixed assets of manufacturing production to be approximately 51%. These wear values are significant; therefore, improving the organization of technical service currently remains relevant. In addition, a number of factors can influence the technical condition, namely, wear of machinery and equipment [9] and the lack of qualified repair personnel in organizations in various industries [10, 11].

In addition, ensuring the trouble-free performance of products by their functions is especially important for industries such as transport and agricultural machinery. The main tasks of transport include qualitative satisfaction of the needs of the national economy and population for transportation, and agricultural machinery must ensure the timely completion of certain work. For example, for agricultural organizations, there is a risk of crop loss, and to prevent this, the crop must be harvested at a strictly defined time.

Thus, we can highlight the general principles of functioning of the planned preventive repair system for such types of equipment as industrial equipment, transport, and agricultural machines, and there is an appointment of maintenance and repair periods at equal intervals of time or operating time. It is worth noting that improvement of technical service is possible by ensuring the quality of management of this process.

Table 1. Frequency of maintenance types
Таблица 1. Периодичность видов технического обслуживания

Product type	Maintenance frequency			
	Daily maintenance	M-1	M-2	Maintenance according to vehicle log books
		km, no less		
Light motor vehicles	Once a working day, regardless of the number of work shifts	5000	20000	10000
Buses		5000	20000	
Trucks, buses based on trucks or using their main units		4000	16000	
Trailers and semitrailers		4000	16000	
All-wheel drive vehicles		4000	16000	

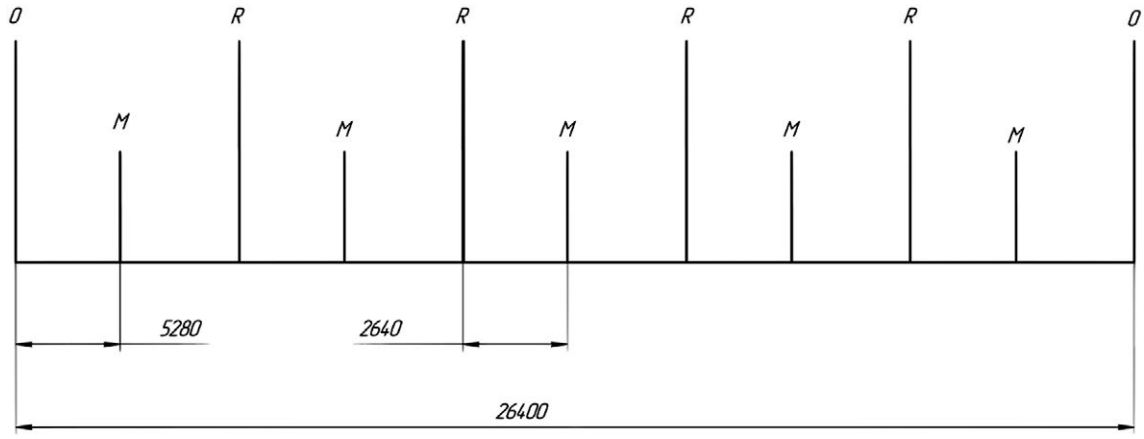

Fig. 2. Diagram of the repair cycle of the 1A616 machine: *R* — repair; *O* — overhaul; *M* — maintenance.
Рис. 2. Диаграмма ремонтного цикла станка 1А616: *R* — ремонт; *O* — капитальный ремонт; *M* — техническое обслуживание.

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-546006

PROBLEM SOLUTION

The review and analysis of literature sources showed that in the process of maintenance and repair, certain management decisions can be made, namely, searching for a provider of maintenance and repair services, determining the timing of maintenance and repairs, and determining the equipment for repair.

The national standard GOST R 18322–2016 "Equipment maintenance and repair system" adopts the concept of "maintenance (repair) cycle" as the smallest repeating interval of time or running time of an object, during which all established types of periodic maintenance (repair) are performed in a certain sequence based on documentation requirements, and the concept of "frequency of maintenance (repair)" as the time interval, or running time, between a given type of maintenance (repair) and the subsequent one of the same type or another type of greater complexity.

For tractors, their maintenance cycle is assumed to be 125 engine hours and the frequency of M-2 is 500 engine hours; for motor cars, the maintenance cycle is 5000 km and the frequency of M-2 is 20,000 km; for equipment (taking the 1A616 machine as an example), the maintenance (repair) cycle is 2640 h of operation (Fig. 1, 2).

The coefficient of variation of the maintenance (repair) cycle to assess the effect of management influences on the process of maintenance and repair [12]:

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu}, \quad (1)$$

where σ is the root-mean-square (standard) deviation of the actual values of the time interval (running time) between stops for maintenance (repairs, including unplanned ones) and μ is the average value of the time interval (running time) between the product outage for maintenance (repairs, including unplanned ones).

According to mathematical statistics and process control theory [13, 14], if the coefficient of variation is less than 10%, then the degree of data diffusion is insignificant and the process under study can be considered stable and controllable; at 10%–25%, the degree of data diffusion is average, the process has some deviations in the parameter(s); at values greater than 25%, the degree of data diffusion is large and the process has a significant scatter in parameters, is unstable, and uncontrollable. In accordance with these judgments, the following ranges of values of the parameter under consideration are proposed (Fig. 3):

- $0 < C_v < 10$ for group of products, %, which is characterized by good technical condition, almost all repairs are performed on schedule, minor fluctuations in the coefficient can be associated with various production tasks and operating conditions;
- $10 < C_v < 25$ for a group of products, %, which is characterized by random failures, if they lead to significant losses in production, performance of the main functions of the product, then an analysis of these causes should be performed, followed by a possible search for other technical service providers;
- $C_v > 25$ for a group of products, %, which is characterized by poor technical condition, which leads to significant losses and the need to analyze the causes of these failures.

Thus, the parameter under consideration in the conditions of a planned preventive repair system allows identifying areas of the maintenance and repair process where management actions are necessary. If the values exceed 10% with significant losses for repairs or exceed 25%, we propose searching for the causes of failures and, on its basis, selecting a technical service provider and improving the personnel competence.

Note that this coefficient may vary slightly due to production needs, but for significant shifts, a large value of the dispersion coefficient will occur during unplanned shutdowns associated with recovery from an unexpected product failure.

MECHANISM FOR IMPROVING THE TECHNICAL SERVICE PROCESS USING NEURAL NETWORK TECHNOLOGY

Let us consider Industry 4.0, i.e., neural networks that can learn based on the data provided and generalize them. Neural network-based software products can replace experts and specialists in their absence in various areas of management and provide decision support.

At certain values of the V_c parameter proposed in this article in technical service management, a decision can be made to "search for a technical service provider."

Previous studies [15, 16] presented the possibility of using neural network-based algorithms to assess the level of reliability of technical service providers and their assessment based on reviews on the internet [16]. These algorithms can be used as an additional tool in making decisions regarding supplier selection. Thus, neural networks can select appropriate suppliers based on indicators such as time of presence on the market, the ratio of positive and negative reviews, etc. To test the ability of neural networks to analyze positive and negative reviews on the internet, a separate study was performed on reviews of car maintenance services organizations with a neural network created using Python. Its training involved using expressions from these reviews. This neural network displayed high-quality work with a large array of data on reviews of car maintenance companies, which is currently one of the ways to obtain characteristics of service providers.

Previous works [18–23] analyzed the operation of neural networks with graphical information aiming

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-546006

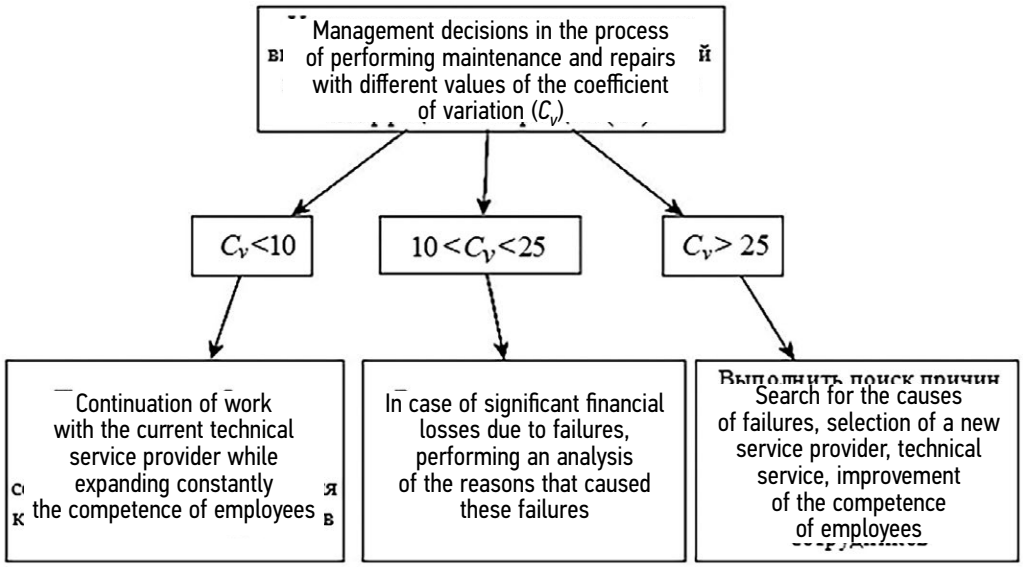

Fig. 3. Block diagram of the application of the maintenance (repair) cycle variation coefficient in process management.
Рис. 3. Блок-схема применения коэффициента вариации цикла технического обслуживания (ремонта) в управлении процессом.

at application in technical diagnostics. For example, when diagnosing an engine using a motor tester, oscillograms are obtained [20], using which a neural network can determine defects [20, 22].

Also, I.V. Karakulov [18] reported the results of vibration diagnostics of pumping equipment obtained in the form of vibration–velocity spectrograms. Their information was stored in graphic files. The author developed and prepared neural networks based on these data. Overall, good accuracy was achieved in recognizing the technical condition using a neural network according to the classification of satisfactory, acceptable, and unacceptable. The neural network in this simulation analyzed graphical information (vibration–velocity spectrograms). A.E. Yablokov [22] conducted an experiment in the Matlab environment to study the ability of neural networks to operate with graphical information that carries data on the technical condition of an object and obtained vibration diagnostic results for various conditions of gear units. He concluded that the neural network recognized the states of gears from images saved in files of 781 × 781 pix with 95% accuracy.

Another group of researchers [23] obtained the results of vibration diagnostics of bearings with various technical conditions and developed a neural network-based algorithm to analyze spectrograms, showing the ability to determine correctly the technical condition of bearings from graphical information with 75%–80% precision.

Research data and many other similar experiments allows drawing a conclusion on the possibility of using neural network technology as a tool for using complex diagnostic equipment, including in the absence of an expert.

Thus, it becomes possible to use expensive, complex equipment in the absence of experts.

To simulate the process of defect recognition, we consider the example of vibration diagnostics of rolling bearings. Bearing defects may include wear on the surface of the outer and inner rings and rolling elements. There may be defects in the installation of rolling bearings and lubrication defects. All of them are diagnosed by vibration diagnostic methods when, depending on the defect, they manifest themselves in the form of increased amplitude at a certain frequency.

Let us consider the 6226-2RS TIMKEN bearing, which is used in various mechanisms and industrial equipment. Using known dependencies [24], we construct a frequency map of the occurrence of defects.

Table 2 summarizes F_{dnk}($F1$) (which is the frequency at which the defects in the bearing outer ring appear with increased vibration amplitude), F_{dvk}($F2$) (the frequency at which the defects in the bearing inner ring appear with increased vibration amplitude), F_s($F3$) (the frequency at which the defects in the bearing separator appear with increased vibration amplitude), and F_m($F5$) (the frequency at which an installation defect manifests itself with increased vibration amplitude). For inhomogeneous radial interference, f_p is the rotation speed of the shaft or inner ring of the bearing, z is the number of rolling elements, d is the inner diameter of the bearing, and D is the outer diameter of the bearing.

To create a data set for preparing a neural network, the rotation speed f_p is assumed to be 1200 rpm or 20 Hz. Then the defects from Table 2 will create increased amplitude at the following frequencies for a given bearing (Table 3).

Based on the dependencies presented in Table 2, we will create a data set for preparing a neural network. In this set,

the highest amplitude values will be at frequencies that correspond to certain defects, if any exists (Table 2). At other frequencies, it will simulate amplitudes with a value of approximately 30% of the peak values.

The data set in this case represents a collection of input vectors, while the output vectors correspond to them. Each input vector *X* is in turn referred to the input of the neural network, and its output is compared with a given output vector *D* paired with an input vector, after which the parameters of the neural network are adjusted in such a way as to reduce the difference between the actual and required output of the network.

The input vector will be formed from the frequencies with the largest amplitudes. The output vector in this case will be a vector with four defects, in which the frequencies from Table 2, corresponding to these defects, will have the largest amplitudes.

A fragment of the input signal matrix is listed in Table 4.

Accordingly, each set (row) of amplitudes at certain frequencies can correspond to a specific defect, and a matrix of output vectors can be obtained (Table 5).

Based on a matrix of input signals containing 200 records, a neural network was prepared in the Deductor software package. Meanwhile, when modeling the neural network, the following designations of types of defects were used: outer ring defect — DNK; inner ring defect — DVK; separator defect — DS; nonuniform radial interference — NRN. Thus, a neural network model was developed, which contains 2 hidden layers of 9 neurons in layer 1 and 10 neurons in layer 2. The graph of this network is illustrated in Fig. 4. The sigmoid function was used as the activation function [12, 15].

The developed neural network recognized correctly the type of defect from the matrix of input signals and was also able to recognize the defect from the new values of the input signals. The simulation confirmed that neural networks can classify or recognize a defect based on the amplitude–frequency characteristics of the vibration signal obtained through vibration diagnostics.

Their ability to recognize defects expands the possibility of using complex diagnostic equipment in the absence of experts. Let us present the mechanism for improving the technical service process in Fig. 5.

In this mechanism, ensuring the quality of management decisions in the process of maintenance and repair is achieved by using the variation parameter of the maintenance (repair) cycle and a software product based on a neural network, as well as neural network technology in technical diagnostics [25, 26].

Table 2. Frequency map of defects of the type 6226-2RS TIMKEN bearing

Таблица 2. Частотная карта дефектов подшипников типа 6226-2RS TIMKEN

Wear defects	Frequency formula (sign of defect)	Value, Hz
Wear defects		
Outer ring defect	$F_{\text{днк}} = \frac{f_{\text{р}} z}{2}\left(1-\frac{d}{D}\right)$	$F1 = 2.64 f_p$
Inner ring defect	$F_{\text{двк}} = \frac{f_{\text{р}} z}{2}\left(1+\frac{d}{D}\right)$	$F2 = 9.36 f_p$
Separator defect	$F_{\text{с}} = \frac{f_{\text{р}}}{2}\left(1-\frac{d}{D}\right)$	$F3 = 0{,}22 f_p$
Installation defects		
Nonuniform radial interference	$F_m = 1{,}5 f_p$	$F_5 = 1{,}5 * f_p$

Table 3. Frequency of appearing of defects at f_p = 20 Hz for the 6226-2RS TIMKEN bearing

Таблица 3. Частоты проявления дефектов при f_p = 20 Гц для подшипника 6226-2RS TIMKEN

Type of defect	Frequency of defect appearance during vibration diagnostics Hz (f_p = 20 Гц)
Wear defects	
Outer ring defect	50
Inner ring defect	200
Separator defect:	5
Installation defects	
Nonuniform radial interference	30

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-546006

CONCLUSION

Based on the analysis of planned preventive repair systems for various types of agricultural machinery, vehicles, and industrial equipment, the following conclusions can be drawn:

- For all studied types of equipment, equal intervals of operating time or running time are assigned between the same types of maintenance and repair. To identify the need for managerial influence on the processes of maintenance and repair of a product, a cycle variation coefficient is proposed, which is determined by the values of time intervals (running time) between equipment outage for maintenance (repairs, including unplanned repair). Coefficient values are proposed that characterize the stability of the product repair and maintenance process. In case of instability of the maintenance and repair process, we proposed searching for the causes of failures and, on its basis, selecting a new technical

Table 4. Fragment of the matrix of input signals
Таблица 4. Фрагмент матрицы входных сигналов

	5	30	50	70	90	100	125	150	200
1	10	3	4	2	3	3	4	4	3
2	4	3	11	5	3	4	4	5	3
3	5	15	4	3	5	4	3	4	5
4	5	4	6	5	6	3	5	6	20
5	12	4	5	4	5	3	5	4	3
6	15	5	4	3	3	4	4	5	5
7	4	15	4	4	4	3	5	5	5
8	5	16	5	4	4	3	4	5	3
9	5	4	12	3	5	5	4	4	5
10	4	5	15	3	5	4	5	3	5
11	5	5	3	4	5	4	3	5	15
12	3	3	3	4	2	2	4	3	10

Table 5. Matrix of output vectors of types of defects
Таблица 5. Матрица выходных векторов видов дефектов

	Outer ring defect	Inner ring defect	Separator defect	Nonuniform radial interference
1	0	0	1	0
2	1	0	0	0
3	0	0	0	1
4	0	1	0	0
5	0	0	1	0
6	0	0	1	0
7	0	0	0	1
8	0	0	0	1
9	1	0	0	0
10	1	0	0	0
11	0	1	0	0
12	0	1	0	0

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-546006

service provider and improving the competence of the employees.

- It is demonstrated that the ability of neural networks to interpret graphical information allows using them in technical diagnostics at the stage of analyzing diagnostic information, which in turn leads to the use of complex diagnostic equipment in the absence of experts.
- Input signal matrices have been developed to elaborate a neural network model based on the known amplitude–frequency characteristics of vibration of bearings for various defects. The simulation confirmed the ability of the neural network to classify the type of defect based on the amplitude–frequency characteristics of the vibration signal. In our opinion, neural networks can recognize a defect based on the results of other diagnostic methods that provide diagnostic information in the form of various spectrograms. The constructed neural network model comprises 1 hidden layer with 10 neurons, layer 1 with 9 inputs, and an output layer with 4 outputs. The sigmoid function was used as the activation function in the neurons of the neural network model.
- Therefore, a mechanism for improving the technical service process is proposed, which includes assessment of the stability of the maintenance and repair process. Based on this assessment, management decisions are made for the maintenance and repair process. The mechanism also includes the use of neural network technology to conduct technical diagnostics and support decision-making in searching for a supplier providing repair services.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. A.V. Shimokhin — search for publications on the topic of the article, writing the text of the manuscript, creating images; O.M. Kirasirov — editing the text of the manuscript, expert opinion, approval of the final version. The authors confirm that their authorship complies with the international ICMJE criteria (all authors made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. А.В. Шимохин — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, создание изображений; О.М. Кирасиров — редактирование текста рукописи, экспертная оценка, утверждение финальной версии. Авторы подтверждают соответствие своего

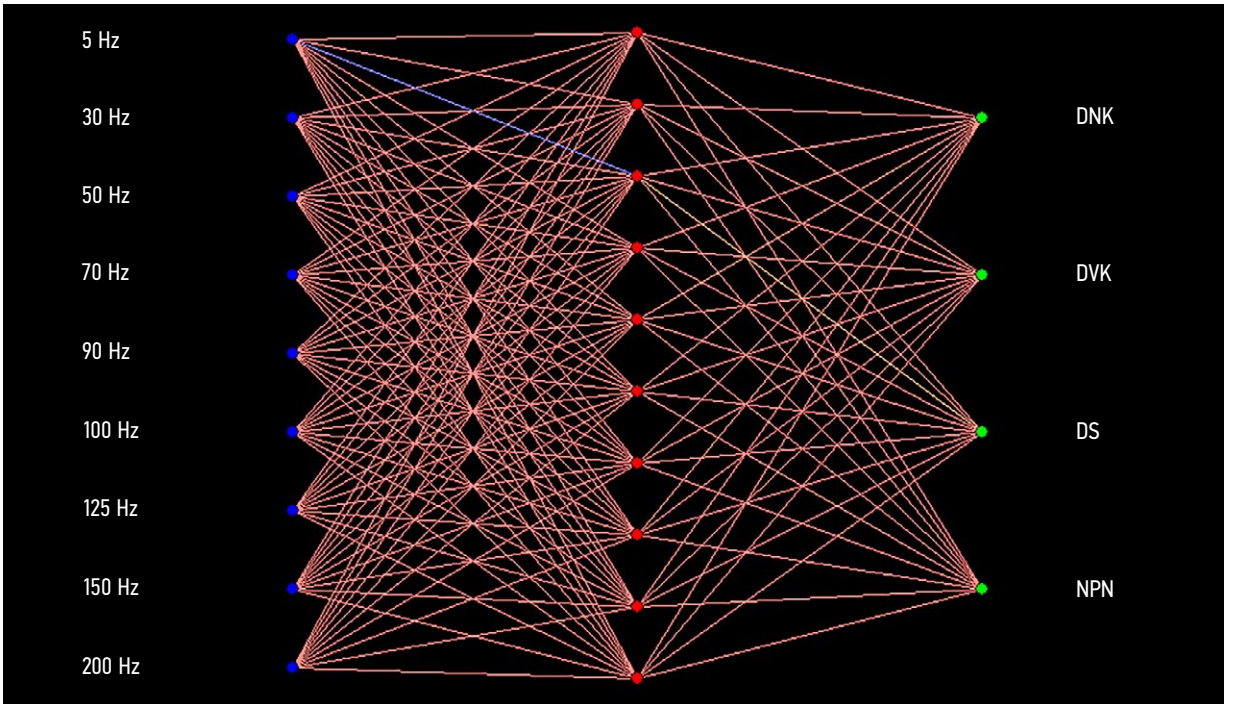

Fig. 4. Graph of the developed neural network.
Рис. 4. Граф разработанной нейронной сети.

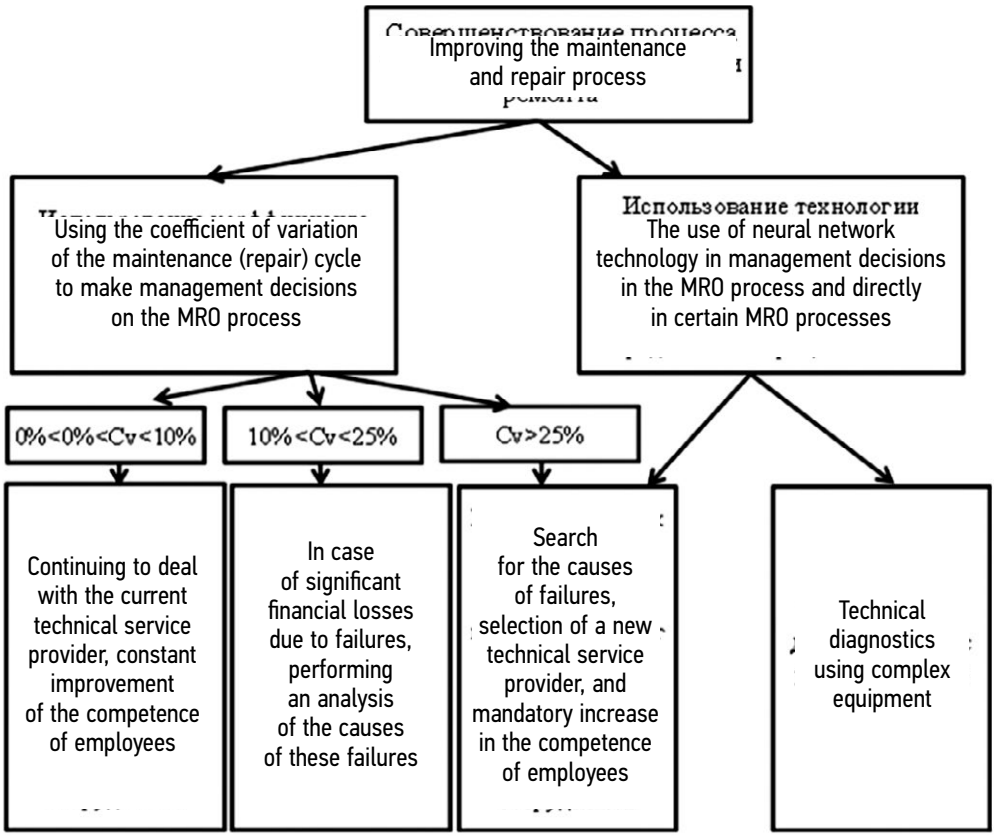

Fig. 5. Block diagram of the procedure for improving the maintenance process.
Рис. 5. Блок-схема механизма совершенствования процесса технического сервиса.

авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.
Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

REFERENCES

1. Myalo OV, Myalo VV, Prokopov SP. Theoretical substantiation of machine-tractor fleet technical maintenance system on the example of Omsk region agricultural enterprises. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018;1059:012005. doi: 10.1088/1742-6596/1059/1/012005
2. Myalo OV, Prokopov SP. Material and technical support of the enterprises of the agro-industrial complex of the Omsk region management and certification of the technical component of the production processes in crop production. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019;582(1):012028. doi: 10.1088/1757-899X/582/1/012028
3. Iovlev GA, Pobedinsky VV, Goldina II. Economic justification for the optimal terms of use and frequency of maintenance and repair of machines. *Vestnik NGIEI.* 2021;4(119):105–119. (In Russ.) doi: 10.24412/2227-9407-2021-4-105-119
4. Toygambaev SK, Didmanidze ON. Features of the development of the technological process for maintaining tractors in the farm's machine and tractor fleet. *Vestnik Kurganskoy GSKhA.* 2021;1(37):74–80. (In Russ.) doi: 10.52463/22274227_2021_37_74
5. Kupriyanova TM, Rastimeshin VE. *TRM system: more than a quarter of a century in Russia. Japanese theory. Russian practice. Experience of the TAIR Consulting Community.* Moscow: Buki Vedi; 2019. (In Russ.)
6. Ichikawa A, Takagi I, Takebe Y, et al. *TPM in a simple and accessible presentation.* Moscow: Standarty i kachestvo; 2008. (In Russ.)
7. Akhtulov AL, Ivanova LA, Charushina EB. Measuring the effectiveness of the quality management system as a tool for improving the organization's activities. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019;537:042059. doi: 10.1088/1757-899X/537/4/042059
8. Akhtulov AL, Ivanova LA, Charushina EB. Analysis of the formation and evaluation of performance indicators and efficiency of the organization's management system processes. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020;1515:052032. doi: 10.1088/1742-6596/1515/5/052032

9. Redreev GV, Okunev GA, Voinash SA. Efficiency of Usage of Transport and Technological Machines. In: *Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., et al. (eds) Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Cham: Springer; 2020:625–631. doi: 10.1007/978-3-030-22063-1_6

10. Shaikhov RF. Control of production personnel at a motor transport enterprise. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya.* 2019;3:89–95. (In Russ.) doi: 10.15593/24111678/2019.03.11

11. Maltsev DV, Repetsky DS. Control of production personnel when performing vehicle maintenance work. *Mir transporta.* 2020;18(6(91)):238–247. (In Russ.) doi: 10.30932/1992-3252-2020-18-6-238-247

12. Shimokhin AV. Mechanism for transferring a business process of an industrial enterprise to outsourcing. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya «Ekonomika i ekologicheskiy menedzhment».* 2019;1:45–51. (In Russ.) doi: 10.17586/2310-1172-2019-12-1-45-51

13. Baranova EM, Baranov AN, Borzenkova SYu, et al. Study of information systems efficiency indicators using the STATISTICA program. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki.* 2022;10:199–205. (In Russ.) doi: 10.24412/2071-6168-2022-10-199-205

14. Karimova VA, Mukhitdinova ML. Modeling processes for managing and forecasting inventories at an enterprise. *Nauka i mir.* 2019;5–2(69):33–36. (In Russ.)

15. Shimokhin AV. Semantic analysis of reviews about suppliers based on the use of neural network technology. *Fundamentalnye issledovaniya.* 2021;5:117–121. (In Russ.) doi: 10.17513/fr.43048

16. Myalo OV. Mathematical Modeling and Information Technologies in the Management of Tractor Maintenance Operations. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019;582:012014. doi: 10.1088/1757-899X/582/1/012014

17. Rubtsova YuV. A neural network model to overcome the degradation of text classification results by sentiment. *Problemy informatiki.* 2018;2(39):4–14. (In Russ.)

18. Karakulov IV. Classification of the technical condition of water pumping equipment using convolutional neural networks. *Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya.* 2022;2:37–53. (In Russ.) doi: 10.15593/2499-9873/2022.2.02

19. Katsuba YuN, Grigorieva LV. Application of artificial neural networks to predict the technical condition of products. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatelskiy zhurnal.* 2016;3–2(45):19–21. (In Russ.) doi: 10.18454/IRJ.2016.45.008

20. Ivanov AI. Using the engine diagnostic technique using a motor tester and a CSS script. *E-Scio.* 2020;5(44):779–787. (In Russ.)

21. Budko SI, Kozarez IV, Kozlov SI, et al. Theoretical research on improving the process of diagnosing diesel engines. *Vestnik Bryanskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii.* 2020;1(77):50–55. (In Russ.)

22. Yablokov AE, Zhila TM. Application of CNN in vibration diagnostics using spectrograms and wavelet scalograms of the signal. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki.* 2021;12:452–456. (In Russ.) doi: 10.24412/2071-6168-2021-12-452-457

23. Yablokov AE, Zhila TM, Generalov AS. Equipment diagnostics using vibration signal spectrograms using machine learning methods. *Innovatsionnye tekhnologii proizvodstva i khraneniya materialnykh tsennostey dlya gosu-darstvennykh nuzhd.* 2021;15:288–297. (In Russ.)

24. Buynosov AP, Vasilyev VA, Baitov AS, et al. Bench testing of algorithms for diagnosing rolling bearings of an on-board diagnostic system and forecasting the residual life of the main and auxiliary units of the MPVS. *Vestnik Uralskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya.* 2021;3(51):40–49. (In Russ.) doi: 10.20291/2079-0392-2021-3-40-49

25. Iovlev GA, Goldina II, Zorkov VS. Technical service in agriculture and the digitalization process. *Agrarnoe obrazovanie i nauka.* 2019;2:7. (In Russ.)

26. Tarasenko VE, Rolich OCh, Yakubovich OA, et al. Signal processing algorithms for complex diagnostics of automobile and tractor engines using a multi-channel integrated system. *Trudy NAMI.* 2021;1(284):6–15. (In Russ.) doi: 10.51187/0135-3152-2021-1-6-15

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Myalo O.V., Myalo V.V., Prokopov S.P. Theoretical substantiation of machine-tractor fleet technical maintenance system on the example of Omsk region agricultural enterprises // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. Vol. 1059. P. 012005. doi: 10.1088/1742-6596/1059/1/012005

2. Myalo O.V., Prokopov S.P. Material and technical support of the enterprises of the agro-industrial complex of the Omsk region management and certification of the technical component of the production processes in crop production // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 582, N. 1. P. 012028. doi: 10.1088/1757-899X/582/1/012028

3. Иовлев Г.А., Побединский В.В., Голдина И.И. Экономическое обоснование оптимальных сроков использования и периодичности технического обслуживания и ремонта машин // Вестник НГИЭИ. 2021. № 4(119). С. 105–119. doi: 10.24412/2227-9407-2021-4-105-119

4. Тойгамбаев С.К., Дидманидзе О.Н. Особенности разработки технологического процесса технического обслуживания тракторов в машинно-тракторном парке хозяйства // Вестник Курганской ГСХА. 2021. № 1(37). С. 74–80. doi: 10.52463/22274227_2021_37_74

5. Куприянова Т.М., Растимешин В.Е. Система TPM: более четверти века в России. Японская теория. Российская практика. Опыт Консультационного сообщества «ТАИР». М.: Буки Веди, 2019.

6. Итикава А., Такаги И., Такэбэ Ю. и др. TPM в простом и доступном изложении. М.: Стандарты и качество, 2008.

7. Akhtulov A.L., Ivanova L.A., Charushina E.B. Measuring the effectiveness of the quality management system as a tool for improving the organization's activities // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2019. Vol. 537. P. 042059. doi: 10.1088/1757-899X/537/4/042059

8. Akhtulov A.L., Ivanova L.A., Charushina E.B. Analysis of the formation and evaluation of performance indicators and efficiency of the organization's management system

processes // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. Vol. 1515. P. 052032. doi: 10.1088/1742-6596/1515/5/052032

9. Redreev G.V., Okunev G.A., Voinash S.A. Efficiency of Usage of Transport and Technological Machines // Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., et al. (eds) Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer, 2020. P. 625–631. doi: 10.1007/978-3-030-22063-1_6

10. Шаихов Р.Ф. Контроль производственного персонала на автотранспортном предприятии // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2019. № 3. С. 89–95. doi: 10.15593/24111678/2019.03.11

11. Мальцев Д.В., Репецкий Д.С. Контроль производственного персонала при выполнении работ технического обслуживания автомобилей // Мир транспорта. 2020. Т. 18, № 6(91). С. 238–247. doi: 10.30932/1992-3252-2020-18-6-238-247

12. Шимохин А.В. Механизм передачи бизнес-процесса промышленного предприятия на аутсорсинг // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». 2019. № 1. С. 45–51. doi: 10.17586/2310-1172-2019-12-1-45-51

13. Баранова Е.М., Баранов А.Н., Борзенкова С.Ю. и др. Исследование показателей эффективности информационных систем с помощью программы STATISTICA // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 10. С. 199–205. doi: 10.24412/2071-6168-2022-10-199-205

14. Каримова В.А., Мухитдинова М.Л. Моделирование процессов управления и прогнозирования запасов на предприятии // Наука и мир. 2019. № 5–2(69). С. 33–36.

15. Шимохин А.В. Семантический анализ отзывов о поставщиках на основе применения нейросетевой технологии // Фундаментальные исследования. 2021. № 5. С. 117–121. doi: 10.17513/fr.43048

16. Myalo O.V. Mathematical Modeling and Information Technologies in the Management of Tractor Maintenance Operations // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2019. Vol. 582. P. 012014. doi: 10.1088/1757-899X/582/1/012014

17. Рубцова Ю.В. Модель нейронной сети для преодоления деградации результатов классификации текстов по тональности // Проблемы информатики. 2018. № 2(39). С. 4–14.

18. Каракулов И.В. Классификация технического состояния водонасосного оборудования при помощи сверточных нейронных сетей // Прикладная математика и вопросы управления. 2022. № 2. С. 37–53. doi: 10.15593/2499-9873/2022.2.02

19. Кацуба Ю.Н. Григорьева Л.В. Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования технического состояния изделий // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 3–2(45). С. 19–21. doi: 10.18454/IRJ.2016.45.008

20. Иванов А.И. Использование методики диагностирования двигателя при помощи мотор-тестера и скрипта CSS // E-Scio. 2020. № 5(44). С. 779–787.

21. Будко С.И., Козарез И.В., Козлов С.И. и др. Теоретические исследования по совершенствованию процесса диагностирования дизелей // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 1(77). С. 50–55.

22. Яблоков А.Е., Жила Т.М. Применение СНС в вибродиагностике по спектрограммам и вейвлет-скалограммам сигнала // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 12. С. 452–456. doi: 10.24412/2071-6168-2021-12-452-457

23. Яблоков А.Е., Жила Т.М., Генералов А.С. Диагностика оборудования по спектрограммам вибросигнала методами машинного обучения // Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. 2021. № 15. С. 288–297.

24. Буйносов А.П., Васильев В.А., Баитов А.С. и др. Стендовая отработка алгоритмов диагностирования подшипников качения бортовой системы диагностики и прогноза остаточного ресурса основных и вспомогательных узлов МПВС // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2021. № 3(51). С. 40–49. doi: 10.20291/2079-0392-2021-3-40-49

25. Иовлев Г.А., Голдина И.И., Зорков В.С. Технический сервис в сельском хозяйстве и процесс цифровизации // Аграрное образование и наука. 2019. № 2. С. 7.

26. Тарасенко В.Е., Ролич О.Ч., Якубович О.А. и др. Алгоритмы обработки сигналов при комплексном диагностировании автотракторных двигателей многоканальной интегрированной системой // Труды НАМИ. 2021. № 1(284). С. 6–15. doi: 10.51187/0135-3152-2021-1-6-15

AUTHORS' INFO

*** Anton V. Shimokhin,**
Associate Professor, Cand. Sci. (Economics),
Associate Professor of the Maintenance, Mechanics and Electrical Engineering Department;
address: 1 Institutskaya square, 644008 Omsk, Russian Federation;
ORCID: 0000-0002-2048-3180;
eLibrary SPIN: 2830-8008;
e-mail: schimokhin@yandex.ru

Oleg M. Kirasirov,
Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering),
Associate Professor of the Maintenance, Mechanics and Electrical Engineering Department;
ORCID: 0009-0003-7901-2169;
eLibrary SPIN: 4794-1945;
e-mail: om.kirasirov@omgau.org

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

ОБ АВТОРАХ

*** Шимохин Антон Владимирович,**
доцент, канд. экон. наук,
доцент кафедры технического сервиса, механики и электротехники;
адрес: Российская Федерация, 644008, Омск, Институтская площадь, д. 1;
ORCID: 0000-0002-2048-3180;
eLibrary SPIN: 2830-8008;
e-mail: schimokhin@yandex.ru

Кирасиров Олег Михайлович,
доцент, канд. техн. наук,
доцент кафедры технического сервиса, механики и электротехники;
ORCID: 0009-0003-7901-2169;
eLibrary SPIN: 4794-1945;
e-mail: om.kirasirov@omgau.org

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-569016

Оригинальное исследование

Исследование эффективности нагрева воды в режиме кавитации на начальном этапе приготовления зерновой патоки

В.Н. Нечаев[1], А.В. Алёшкин[2], П.А. Савиных[3]

[1] Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Княгинино, Российская Федерация;
[2] Вятский государственный университет, Киров, Российская Федерация;
[3] Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого, Киров, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Зерновая патока — ценный источник переваримого протеина и кормового сахара для сельскохозяйственных животных. На начальном этапе производства данной кормосмеси существующие устройства и схемы нагрева воды недостаточно эффективны. В этой связи разработано новое устройство для ускоренного нагрева воды пассивного типа.

Цель работы — оценка эффективности применения кавитатора для нагрева воды в установке для производства зерновой патоки.

Методы. Для проведения исследований кавитатор, выполненный в виде конуса с лепестками, угол раствора которого 16°8′, смонтирован в стеклянной трубе нагнетательной ветви водяного контура установки для приготовления зерновой патоки. Лепестки во время проведения опытов устанавливались в трубу прямыми или отогнутыми на 15°. В лабораторных условиях проводился сравнительный эксперимент по нагреву воды объемом 50 л, начиная со значения ее температуры 20°С и через каждый градус до 30°С, как с кавитатором, так и без него. Критериями эффективности процесса выступали: время и удельные энергозатраты нагрева воды.

Результаты. В результате проведенных исследований установлены значения критериев эффективности процесса нагрева воды с использованием кавитатора и без него. Получены линейные зависимости температуры воды от времени нагрева. Показано, что создаваемый эффект кавитации за основанием конуса не стабилен, но, все-таки, более интенсивный за конусом с прямыми лепестками. Отмечено, что коэффициент гидравлического сопротивления для кавитатора с отогнутыми на 15° лепестками больше на 10%, чем с прямыми.

Заключение. Использование кавитатора при нагреве воды на начальном этапе приготовления зерновой патоки повышает эффективность процесса на 20%.

Ключевые слова: кавитатор; эффект кавитации; время нагрева; удельные энергозатраты.

Как цитировать:
Нечаев В.Н., Алёшкин А.В., Савиных П.А. Исследование эффективности нагрева воды в режиме кавитации на начальном этапе приготовления зерновой патоки // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 6. С. 575–583. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-569016

Рукопись получена: 04.09.2023 **Рукопись одобрена:** 15.10.2023 **Опубликована онлайн:** 15.12.2023

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2023

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-569016

Original Study Article

Study of water heating efficiency in cavitation mode at the initial stage of grain molasses preparation

Vladimir N. Nechaev[1], Alexey V. Aleshkin[2], Peter A. Savinykh[3]

[1] Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino, Russian Federation;
[2] Vyatka State University, Kirov, Russian Federation;
[3] Federal Agrarian Scientific Center of the North-East named after N.V. Rudnitsky, Kirov, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Grain molasses is a valuable source of digestible protein and feed sugar for farm animals. At the initial stage of production of this feed mixture, the existing devices and water heating schemes are not effective enough. Therefore, a new passive-type device for accelerated heating of water has been developed.

AIM: Evaluation of efficiency of a cavitator for heating water at the grain molasses production plant.

METHODS: In order to conduct studies, a cavitator made in the form of a cone with vanes, the apex angle of which is 16°8′, is installed in a glass pipe of the injection branch of the water circuit of the plant for the preparation of grain molasses. During the experiments, the vanes were installed in the pipe straight or bent by 15°. In laboratory conditions, a comparative experiment was carried out to heat water with a volume of 50 liters, starting from its temperature of 20°C and through each degree to 30°C, both with and without the cavitator. The process efficiency criteria were: time and specific energy consumption of water heating.

RESULTS: As a result of the conducted studies, the values of the efficiency criteria for the water heating process with and without the cavitator are found. Linear dependence of water temperature on heating time is obtained. It has been shown that the created cavitation effect behind the base of the cone is not stable, but still more intense behind the cone with straight petals. It is noted that the coefficient of hydraulic resistance for the cavitator with vanes bent by 15 ° is 10% greater than with straight ones.

CONCLUSIONS: Use of a cavitator when heating water at the initial stage of preparing grain molasses increases efficiency of the process by 20%.

Keywords: cavitator; cavitation effect; heating time; specific energy consumption.

To cite this article:
Nechaev VN, Aleshkin AV, Savinykh PA. Study of water heating efficiency in cavitation mode at the initial stage of grain molasses preparation. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2023;90(6):575–583. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-569016

Received: 04.09.2023 **Accepted:** 15.10.2023 **Published online:** 15.12.2023

The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International license
© Eco-Vector, 2023

ОБОСНОВАНИЕ

Как известно, показатели продуктивности и здоровья сельскохозяйственных животных на 60–70% зависят от качества кормов и уровня кормления, а в остальном определяются генетическим потенциалом животных и условиями их содержания. При этом на приготовление кормов в животноводстве приходится до 30% всех энергозатрат кормопроизводства, включая такие операции как заготовку и раздачу кормов [1]. В свою очередь, удельные затраты энергии на производство кормов в России в 1,5–3 раза превосходят аналогичные показатели стран ЕС, при этом продуктивность животных ниже на 35–50% [2]. Особенно энергоемким остается процесс тепловой обработки кормов, на которую ежегодно затрачивается до 1,8 млрд. кВт·ч электроэнергии [3]. В связи с этим вопрос снижения удельных затрат энергетических ресурсов при приготовлении корма, в том числе, обработанного тепловыми способами, является актуальным. В настоящее время в фермерских хозяйствах наиболее широкое применение находит технология влаготермомеханической обработки зерна злаковых культур в зерновую патоку, сбалансированную по переваримому протеину и кормовым сахарам [4]. Чаще всего в устройствах для приготовления соответствующего корма нагрев воды малоэффективен и требует монтажа дополнительного активного источника тепла, что повышает себестоимость готового продукта. Экспериментально-теоретических исследований, посвященных применению пассивных источников тепла, создающих, например, эффект кавитации в устройствах производства зерновой патоки практически нет. Поэтому совершенствование технологии и оборудования для приготовления зерновой патоки носит, на наш взгляд, своевременный характер.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью исследования является оценка эффективности применения кавитатора для нагрева воды в установке для производства зерновой патоки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ранее авторами настоящей статьи изучены вопросы приготовления патоки из зерна злаковых культур (рожь, пшеница, ячмень), где были определены оптимальные режимы и настроечные параметры используемой установки [5]. Однако, остался не до конца изучен вопрос предварительного нагрева воды до температуры 30°С, которая обусловлена технологией производства патоки.

Для устранения данной проблемы разработана лабораторная установка (рис. 1), состоящая из рамы 1, водяного контура, включающего в себя технологическую емкость 2, пассивный измельчитель 3, центробежный насос 4 1СМ65-50-160/2-м с приводом от электродвигателя 5 АИР 100L2 У2 мощностью 5,5 кВт и системы всасывающего 6 и нагнетательного 7 трубопроводов.

На горизонтальном участке нагнетательной ветви предусмотрена возможность монтажа кавитатора в стеклянной трубе 8, прозрачность которой обеспечивает условия наблюдения и регистрации за происходящими процессами потока жидкости. Кроме того, для определения давления перед кавитором на нагнетательной ветви после насоса установлены манометры РОСМА ТМ-310Р до 0,16 МПа и (или) MPF до 6 бар. Для измерения температуры воды в емкости использовался датчик температуры 6 TST-81-1,5.

Для изучения процесса нагрева воды в нагнетательной ветви водяного контура установлен кавитатор (рис. 2), основным элементом которого является конус 1 с углом

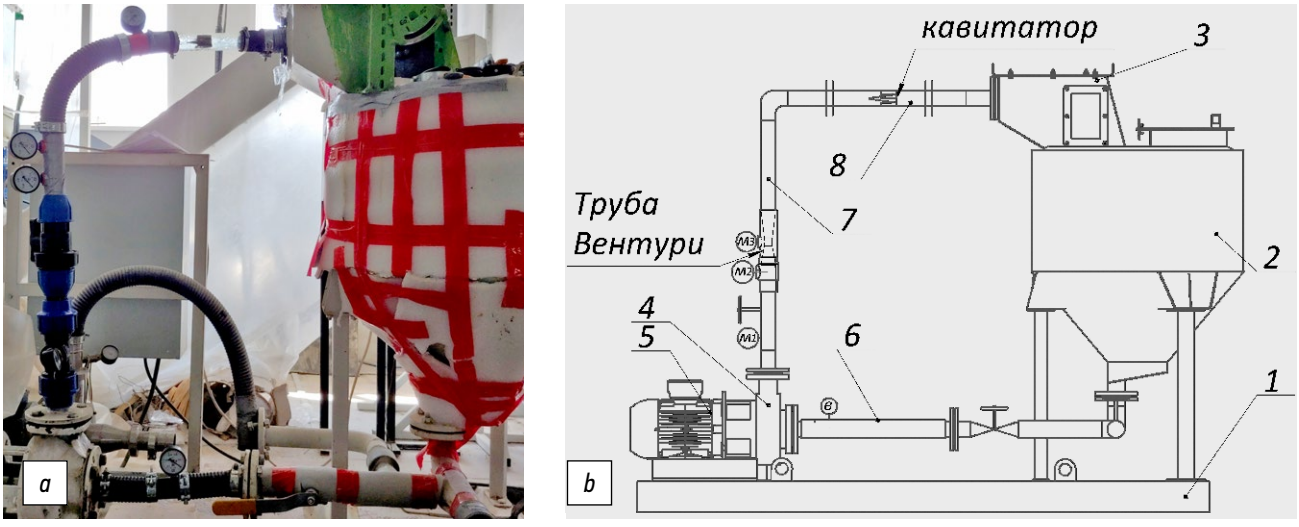

Рис. 1. Лабораторная установка: *a* — общий вид; *b* — схема установки.
Fig. 1. Laboratory setup: *a* — general view; *b* — setup layout.

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-569016

раствора 16°8′, способствующий сужению проходного сечения трубопровода и, предположительно, образованию эффекта кавитации за основанием конуса. Дополнительным элементом кавитатора являются лепестки 2, которые в свою очередь устанавливались в трубу прямыми или отогнутыми на 15°. Основная функция лепестков – это закрепление конуса в трубе и создание дополнительного сопротивления потоку жидкости.

Для видеорегистрации поведения жидкости до, при обтекании конуса и после прохождения кавитатора была использована высокоскоростная камера Evercam 1000-4-M монохромной записи с частотой 1000 к/с при разрешении 1280×800. Наблюдение за распределением температуры исследуемой поверхности осуществлялось бесконтактным способом с помощью тепловизора Testo 865. Значение потребляемой установкой мощности фиксировалось прибором К-505.

При проведении опытов использовалась вода средней жесткости с минерализацией 214 ppm (мг/л), определенной с помощью прибора TDS-3. Как известно, качество воды как теплоносителя по своему солевому составу и примесям существенным образом влияет на эффективность работы систем теплоснабжения [6, 7]. Температура воздуха в лаборатории и атмосферное давление во время проведения эксперимента составляло соответственно 16°С и 750–755 мм.рт.ст. Число параллельных опытов равнялось трем, поэтому экспериментальные данные, представленные ниже, определены как средние арифметические. После каждого опыта вода сливалась, водяной контур установки принимал исходную температуру.

Технологический процесс протекает следующим образом. Технологическая емкость установки заполняется водой объемом 50 л, после чего включается центробежный насос. Далее за счет постоянной циркуляции в замкнутом водяном контуре вода нагревается до значения 20°С. С этого момента идет фиксация параметров нагрева воды через каждый градус до 30°С как с кавитатором, так и без него при прочих равных условиях. Для оценки рабочего процесса выбраны такие критерии эффективности, как время и удельные энергозатраты нагрева воды.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе для подтверждения или опровержения гипотезы об интенсификации процесса нагрева воды в установке для приготовления зерновой патоки проведен сравнительный эксперимент по нагреву воды с 20 до 30°С в присутсвии и отсутсвии установленного кавитатора при двух вариантах положения лепестков. По результатам эксперимента построен график процесса нагрева (рис. 3), который показывает, что нагрев идет эффективней с использованием кавитатора. Причем время, затраченное на нагрев 50 л воды, чуть меньше при использовании кавитатора с прямыми лепестками, чем с отогнутыми при соответствующих значениях 11,32 мин. и 11,38 мин. Схема с применением кавитатора с прямыми лепестками позволяет ускорить процесс нагрева воды более чем на 20% по сравнению со схемой, где он отсутствует. Характер изменения температуры нагрева по времени во всех случаях имеет линейную зависимость.

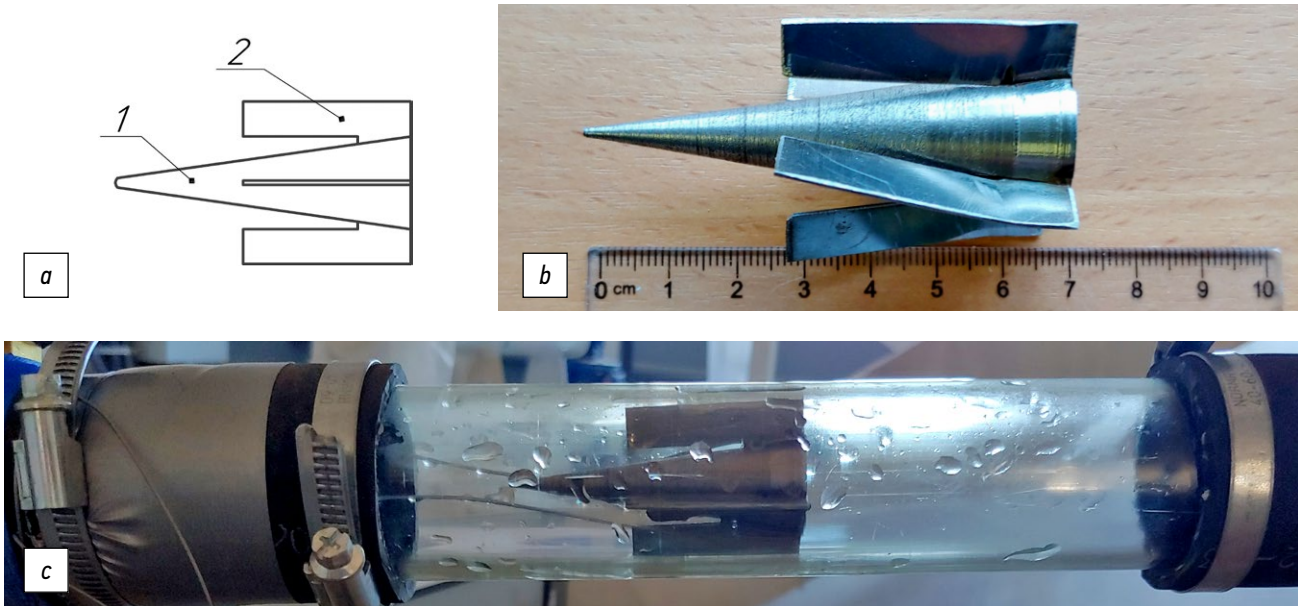

Рис. 2. Кавитатор: *a* — схема: *1* — конус; *2* — лепестки; *b* — общий вид (лепестки отогнуты на 15°); *c* — в стеклянной трубе с прямыми лепестками.
Fig. 2. The cavitator: *a* — layout: *1* — cone; *2* — vanes; *b* — general view (petals bent by 15°); *c* — inside a glass pipe with straight vanes.

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-569016

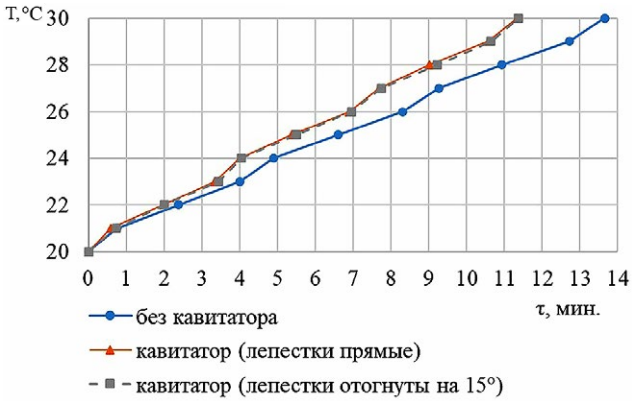

Рис. 3. Время нагрева воды до 30°С.
Fig. 3. Time of water heating up to 30°C.

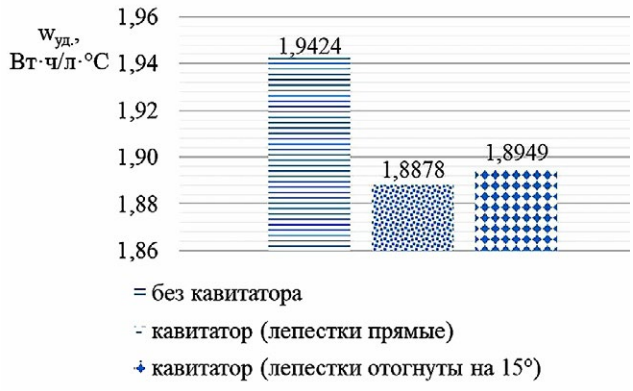

Рис. 4. Средние значения удельных энергозатрат нагрева воды.
Fig. 4. Average values of specific energy consumption of water heating.

При анализе результатов получены уравнения изменения значений температуры воды от времени:

$$T = 0,7043 \cdot \tau + 20,292, \quad (1)$$

$$T_{\text{п.л.}} = 0,8482 \cdot \tau + 20,315, \quad (2)$$

$$T_{\text{о.л.}} = 0,8449 \cdot \tau + 20,263. \quad (3)$$

Уравнения наилучших аппроксимаций функций (1)–(3) достаточно точно описывают процесс нагрева, о чем свидетельствуют высокие значения коэффициентов детерминации: $R_1^2 = 0,997$, $R_2^2 = 0,9964$, $R_3^2 = 0,9967$.

Далее определены удельные затраты электроэнергии на нагрев 1 литра воды на 1°С по формуле:

$$w_{\text{уд.}} = \frac{P \cdot \tau}{V \cdot \Delta T}, \quad (4)$$

где P — средняя потребляемая мощность электродвигателя, кВт; τ — время нагрева воды, с; V — объём воды в баке, л.; ΔT — изменение температуры воды, °С.

В результате вычислений построена гистограмма распределения удельных энергозатрат (рис. 4). Как можно заметить, минимальное значение выбранного критерия эффективности наблюдается при монтаже кавитатора с прямыми лепестками и составляет 1,8878 Вт·ч/л·°С, что меньше по значению аналогичного показателя примерно на 3% для нагрева воды без кавитатора. Расхождение значений при установке кавитатора с разным положением лепестков незначительно и составляет не более 1%.

На втором этапе исследования после того, как была доказана эффективность применения кавитатора, визуально можно определить эффект кавитации с помощью высокоскоростной съемки. Для начала рассмотрим геометрическую картину на примере движения жидкости в стеклянной трубе, в которой установлен кавитатор с прямыми лепестками (рис. 5). Не следует забывать,

Рис. 5. Схема процесса кавитации.
Fig. 5. Cavitation process diagram.

что по результатам предыдущих опытов это самая эффективная схема нагрева. Как можно заметить, процесс движения жидкости в неустановившемся режиме достаточно сложный и, в общем случае, до и при обтекании конуса движущаяся жидкость представляет собой семейство линий тока, которые формируют спектр течения. При приближении к основанию конуса давление резко падает с одновременным повышением скорости движения воды. В результате закипания жидкой фазы за основанием конуса и на расстоянии до 0,3*D* (*D* — диаметр основания конуса) от его основания становится заметным образование пузырьков пара, диаметр которых не превышает 1,5 мм. В определенный момент времени из-за возмущающих факторов предположительно, например, из-за скачка давления или внутреннего трения частиц жидкости образуются вихри. Пузырьки пара, двигаясь дальше при расширении живого сечения трубы с высокой скоростью схлопываются с выделением тепловой энергии, что, в свою очередь, приводит к дополнительному нагреву воды. Под воздействием течения вихри уплывают, образуя «хвост» кавитации. По его протяженности косвенно можно судить об интенсивности эффекта кавитации. За, так называемым, «хвостом» течение жидкости приобретает установившийся характер. Далее процесс повторяется, т.е. за основанием конуса происходит образование новых пузырьков, вихрей и т.д. Важно, что полученные результаты в целом не противоречат теории кавитации [8, 9].

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-569016

К сожалению, в рамках настоящего исследования не представляется возможным графически представить динамику движения жидкости, поэтому принято решение показать несколько последовательных кадров для двух вариантов установки кавитатора (рис. 6). Для обоих случаев видно, что эффект кавитации за основанием конуса несколько не стабилен. Однако, для первого случая (рис. 6, *a*) вихревые зоны более плотные, а длина «хвоста» кавитации более протяженная. Отогнутые лепестки способствуют незначительному закручиванию потока, что видно по линиям тока, но не влияют на дополнительное парообразование (рис. 6, *b*).

Для подтверждения результатов наблюдений была проведена тепловизионная съемка стеклянной трубы в зоне до кавитатора и после него в одном из опытов в режиме нагрева с использованием кавитатора с прямыми лепестками (рис. 7). В начальный момент нагрева (рис. 7, *a*) по перекрестному курсору тепловизора заметно, что температура воды за кавитатором повышается приблизительно на 5,5% с 20,1° до 21,2°C, далее в середине температурного режима (рис. 7, *b*) и в конце (рис. 7, *c*) температура возрастает в среднем около 3%.

На заключительном этапе исследований определены гидравлические сопротивления в сети, вызываемые кавитатором. Для предлагаемой конструкции кавитатора с прямыми и отогнутыми лепестками, падение напора определялось по результатам эксперимента формулой:

$$\Delta H = \frac{\Delta P}{\rho g}, \qquad (5)$$

где ΔP — разность давлений на входе перед кавитатором и выходе после кавитатора, Па.

Согласно результатам гидравлических испытаний установки данный показатель определен для двух случаев: для кавитатора с прямыми лепестками $\Delta P_{\text{п.л.}} = 34474$ Па, а также с отогнутыми лепестками на 15° — $\Delta P_{\text{о.л.}} = 37921$ Па; ρ — плотность воды, кг/м^3. При температуре воды 20°C плотность воды принята равной $\rho = 998$ кг/м^3 [10].

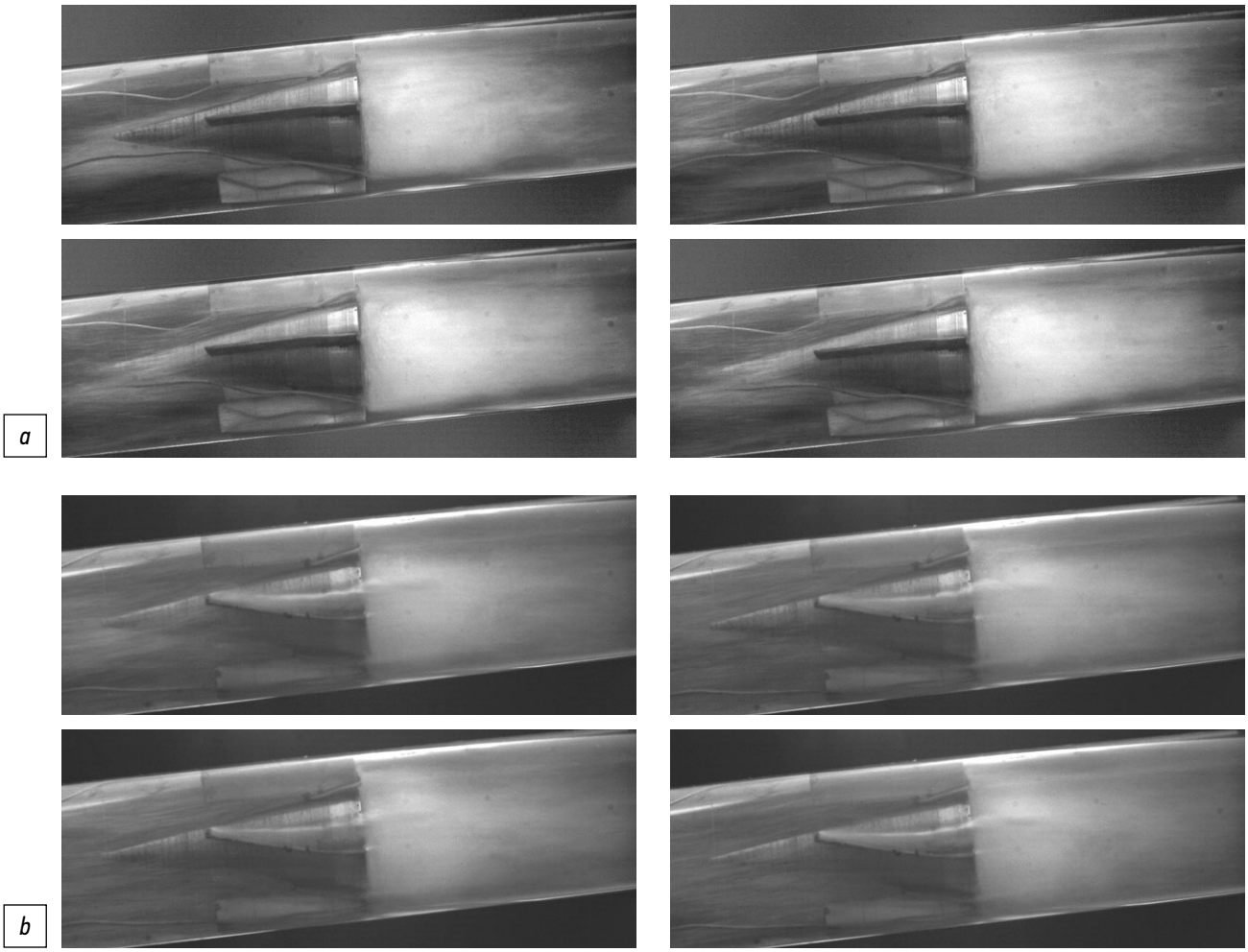

Рис. 6. Последовательные кадры записи процесса кавитации (слева-направо) высокоскоростной камерой в интервале температур воды от 20 до 30°C: *a* — кавитатор с прямыми лепестками; *b* — кавитатор с лепестками, отогнутыми на 15°.
Fig. 6. Sequential frames of recording the cavitation process (from left to right) by a high-speed camera in the water temperature range from 20 to 30°C: *a* — the cavitator with straight vanes; *b* — the cavitator with vanes bent by 15°.

Тогда согласно формулы (1) падение напора равно: для первого варианта $\Delta H_{\text{п.л.}} = 3{,}52$ м, для второго — $\Delta H_{\text{о.л.}} = 3{,}87$ м.

Затем, коэффициент гидравлического сопротивления можно вычислить согласно соотношению:

$$\zeta_{\text{кав.}} = \frac{\Delta P}{\rho v^2}, \qquad (6)$$

где v — скорость течения воды в нагнетательном трубопроводе равна $v = 6{,}29$ м/с.

Тогда для кавитатора с прямыми лепестками $\zeta_{\text{кав. (п.л.)}} = 1{,}75$, с отогнутыми $\zeta_{\text{кав. (о.л.)}} = 1{,}92$.

Видно, что при втором варианте установки кавитатора падение напора и коэффициент гидравлического сопротивления по сравнению с первым вариантом больше на 10%.

Как известно плотность воды несколько снижается при повышении ее температуры, однако, при нагреве воды с температуры 20°C до 30°C существенных изменений в значениях гидравлических сопротивлений не происходит.

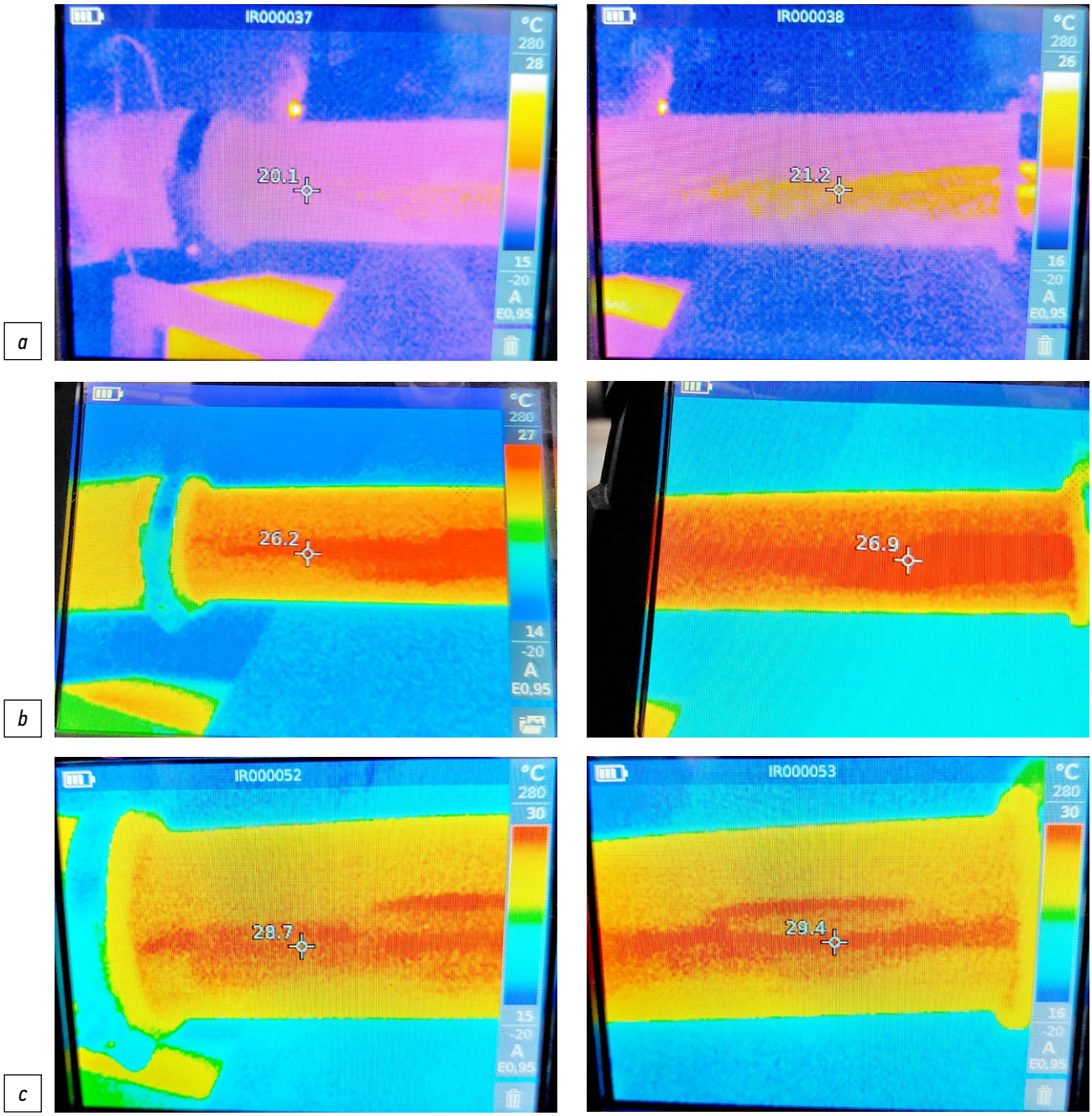

Рис. 7. Изображения термограмм трубы с кавитатором в процессе нагрева воды с тепловизионным прицелом до/после кавитатора: *a* —температура 20,1°C/21,2°C; *b* — температура 26,2°C/26,9°C; *c*— температура 28,7°C/29,4°C.
Fig. 7. Images of tube thermograms with the cavitator during water heating with thermal imaging sight before/after the cavitator: *a* — temperature is 20,1°C/21,2°C; *b* — temperature is 26,2°C/26,9°C; *c* — temperature is 28,7°C/29,4°C.

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-569016

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении стоит отметить, что, безусловно, существует много способов нагрева воды при приготовлении жидких кормовых смесей, у каждого из них найдутся свои преимущества и недостатки. Но, все-таки, сельхозпроизводители в первую очередь ориентируются на простые, но эффективные технические решения. В нашем случае по результатам лабораторных исследований удалось установить, что в установках для приготовления зерновой патоки возможно повысить эффективность нагрева воды путем монтажа в нагнетательный трубопровод кавитатора. Представленное устройство, состоящее из конуса, не представляет сложности в изготовлении и в монтаже. Остается нерешенной небольшая конструктивно-технологическая проблема: после нагрева воды до 30°С и добавлении в технологическую емкость зерна перенаправить поток водно-зерновой смеси в обход кавитатора. Использование устройства при нагреве воды на начальном этапе приготовления зерновой патоки повышает эффективность процесса на 20%.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. В.Н. Нечаев — подготовка и проведение испытаний, представление результатов, описание результатов и формулирование выводов исследования, подготовка текста статьи; А.В. Алёшкин — постановка проблемы, разработка концепции статьи и методологии исследования, анализ данных; П.А. Савиных — научное руководство, анализ и доработка текста. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведенным исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. V.N. Nechaev — preparation and conduct of tests, presentation of results, description of results and formulation of study conclusions, preparation of the article text; A.V. Aleshkin — problem formulation, development of article concept and research methodology, data analysis; P.A. Savinykh — scientific leadership, analysis and revision of the text. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сысуев В.А., Алешкин А.В., Савиных П.А. Кормоприготовительные машины (теория, разработка, эксперимент): в 2-х Т. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2008. Т. 1.

2. Морозов Н.М., Рассказов А.Н. Конкурентность продукции животноводства — состояние и направления повышения // Никоновские чтения. 2017. № 22. С. 59–65.

3. Морозов Н.М. Развитие машинных технологий и систем технических средств для механизации и автоматизации процессов в животноводстве // Техника и оборудование для села. 2013. № 8. С. 2–7.

4. 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. doi: 10.32417/article_5d52af4470c055.81551465

5. Нечаев В.Н. Оптимизация настроечных параметров пассивного измельчителя при приготовлении ржаной патоки // Агроинженерия. 2023. Т. 25. № 3. С. 41–48. doi: 10.26897/2687-1149-2023-3-41-48

6. Басымбекова А., Кабылбекова Б.Н., Аманбаева К.Б. Жесткость воды и ее влияние на образование накипных отложений в трубопроводах систем теплоснабжения // Научные труды ЮКГУ им. М. Ауэзова. 2016. № 3 (38). С. 6–8.

7. Алексеев В., Архипов А., Пискунов Д., Никитин А., и др. Водоподготовка технологических систем паровых и водогрейных котлов: жесткость воды и методика ее измерения // ТехНадзор. 2016. № 1 (110). С. 224–225.

8. Аганин А.А., Ильгамов М.А., Косолапова Л.А., и др. Схлопывание кавитационного пузырька в жидкости вблизи твердой стенки // Вестник Башкирского университета. 2013. Т. 18, № 1. С. 15–21.

9. Исаков А.Я., Рябцев К.А. Вихревая кавитация в технологических устройствах // Вестник КамчатГТУ. 2003. № 2. С. 207–214.

10. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992.

REFERENCES

1. Sysuev VA, Aleshkin AV, Savinyh PA. *Feed preparation machines (theory, idea, experiment):* [2 Vols.]. Kirov: NIISKH Severo-Vostoka; 2008. T. 1. (In Russ).
2. Morozov NM, Rasskazov AN. Competitiveness of livestock products – state and directions of increase. *Nikonovskie chteniya.* 2017;22:59–65. (In Russ).
3. Morozov NM. Development of computer technologies and technical means for mechanization and automation of processes in animal breeding. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela.* 2013;8:2–7. (In Russ).
4. Perevozchikov AV, Vorob'eva SL, Berezkina GYu. Influence of grains in cows rings on qualitative characteristics of raw milk and products of its treatment. *Agrar. vestn. Urala.* 2019;186(2):51–58. (In Russ). doi: 10.26897/2687-1149-2023-3-41-48
5. Nechaev VN. Optimising the setting parameters of a passive grinder used for rye molasses preparation. *Agroinzheneriya.* 2023;25(3):41–48. (In Russ). doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-41-48
6. Basymbekova A, Kabylbekova BN, Amanbaeva KB. Water rigidity and its influence on the formation of scale deposits in the pipelines of heat supply systems. *Nauchnye trudy YUKGU im M Auezova.* 2016;3(38):6–8. (In Russ).
7. Alekseev V, Arkhipov A, Piskunov D, et al. Water treatment of process systems of steam and hot water boilers: water rigidity and measurement method. *TekhNadzor.* 2016;1(110):224–225. (In Russ).
8. Aganin AA, Il'gamov MA, Kosolapova LA, et al. Collapse of a cavitation bubble in fluid near rigid wall. *Vestnik Bashkirskogo universiteta.* 2013;18(1):15–21. (In Russ).
9. Isakov AYa, Ryabtsev KA. Vortex cavitation in technological devices. *Vestnik KamchatGTU.* 2003;2:207–214. (In Russ).
10. Idel'chik IE. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam.* Moscow: Mashinostroenie; 1992. (In Russ).

ОБ АВТОРАХ

*** Нечаев Владимир Николаевич,**
доцент, канд. техн. наук,
доцент кафедры «Технические
и биологические системы»;
адрес: Российская Федерация, 606340, Княгинино,
ул. Октябрьская, д. 22;
ORCID: 0000-0002-7566-6013;
eLibrary SPIN: 9562-7900;
e-mail: nechaev-v@list.ru

Алёшкин Алексей Владимирович,
профессор, д-р техн. наук,
профессор кафедры «Механика
и инженерная графика»;
ORCID: 0000-0002-6949-1480;
eLibrary SPIN: 5084-5478;
e-mail: usr00008@vyatsu.ru

Савиных Пётр Алексеевич,
профессор, д-р техн. наук,
зав. лабораторией «Механизация животноводства»;
ORCID: 0000-0002-5668-8479;
eLibrary SPIN: 5868-9317;
e-mail: peter.savinyh@mail

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

AUTHORS' INFO

*** Vladimir N. Nechaev,**
Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering),
Associate Professor of the Technical
and Biological Systems Department;
address: 22 Oktyabrskaya street, 606340 Knyaginino,
Russian Federation;
ORCID: 0000-0002-7566-6013;
eLibrary SPIN: 9562-7900;
e-mail: nechaev-v@list.ru

Alexey V. Aleshkin,
Professor, Dr. Sci. (Engineering),
Professor Professor of the Mechanics
and Engineering Graphics Department;
ORCID: 0000-0002-6949-1480;
eLibrary SPIN: 5084-5478;
e-mail: usr00008@vyatsu.ru

Peter A. Savinykh,
Professor, Dr. Sci. (Engineering),
Head of the Mechanization of Animal Husbandry Laboratory;
ORCID: 0000-0002-5668-8479;
eLibrary SPIN: 5868-9317;
e-mail: peter.savinyh@mail