



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

Адрес учредителя и издателя:
127434, Российская Федерация,
г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49

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

Основан в 2003 году

Периодичность: 6 номеров в год

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

Полнотекстовые версии доступны на сайте
https://www.elibrary.ru/title_profile.asp?id=8505

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

Адрес редакции: 127434, Москва,
Тимирязевская ул., 58, к. 336
Тел.: +7 (499) 976-07-27
E-mail: agroeng@rgau-msha.ru
<https://agroengineering.timacad.ru/jour/index>

Отпечатано в типографии
ООО «ЭйПиСиПублишинг»
127550, г. Москва,
Дмитровское ш., д. 45, корп. 1, оф. 8
Тел.: +7 (499) 976-51-84, (985) 109-44-19

Подписано в печать 08.10.2024
Формат 60 84/8
Тираж 500 экз.

© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева, 2024

Главный научный редактор

Михаил Никитьевич Ерохин, академик РАН, д-р техн. наук, профессор кафедры сопротивления материалов и деталей машин, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>, n.erohin@rgau-msha.ru

Заместитель главного научного редактора:

Алексей Семенович Дорохов, академик РАН, д-р техн. наук, профессор, заместитель директора по научно-организационной работе, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>, dorokhov.vim@yandex.ru

Петр Федорович Кубрушко, чл.-корр. РАО, д-р пед. наук, профессор, заведующий кафедрой педагогики и психологии профессионального образования РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-2142-1037>, kubrushko@rgau-msha.ru

Члены редакционного совета:

Николай Васильевич Алдошин, д-р техн. наук, профессор, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>, aldoshin@rgau-msha.ru

Алексей Юрьевич Алипичев, канд. пед. наук, доцент кафедры иностранных и русских языков РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>, alipichev@rgau-msha.ru

Алексей Сергеевич Апатенко, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой технического сервиса машин и оборудования, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>, a.apatenko@rgau-msha.ru

Виктор Иванович Балабанов, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой мелиоративные и строительные машины, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>, vbalabanov@rgau-msha.ru

Сергей Михайлович Гайдар, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения и технологии машиностроения, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>, techmash@rgau-msha.ru

Сергей Николаевич Девянин, д-р техн. наук, профессор кафедры тракторов и автомобилей, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-6776-0432>, s.devyanin@rgau-msha.ru

Владимир Ильич Загинайлов, д-р техн. наук, профессор кафедры электроснабжения и электротехники имени академика И.А. Будзко, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X>, vzaginajlov@rgau-msha.ru

Иван Юрьевич Игнаткин, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры сопротивления материалов и деталей машин, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0003-4867-1973>, ignatkin@rgau-msha.ru

Сергей Павлович Казанцев, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов и деталей машин, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>, oaleonov@rgau-msha.ru

Тамара Петровна Кобозева, д-р с.-х. наук, профессор ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (г. Москва, Россия), tkobozeva@rgau-msha.ru
Алексей Иванович Купреенко, д-р техн. наук, профессор кафедры технологического оборудования животноводства и перерабатывающих производств, Брянский государственный аграрный университет (с. Кокино Брянская обл. Россия), <https://orcid.org/0000-0002-3781-9592>, kupreenkoai@mail.ru

Александр Григорьевич Левшин, д-р техн. наук, профессор кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-8010-4448>, alevshin@rgau-msha.ru

Олег Альбертович Леонов, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой метрологии, стандартизации и управления качеством, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>, oaleonov@rgau-msha.ru

Людмила Ивановна Назарова, канд. пед. наук, доцент кафедры педагогики и психологии профессионального образования, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-5698-6284>, nazarova@rgau-msha.ru

Александр Геннадиевич Пастухов, д-р техн. наук, профессор кафедры технической механики и конструирования машин, Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина (п. Майский, Белгородская обл., Россия), <https://orcid.org/0000-0001-8249-8970>, pastukhov_ag@mail.ru

Ирена Вениаминовна Роберт, академик РАО, д-р пед. наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБНУ «Институт стратегии развития образования РАО» (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-9303-6560>, rena_robert@mail.ru

Владимир Федорович Сторчевой, д-р техн. наук, профессор кафедры «Теоретическая электротехника», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>, v.storcheyov@rgau-msha.ru

Юрий Хасанович Шогенов, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, зав. сектором механизации, электрификации и автоматизации ОСХН РАН, ФГБУ «Российская академия наук» (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-7588-0458>, yh1961s@yandex.ru

Игорь Викторович Юдаев, д-р техн. наук, профессор кафедры применения электроэнергии, Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина (г. Краснодар, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-3435-4873>, etsh1965@mail.ru

Иностранцы члены редакционного совета:

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

Павел Викторович Авраменко, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой стандартизации, метрологии и инженерной графики Белорусского аграрного технического университета (г. Минск, Белоруссия); <https://orcid.org/0000-0002-8420-3977>, pavel.auramenka@bsatu.by

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

Фармон Муртозевич Маматов, д-р техн. наук, профессор кафедры механизации сельского хозяйства и сервиса, Каршинский инженерно-экономический институт (г. Карши, Республика Узбекистан), <https://orcid.org/0000-0002-8916-4225>, fmamatov_50@mail.ru

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

Хоанг Дык Куанг, канд. хим. наук, Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и технологический центр (г. Хошимин, Вьетнам), <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782>, quanghoang1510@gmail.com

**Founder and Publisher:****Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy***Address of Founder and Publisher:*49, Timiryazevskaya str., Moscow,
127434, Russian Federation*The mass media registration certificate
ПИ No. ФС 77-78053 of March 6, 2020***Founded in 2003****Publication Frequency:**

Bimonthly

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

Full versions are posted on the site
https://www.elibrary.ru/title_profile.asp?id=8505

EXECUTIVE EDITORS:

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

Editors' office address:58, Timiryazevskaya str., Moscow,
127434, Russian Federation

Tel.: +7 (499) 976-07-27;

E-mail: agroeng@rgau-msha.ru<https://agroengineering.timacad.ru/jour/index>Printed by APC Publishing LLC
office 8, 1, 45, Dmitrovskoe Ave.,
Moscow, 127550, Russia

Tel.: +7 (499) 976-51-84, (985) 109-44-19

Passed for printing 08.10.2024

Format – 60 84/8

Circulation – 500 copies.

© Federal State Budgetary Establishment
of Higher Education – Russian State
Agrarian University – Moscow Timiryazev
Agricultural Academy, 2024

Science Editor-in-Chief

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

Deputy Science Editor-In-Chief:

Aleksei S. Dorokhov, Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor, Director Deputy for Science and Organizational Work, Federal State Budgetary Research Institution – Federal Scientific Agroengineering Center (VIM) (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>, dorokhov.vim@yandex.ru
Petr. F. Kubrushko, Corresponding Member of the Russian Academy of Education, DSc (Ed), Deputy Scientific Editor-in-Chief, Head of the Department of Pedagogy and Psychology of Professional Education, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-2142-1037>, kubrushko@rgau-msha.ru

Members of the Editorial Board:

Nikolay V. Aldoshin, DSc (Eng), Professor, Federal State Budgetary Research Institution – Federal Scientific Agroengineering Center (VIM) (Moscow, Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>, aldoshin@rgau-msha.ru

Aleksei Yu. Alipichev, PhD (Ed), Associate Professor, Department of Foreign and Russian Languages, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>, alipichev@rgau-msha.ru

Aleksei S. Apatenko, DSc (Eng), Associate Professor, Head of the Department of Technical Service of Machinery and Equipment, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>, a.apatenko@rgau-msha.ru

Viktor I. Balabanov, DSc (Eng), Professor, Head, Department of Irrigation and Construction Machinery, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>, vbabanov@rgau-msha.ru

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

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

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

Ivan Yu. Ignatkin, DSc (Eng), Associate Professor, Professor, Department of Strength of Materials and Machine Parts, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0003-4867-1973>, ignatkin@rgau-msha.ru

Sergey P. Kazantsev, DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Strength of Materials and Machine Parts, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), kazansev@rgau-msha.ru

Tamara P. Kobozeva, DSc (Ag), Professor, Federal State Budgetary Research Institution – Federal Scientific Agroengineering Center (VIM) (Moscow, Russia), tkobozeva@rgau-msha.ru

Aleksei I. Kupreenko, DSc (Eng), Professor, Department of Technological Equipment of Animal Husbandry and Processing Industries, Bryansk State Agrarian University (Kokino, Bryansk region, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-3781-9592>, kupreenkoai@mail.ru

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

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

Liudmila I. Nazarova, PhD (Ed), Associate professor, Department of Pedagogy and Psychology of Professional Education, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0001-5698-6284>, nazarova@rgau-msha.ru

Aleksandr G. Pastukhov, DSc (Eng), Professor, Department of Technical Mechanics and Machine Design, Belgorod State Agrarian University named after V.Y. Gorin, Russia. (Mayskiy, Belgorod region, Russia), <https://orcid.org/0000-0001-8249-8970>, pastukhov_ag@mail.ru

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

Vladimir F. Storchevov, DSc (Eng), Professor, Professor of the Department of Theoretical Electrical Engineering; Moscow Aviation Institute (National Research University) (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>, v.storchevov@rgau-msha.ru

Yuriy Kh. Shogenov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Senior Research Associate, Head of the "Mechanization, Electrification and Automation" Section, Department of Agricultural Sciences, Federal State Budgetary Institution – the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-7588-0458>, yh1961s@yandex.ru

Igor V. Yudaev, DSc (Eng), Professor, Department of Electricity Application, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, (Krasnodar, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-3435-4873>, etsh1965@mail.ru

International members of the Editorial Board:

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

Pavel V. Avramenko, PhD (Eng), Associate Professor, Head of the Department of Standardization, Metrology and Engineering Graphics, Belarusian Agrarian Technical University (Minsk, Belarus), <https://orcid.org/0000-0002-8420-3977>, pavel.avramenko@bsatu.by

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

Farmon M. Mamatov, DSc (Eng), Professor, Professor of the Agricultural Mechanization and Service Department, Karshi Institute of Engineering and Economics (Karshi, Republic of Uzbekistan), <https://orcid.org/0000-0002-8916-4225>, fmamatov_50@mail.ru

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

Quang Hoang Duc, PhD (Chem), Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Centre (Ho Chi Minh, Vietnam), <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782>, quanghoang1510@gmail.com

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

| | |
|---|----|
| О.Н. Дидманидзе, А.В. Евграфов, Н.Н. Пуляев, Д.А. Филимонов Результаты экспериментальных исследований влияния электрических полей на содержание аммония в животноводческих стоках..... | 4 |
| С.М. Гайдар, А.М. Пикина, А.С. Барчукова, О.М. Лапсарь, С.М. Ветрова Исследование эффективности амидов жирных кислот в качестве ингибиторов атмосферной коррозии..... | 10 |
| В.Ф. Первушин, Ф.М. Абдуллин, М.З. Салимзянов, А.Г. Ипатов, А.Г. Иванов Сегментно-пальцевая косилка для скашивания естественных и сеяных трав в условиях малых форм хозяйствования..... | 16 |
| В.Э. Славкина, Ю.В. Катаев, А.С. Свиридов, Е.Ф. Малыха, Н.В. Сергеева Полимерный композит для распылителей сельскохозяйственных опрыскивателей: испытания..... | 22 |

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

| | |
|--|----|
| В.И. Балабанов, Д.В. Добрыков Анализ технологий восстановления коленчатых валов автотракторной техники..... | 31 |
| О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба, Г.Н. Темасова, Д.А. Пупкова, Л.А. Гринченко, И.Н. Кравченко Качество обработки коренных шеек коленчатого вала под ремонтный размер: статистический анализ..... | 39 |
| В.М. Корнеев, Д.И. Петровский, Н.В. Корнеев Интенсификация процесса очистки деталей погружением в моющий раствор..... | 47 |

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

| | |
|---|----|
| В.А. Буторин, Л.А. Саплин, Р.Т. Гусейнов Выбор задаваемых параметров для оценки соответствия восстановленных погружных электродвигателей требованиям на капитальный ремонт..... | 53 |
| Н.П. Кондратьева, В.Ф. Сторчевой, Р.Г. Большин Применение ультрафиолета для предпосевной обработкой семян..... | 59 |
| В.Ф. Сторчевой, Ю.А. Судник, А.Н. Мануйленко Электрический озонатор-излучатель воздуха для сельскохозяйственных помещений: результаты исследований автономного модуля..... | 66 |
| Д.А. Нормов, А.А. Азарян, А.А. Цедяков, Д.С. Карлаков Электроозонная технология очистки навозных стоков: реализация математической модели..... | 74 |

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

| | |
|--|----|
| Л.И. Назарова, Я.С. Чистова, Е.П. Январева Педагогические условия организации смешанного обучения в вузе с применением систем управления обучением..... | 83 |
|--|----|

CONTENTS

FARM MACHINERY AND TECHNOLOGIES

| | |
|---|----|
| O.N. Didmanidze, A.V. Evgrafov, N.N. Pulyaev, D.A. Filimonov Results of experimental studies of the effect of electric fields on the ammonium content in livestock wastewater..... | 4 |
| S.M. Gaidar, A.M. Pikina, A.S. Barchukova, O.M. Lapsar, S.M. Vetrova Study of the effectiveness of fatty acid amides used as inhibitors of atmospheric corrosion..... | 10 |
| V.F. Pervushin, F.M. Abdullin, M.Z. Salimzyanov, A.G. Ipatov, A.G. Ivanov Segment-finger mower for cutting natural and artificially cultivated grasses in small-scale farming..... | 16 |
| V.E. Slavkina, Yu.V. Kataev, A.S. Sviridov, E.F. Malykha, N.V. Sergeeva Polymer composite for farm sprayer atomizers: test results..... | 22 |

TECHNICAL SERVICE IN AGRICULTURE

| | |
|---|----|
| V.I. Balabanov, D.V. Dobryakov Analyzing the techniques for restoring crankshafts of automotive vehicles..... | 31 |
| O.A. Leonov, N.Zh. Shkaruba, G.N. Temasova, D.A. Pupkova, L.A. Grinchenko, I.N. Kravchenko Assessment of the quality of the crankshaft grinding process for repair size..... | 39 |
| V.M. Korneev, D.I. Petrovsky, N.V. Korneev Intensified cleaning of parts immersed in a detergent solution..... | 47 |

POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION

| | |
|--|----|
| V.A. Butorin, L.A. Saplin, R.T. Guseynov Selection of preset parameters to assess the compliance of restored submersible electric motors with the overhaul requirements..... | 53 |
| N.P. Kondrateva, V.F. Storchevov, R.G. Bolshin Use of ultraviolet for pre-sowing seed treatment..... | 59 |
| V.F. Storchevov, Yu.A. Sudnik, A.N. Manuylenko Electric ozonizer-air emitter for agricultural buildings: study results for an autonomous module..... | 66 |
| D.A. Normov, A.A. Azaryan, A.A. Tsedyakov, D.S. Karlakov Electro-ozonization technology of manure effluent treatment: mathematical model implementation..... | 74 |

THEORY AND METHODOLOGY OF PROFESSIONAL EDUCATION

| | |
|--|----|
| L.I. Nazarova, Ya.S. Chistova, E.P. Yanvareva Pedagogical conditions for organizing blended learning at a university using learning management systems..... | 83 |
|--|----|

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.841.7, 661.832.322.56

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-4-9>



Результаты экспериментальных исследований влияния электрических полей на содержание аммония в животноводческих стоках

О.Н. Дидманидзе¹, А.В. Евграфов², Н.Н. Пуляев³, Д.А. Филимонов⁴

^{1,2,3,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

¹ didmanidze@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2558-0585>

² labpoliv@list.ru; <http://orcid.org/0000-0002-2313-2191>

³ pulyaev@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8984-4426>

⁴ dfilimonov3@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0009-0006-5484-5334>

Аннотация. При внесении животноводческих стоков на сельскохозяйственные поля необходимо снизить в них содержание аммония. С целью разработки более эффективных способов очистки сточных вод изучено воздействие электрического поля на изменение концентрации аммонийных соединений азота в водных растворах (электролите). Экспериментальные исследования проведены на разработанной установке, использующей принцип электролиза. Для имитации содержания аммония в электролите использовалась дистиллированная вода с добавлением аммиачной селитры. Электролит объемом 500 мл помещался между электродами и обрабатывался постоянным током в течение 1, 3, 4 и 9 мин. Исследования проводились при концентрации NH_4^+ в электролите 60, 90 и 300 мг/л. После завершения эксперимента определялись концентрация азотных соединений и водородный показатель pH электролита. Установлено, что воздействие электрического поля на водный раствор NH_4^+ приводит к снижению концентрации аммонийных соединений азота и изменению pH электролита с кислотной до щелочной реакции. После 9-минутной обработки электролита с концентрацией NH_4^+ 60 и 90 мг/л в растворе не были обнаружены аммонийные соединения. Обработка раствора с концентрацией NH_4^+ 300 мг/л в течение 1 мин привела к снижению концентрации аммония до 75 мг/л, что говорит о перспективности данного способа очистки и разработки промышленного образца технического средства для обработки стоков животноводства. Снижение концентрации аммонийного азота позволит уменьшить экологическую нагрузку на почву, грунтовые и поверхностные воды и повысить качество растениеводческой продукции, выращиваемой на сельскохозяйственных угодьях, на которых утилизируются сточные воды животноводческих комплексов. Изменение pH электролита с кислотной до щелочной реакции положительно повлияет на кислые почвы Центральной Нечерноземной зоны РФ.

Ключевые слова: сточные воды животноводческих комплексов, аммоний, электролит, сточные воды, изменение концентрации аммонийных соединений, содержание аммония в животноводческих стоках

Для цитирования: Дидманидзе О.Н., Евграфов А.В., Пуляев Н.Н., Филимонов Д.А. Результаты экспериментальных исследований влияния электрических полей на содержание аммония в животноводческих стоках // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 5. С. 4-9. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-4-9>

ORIGINAL ARTICLE

Results of experimental studies of the effect of electric fields on the ammonium content in livestock wastewater

O.N. Didmanidze¹, A.V. Evgrafov², N.N. Pulyaev³, D.A. Filimonov⁴

^{1,2,3,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

¹ didmanidze@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2558-0585>

² labpoliv@list.ru; <http://orcid.org/0000-0002-2313-2191>

³ pulyaev@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8984-4426>

⁴ dfilimonov3@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0009-0006-5484-5334>

Abstract. When applying livestock wastewater to agricultural fields, it is necessary to reduce its ammonium content. In order to develop more effective methods of wastewater treatment, the authors studied the effect of electric field on the change in the concentration of ammonium nitrogen compounds in aqueous solutions (the electrolyte). Experimental studies were

carried out on the developed installation using the principle of electrolysis. Distilled water with added ammonium nitrate was used to simulate the ammonium content in the electrolyte. The 500 ml electrolyte was placed between the electrodes and treated with direct current for 1, 3, 4, and 9 min. The studies were carried out at the NH_4^+ concentration in the electrolyte of 60, 90 and 300 mg/liter. When the experiment was completed, the authors determined the concentration of nitrogen compounds and the hydrogen pH of the electrolyte. It was found that the exposure of NH_4^+ aqueous solution to the electric field leads to a decrease in the concentration of ammonium nitrogen compounds and a change in the pH of the electrolyte from the acidic to alkaline reaction. No ammonium compounds were detected in the solution after a 9-minute treatment of the electrolyte with the NH_4^+ concentration of 60 and 90 mg/liter. Treatment of the solution with the NH_4^+ concentration of 300 mg/l for 1 min led to a decrease in the ammonium concentration to 75 mg/l. This fact indicates the viability of this method of treatment and the development of an industrial sample of technical means to treat livestock wastewater. Reducing the ammonium nitrogen concentration will decrease the ecological load on soil, ground and surface waters, and improve the quality of crops grown on the farmland, supplied with wastewater from livestock facilities. Changing the pH of electrolyte from the acid to alkaline reaction will have a positive effect on the acidic soils of the Central Non-Chernozem (Black Soil) Zone of the Russian Federation.

Keywords: livestock wastewater, ammonium, electrolyte, wastewater, change in the concentration of ammonium compounds, ammonium content in livestock wastewater

For citation: Didmanidze O.N., Evgrafov A.V., Pulyaev N.N., Filimonov D.A. Results of experimental studies of the effect of electric fields on the ammonium content in livestock wastewater. *Agricultural Engineering (Moscow)*. (In Russ.). 2024;26(5):4-9. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-4-9>

Введение

Перевод на бесподстилочное содержание животных с применением систем гидросмыва приводит к увеличению объема животноводческих стоков и обострению проблемы охраны окружающей среды [1, 2]. В России при наличии большого количества животноводческих комплексов данная проблема стоит очень остро. Для крупных хозяйств объем жидких стоков, подлежащих утилизации, составляет от 100 до 1500 м³ в сутки [3].

Сточные воды животноводческих комплексов объемом 1 м³ содержат 0,8...1,4 кг азота; 0,3...0,7 кг фосфора; 0,4...1,2 кг калия. Минеральная часть азота в основном представлена в виде аммония, содержание которого в стоках превышает концентрацию фосфорных и калийных минеральных соединений. Сточные воды животноводческих комплексов могут являться источником поступления соединений азота в почву, поскольку общий азот в них составляет 3,2% от общего объема, причем более 50% азота – в легкорастворимой

аммиачной форме. Состав сточных вод животноводческих комплексов¹ представлен в таблице 1.

В растениях азот находится в составе белков, нуклеиновых кислот (РНК, ДНК), играющих важную роль в обмене веществ, хлорофилле, ферментах, а также в форме азотных соединений (нитратов, нитритов, аммиака). Избыточный азот способен накапливаться в растениях без вреда для них, но его избыток представляет угрозу для здоровья людей и животных. При внесении высоких доз азота качество растениеводческой продукции ухудшается, нарушается сахаро-протеиновое и кальцево-фосфорное соотношение, значительно увеличивается содержание нитратов. Минеральный азот представлен в почве в основном аммонием, нитратами и нитритами. Последние присутствуют в малых дозах и не сорбируются почвенно-поглощающим комплексом [4-6]. В почве аммоний с помощью микроорганизмов частично подвергается нитрификационному процессу, который носит окислительный характер.

Таблица 1

Состав сточных вод животноводческих комплексов

Table 1

Composition of wastewater from livestock facilities

| Сточные воды Wastewater | pH | K ⁺ , мг/л | NH ₄ ⁺ , мг/л | P ₂ O ₅ , мг/л | Взвешенный осадок, мг/л Suspended sludge, mg/l |
|---|-----|--------------------------|--|---|---|
| Сточные воды свинопредприятий / Wastewater of pig farms | 7,5 | 274 | 573 | 152 | 1347 |
| Сточные воды КРС / Wastewater of cattle farms | 7,4 | 860 | 420 | 158 | 1347 |

¹ Шевцов Н.М. Внутрипочвенная очистка и утилизации сточных вод. М.: Агропромиздат, 1988. С. 2-24; Методические рекомендации по технологическому проектированию оросительных систем использования животноводческих стоков. РД-АПК 1.30.03.02-20. 2020. URL: <https://biokompleks.ru/normativnye-dokumenty/rd-apk-1.30.03.01-20.php>.

Очистка сточных вод может осуществляться путем извлечения из стоков минеральных веществ и их повторного использования (например, фенолы и уксус, содержащиеся в сточных водах газогенераторных станций, могут быть извлечены и использованы вторично) или путем разрушения загрязняющих веществ с помощью восстановления или окисления и дальнейшего удаления продуктов разрушения (предварительная очистка и сброс в водоемы или подача на сельскохозяйственные поля для выращивания продукции, подача на поля фильтрации для доочистки, очистка стоков в биологических-оксидициальных прудах).

Наиболее экологически безопасным и экономически выгодным методом утилизации сточных вод животноводческих комплексов является использование их на полях при выращивании сельскохозяйственной продукции. В этом случае значительная часть веществ, содержащихся в стоках, выносятся с поля вместе с урожаем. При этом необходимо следить за качеством растениеводческой продукции, а именно за содержанием азота в получаемой продукции [7-10].

Для снижения содержания аммония в животноводческих стоках с целью внесения их на сельскохозяйственные поля требуется разработка более эффективных способов утилизации сточных вод.

Цель исследований: изучение воздействия электрического поля на изменение концентрации аммонийных соединений азота в водных растворах (электролите) для дальнейшей разработки технических средств по снижению их концентрации и повышению экологической безопасности.

Материалы и методы

Для проведения исследований использовалась установка (рис. 1), включающая в себя колонну, в которой электроды-колонны выполнены из алюминиевых труб (сплав АД31Т1) с внешним диаметром 16 и 46 мм (табл. 2), внешняя токоизоляция состоит из двух слоев термоусадочных рукавов марки Ф70 с максимальной нагрузкой каждого слоя 10 кВ. К колонне подключен источник питания постоянного тока

RGK PS-1326, обеспечивающий максимальное значение тока 6 А при напряжении на электродах 32 В. Значение тока контролировали тестером для постоянного и переменного тока до 600 В. Значение показателей электролита определяли рН-метром с точностью измерений 0,01 и профессиональными тестами для воды производства компаний НИЛПА и UHE. Для обнаружения газообразных форм азота применялся газоанализатор HAVOTEST. Уровень электролита в экспериментальной установке определяли цифровым штангельциркулем с точностью измерения 0,1 мм (рис. 1).

При проведении экспериментальных исследований использовалась схема подключения, при которой катодом являлся внешний электрод колонны, а анодом – внутренний, при значениях постоянного тока 5 А и напряжением 12 В (рис. 2).

Для имитации содержания аммония в электролите использовалась дистиллированная вода с добавлением аммиачной селитры.

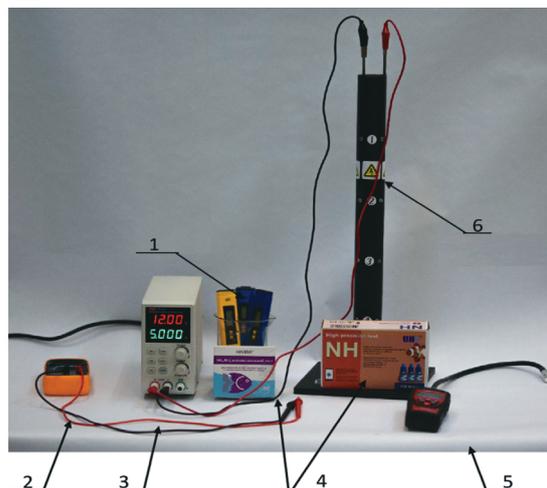


Рис. 1. Экспериментальная установка:

- 1 – рН-метр, солемер; 2 – тестер;
- 3 – лабораторный источник постоянного тока;
- 4 – профессиональные тесты NH₃/NH₄;
- 5 – газоанализатор; 6 – колонна

Fig. 1. Experimental installation:

- 1 – pH-meter, salt meter; 2 – tester;
- 3 – laboratory DC source;
- 4 – professional NH₃/NH₄ tests; 5 – gas analyzer; 6 – column

Параметры электродов колонны

Таблица 2

Column electrode parameters

Table 2

| Параметры электрода / Electrode parameters | Анод «+» | Катод «-» |
|--|----------|-----------|
| Диаметр контактной поверхности, м / Diameter of contact surface, m | 0,016 | 0,046 |
| Длина круга, м / Circle length, m | 0,05 | 0,144 |
| Площадь контактной поверхности при уровне электролита в экспериментальной установке 0,295 м, м ² / Area of contact surface at the electrolyte level in the experimental installation of 0.295 m, m ² | 0,015 | 0,042 |
| Площадь поперечного сечения, м ² / Cross-sectional area, m ² | 0,0001 | 0,0003 |

Электролит объемом 500 мл помещался в колонну между электродами (рис. 2) и обрабатывался постоянным током в течение 1, 3, 4 и 9 мин.

Исследования проводились при концентрации аммония в электролите 60, 90 и 300 мг/л.

Выход газообразных азотных соединений фиксировался при помощи газоанализатора. После завершения

эксперимента определялись параметры электролита: концентрация азотных соединений, мг/л и водородный показатель pH.

Результаты и их обсуждение

Воздействие электрического поля на водный раствор NH_4^+ концентрацией 60 мг/л привело к снижению концентрации аммонийных соединений азота: после обработки в течение 1 мин концентрация составила 4 мг/л, через 3 мин – 2 мг/л, через 6 мин – 1 мг/л, через 9 мин – 0 мг/л (рис. 3). Результаты исследований позволяют говорить об уменьшении токсичности электролита. При концентрации аммонийного азота в электролите 60 мг/л начальное значение pH соответствовало 6, после 9 мин обработки pH = 8,4.

Тенденция уменьшения концентрации наблюдалась и в опыте с начальной концентрацией азотных соединений в электролите 90 мг/л: после обработки в течение 1 мин концентрация составила 6 мг/л, через 3 мин – 4 мг/л, через 6 мин – 2 мг/л, через 9 мин – 0 мг/л (рис. 4). После эксперимента изменилось значение показателя pH с 5,58 до 7,81.

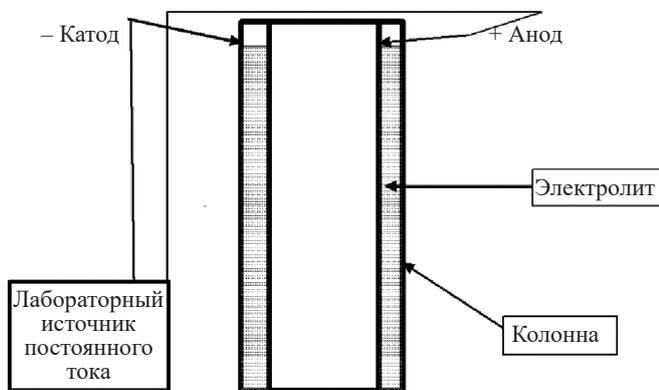


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки

Fig. 2. Principle scheme of the experimental installation

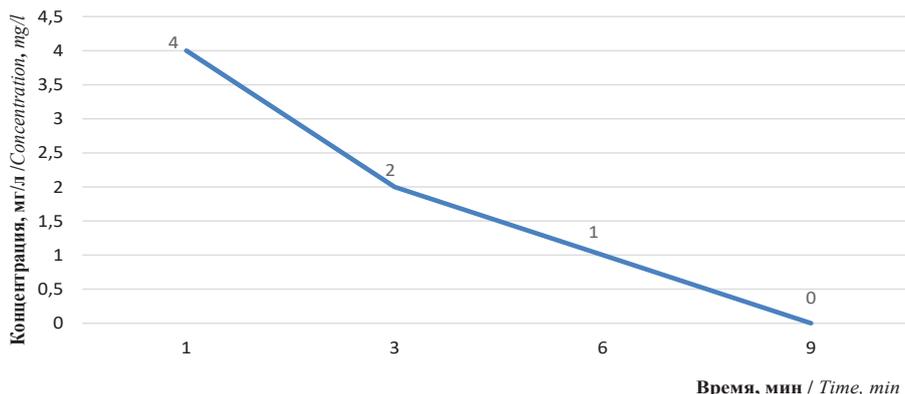


Рис. 3. Изменение концентрации NH_4^+ в электролите при воздействии электрического поля (начальная концентрация аммония – 60 мг/л)

Fig. 3. Change of the NH_4^+ concentration in electrolyte under the influence of the electric field (initial ammonium concentration of 60 mg/l)

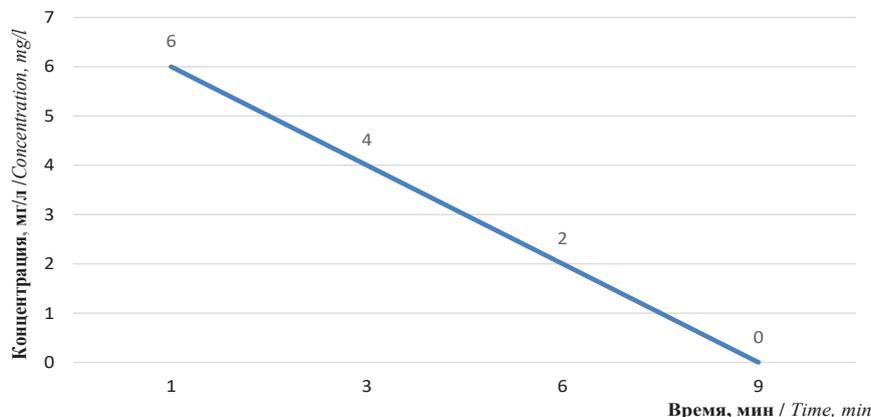


Рис. 4. Изменение концентрации электролита при воздействии электрического поля (начальная концентрация NH_4^+ – 90 мг/л)

Fig. 4. Change of the electrolyte concentration under the influence of the electric field (initial NH_4^+ concentration of 90 mg/l)

При следующей серии опытов начальная концентрация электролита составила 300 мг/л, через те же интервалы времени проведения эксперимента конечные значения составили 75, 65, 45 и 15 мг/л (рис. 5).

Отметим, что концентрация 300 мг/л соответствует реальной концентрации аммония в сточных водах животноводческих комплексов. Значение показателя

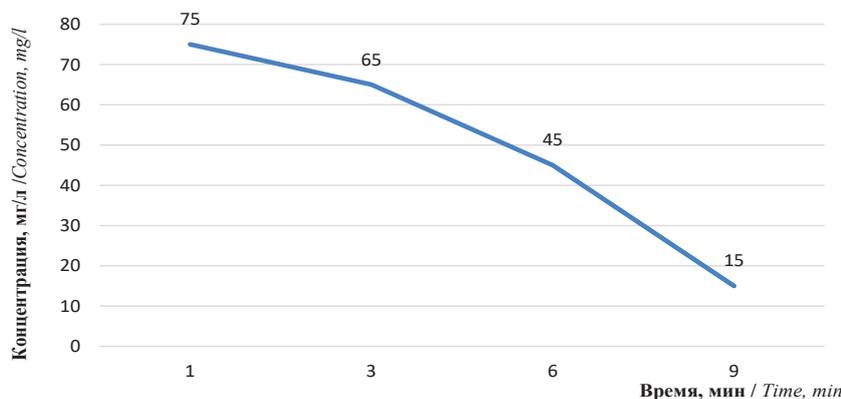


Рис. 5. Изменение концентрации электролита при воздействии электрического поля (начальная концентрация NH_4^+ – 300 мг/л)

Fig. 5. Change of the electrolyte concentration under the influence of the electric field (initial NH_4^+ concentration of 300 mg/l)

Выводы

1. Сточные воды животноводческих комплексов являются водными растворами аммонийных соединений. Снизить их концентрацию позволяет электролиз. Обработка раствора аммония концентрацией 300 мг/л в течение 1 мин снижает его концентрацию до 75 мг/л, что говорит о перспективности данного способа очистки и разработки промышленного образца технического средства для обработки стоков животноводства.

2. Снижение концентрации аммонийного азота уменьшает экологическую нагрузку на почву,

pH изменилось с 5,53 до максимального конечного pH = 8,88.

Снижение концентрации аммония в растворе электролита при электролизе достигается за счет получения N_2 , выход которого фиксировался газоанализатором. В процессе проведения эксперимента не зафиксировано присутствие NH_3 , NO и NO_2 . Отсутствие аммиака подтверждается изменением pH электролита с 5,58 до 8,88.

грунтовые и поверхностные воды и позволит повысить качество растениеводческой продукции, выращиваемой на сельскохозяйственных угодьях, на которых утилизируются стоки животноводческих комплексов.

3. Изменение pH электролита с кислотной до щелочной реакции положительно повлияет на почвы Центральной Нечерноземной зоны РФ, так как почвы в своем большинстве имеют водородный показатель значительно ниже 7 и нуждаются в дополнительных мероприятиях по его повышению.

Список источников

1. Тиво П.Ф., Анженков А.С., Саскевич Л.А., Бут Е.А. Анализ современных технологий использования животноводческих стоков // Мелиорация. 2017. № 3 (81). С. 54-63. EDN: YLONHR
2. Kadlec R., Knight R., Vymazal J., Brix H., Cooper P., Haberl R. Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation. 2000. 171 p. <http://library.oapen.org/handle/20.500.12657/30978>
3. Водяников В.И., Николаев С.И., Шкаленко В.В. Экологические проблемы животноводческих комплексов // Стратегическое эколого-экономическое развитие регионов и муниципальных образований в условиях глобализации: Материалы Международной научно-практической конференции, Москва, 30 марта 2017 г. М.: Российская академия естественных наук, 2017. С. 212-218. EDN: YQMRKZ
4. Васюков А.Е., Самсонова Е.С. Исследование сорбции-десорбции нитрат-ионов почвами потенциометрическим методом // Научные труды Калужского государственного университета имени К.Э. Циолковского: Материалы докладов, г. Калуга,

References

1. Tivo P.F., Anzhenkov A.S., Saskevich L.A., But E.A. Analysis of modern technologies to use livestock waste. *Melioratsiya*. 2017;3:54-63. (In Russ.)
2. Kadlec R., Knight R., Vymazal J., Brix H., Cooper P., Haberl R. Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation. 2000. 171 p. <http://library.oapen.org/handle/20.500.12657/30978>
3. Vodyannikov V.I., Nikolaev S.I., Shkalenko V.V. Ecological problems of livestock facilities. *Strategicheskoe ekologo-ekonomicheskoe razvitie regionov i munitsipalnykh obrazovaniy v usloviyakh globalizatsii* [Strategic ecological and economic development of regions and municipalities in the context of globalization]: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Moscow, March 30, 2017. Moscow: Russian Academy of Natural Sciences, 2017. Pp. 212-218.
4. Vasyukov A.E., Samsonova E.S. Study of sorption-desorption of nitrate ions by soils by the potentiometric method. *Nauchnye Trudy Kaluzhskogo Gosudarstvennogo Universiteta imeni K.E. Tsiolkovskogo* [Scientific Proceedings of K.E. Tsiolkovsky Kaluga

13-14 апреля 2022 г. Калуга: Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, 2022. С. 205-211. EDN: NVEGQW

5. Кавердова И.С. Нитраты в почве и их влияние на качество овощей и здоровье людей // Исследования молодежи – экономике, производству, образованию: Материалы XIV Всероссийской молодежной научно-практической конференции, г. Сыктывкар, 17-21 апреля 2023 г. Сыктывкар: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 2023. С. 102-107. EDN: DYGNNGJ

6. Пироговская Г. Вымывание питательных элементов из почв: экономический аспект // Наука и инновации. 2024. № 3 (253). С. 73-80. <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2024-3-73-80>

7. Gogmachadze L.G., Khusnetdinova K.A., Stepanov A.L., Kravchenko I.K. Microcosm study of ammonium and drying impact on methane oxidation in agricultural soil. *Journal of Agriculture and Environment*. 2023;8(36). <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.36.7>

8. Mervin St.L., Joann K.W., Noura Z., Bernie J.Z. Chapter two – nitrogen dynamics and indices to predict soil nitrogen supply in humid temperate soils. *Advances in agronomy*. 2011;112:55-102. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385538-1.00002-0>

9. Keeney D.R., Nelson D.W. Nitrogen-Inorganic forms. *Agronomy Monographs*, 1982. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c33>

10. Cathcart J., Mason H., Sey B., Heinz J., Cannon K. Assessment of Environmental Sustainability in Alberta's Agricultural Watersheds Project. Alberta Agriculture and Rural Development, Edmonton, AB. 2008.

State University]: Conference proceedings, Kaluga, April 13-14, 2022 Kaluga: Kaluga State University named after K.E. Tsiolkovski, 2022. Pp. 205-211. (In Russ.)

5. Kaverdova I.S. Nitrates in the soil and their impact on the quality of vegetables and human health. *Issledovaniya molodezhi – ekonomike, proizvodstvu, obrazovaniyu* [Contribution of the Youth Research to Economy, Production, and Education]: Proceedings of the XIV All-Russian Youth Scientific and Practical Conference, Syktyvkar, April 17-21, 2023 Syktyvkar: St. Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov, 2023. Pp. 102-107. (In Russ.)

6. Pirauhovskaya H. Leasing of nutrients from soils: economic aspect. *Science and Innovations*. 2024;(3):73-80. (In Russ.) <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2024-3-73-80>

7. Gogmachadze L.G., Khusnetdinova K.A., Stepanov A.L., Kravchenko I.K. Microcosm study of ammonium and drying impact on methane oxidation in agricultural soil. *Journal of Agriculture and Environment*. 2023;8(36). <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.36.7>

8. Mervin St.L., Joann K.W., Noura Z., Bernie J.Z. Chapter two – nitrogen dynamics and indices to predict soil nitrogen supply in humid temperate soils. *Advances in agronomy*. 2011;112:55-102. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385538-1.00002-0>

9. Keeney D.R., Nelson D.W. Nitrogen-Inorganic forms. *Agronomy Monographs*, 1982. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c33>

10. Cathcart J., Mason H., Sey B., Heinz J., Cannon K. Assessment of Environmental Sustainability in Alberta's Agricultural Watersheds Project. Alberta Agriculture and Rural Development, Edmonton, AB. 2008.

Информация об авторах

Отари Назирович Дидманидзе¹, академик РАН,

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой тракторов и автомобилей; didmanidze@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2558-0585>, AuthorID: 311972

Алексей Владимирович Евграфов², д-р техн. наук, доцент кафедры тракторов и автомобилей; labpoliv@list.ru; <http://orcid.org/0000-0002-2313-2191>; AuthorID: 828739

Николай Николаевич Пуляев³, канд. техн. наук, доцент кафедры тракторов и автомобилей; pulyaev@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8984-4426>, AuthorID: 416620

Дмитрий Александрович Филимонов⁴, ассистент кафедры тракторов и автомобилей; dfilimonov3@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-5484-5334>, AuthorID: 1251247

^{1,2,3,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

Вклад авторов

О.Н. Дидманидзе – формулирование концепции экспериментальных исследований;

А.В. Евграфов – разработка методики проведения исследований; Н.Н. Пуляев – представление результатов, обработка полученных результатов;

Д.А. Филимонов – проведение экспериментальных исследований, подготовка графических материалов.

Конфликт интересов

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

Статья поступила в редакцию 09.07.2024; поступила после рецензирования и доработки 09.09.2024; принята к публикации 11.09.2024

Author Information

Otari N. Didmanidze¹, Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Tractors and Automobiles; didmanidze@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2558-0585>, AuthorID: 311972

Aleksei V. Evgrafov², DSc (Eng), Associate Professor, the Department of Tractors and Automobiles; labpoliv@list.ru; <http://orcid.org/0000-0002-2313-2191>; AuthorID: 828739

Nikolay N. Pulyaev³, CSc (Eng), Associate Professor, the Department of Tractors and Automobiles; pulyaev@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8984-4426>, AuthorID: 416620

Dmitry A. Filimonov⁴, Assistant Professor, the Department of Tractors and Automobiles; dfilimonov3@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-5484-5334>, AuthorID: 1251247

^{1,2,3,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; the Institute of Mechanical and Power Engineering named after V.P. Goryachkin; 127434, Moscow, 49, Timiryazevskaya Str.

Author Contribution

O.N. Didmanidze – conceptualization of experimental studies;

A.V. Evgrafov – research methodology;

N.N. Pulyaev – writing – original draft preparation, revising and editing; data curation;

D.A. Filimonov – investigation, visualization.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests and are responsible for plagiarism

Received 09.07.2024; Revised 09.09.2024; Accepted 11.09.2024.

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.892.86

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-10-15>

Исследование эффективности амидов жирных кислот в качестве ингибиторов атмосферной коррозии

С.М. Гайдар¹, А.М. Пикина²✉, А.С. Барчукова³, О.М. Лапсарь⁴, С.М. Ветрова⁵^{1,2,3,4,5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия^{1,2,4} Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство); г. Москва, Россия¹ techmash@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>² pikina@rgau-msha.ru ✉; <https://orcid.org/0000-0001-7116-3526>³ barchukova@rgau-msha.ru⁴ o.lapsary@rgau-msha.ru⁵ s.vetrova@rgau-msha.ru

Аннотация. Использование антикоррозионных средств увеличивает ресурс, повышает безотказность и сохраняемость сельскохозяйственной техники. Дефицит отечественных ингибиторов обусловлен отсутствием научно обоснованной концепции их создания, а также недостатком сырьевой базы. Авторами разработана технология получения амидов жирных кислот (АЖК) из триглицеридов растительного, животного происхождения или жиросодержащих отходов. Целью исследований являлась оценка эффективности амида жирных кислот в качестве ингибитора атмосферной коррозии. Сравнительная оценка защитной эффективности АЖК определялась согласно ГОСТ 9.054-75 при повышенных значениях относительной влажности и температуры воздуха, воздействии соляного тумана, при постоянном погружении в электролит и воздействии бромистоводородной кислоты. Сравнивались консервационные составы на основе АЖК 16%, Автокон ЛС, Кормин 50%, Росойл 700, Кормин 30%. Исследование защитных свойств составов проводили на образцах размерами 50 × 50 мм из стали марки Ст3. После окончания испытаний оценивали внешний вид образцов до удаления смазки и после него. По результатам каждого эксперимента защитные свойства консервационных составов располагали в ряду в порядке их снижения. По итогам 4-х экспериментов каждому составу присвоен балл, характеризующий суммарную оценку защитной способности составов согласно ГОСТ 9.407-2015. В результате исследований установлена зависимость эффективности консервационных масел от состава и количества ингибитора. Доказана эффективность амидов жирных кислот в качестве ингибитора атмосферной коррозии. Консервационное масло, изготовленное с использованием АЖК 16%, превышает защитный эффект аналогов в 1,1...2,0 раза.

Ключевые слова: сельскохозяйственная техника, ингибитор, коррозия, эффективность амидов жирных кислот, консервационное масло, защитный эффект

Для цитирования: Гайдар С.М., Пикина А.М., Барчукова А.С., Лапсарь О.М., Ветрова С.М. Исследование эффективности амидов жирных кислот в качестве ингибиторов атмосферной коррозии // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 5. С. 10-15. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-10-15>

ORIGINAL ARTICLE

Study of the effectiveness of fatty acid amides used as inhibitors of atmospheric corrosion

*S.M. Gaidar¹, A.M. Pikina²✉, A.S. Barchukova³, O.M. Lapsar⁴, S.M. Vetrova⁵*¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia² Kosygin State University of Russia; Moscow, Russia¹ techmash@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>² pikina@rgau-msha.ru ✉; <https://orcid.org/0000-0001-7116-3526>³ barchukova@rgau-msha.ru⁴ o.lapsary@rgau-msha.ru⁵ s.vetrova@rgau-msha.ru

Abstract. The use of anticorrosive agents increases the service life, reliability and safety of agricultural machinery. The shortage of domestic inhibitors is caused by the lack of a scientifically sound concept for their production,

as well as a lack of raw materials. The authors have developed a technology for the production of fatty acid amides (FAA) from triglycerides of vegetable, animal origin or fat-containing waste. The purpose of this study was to evaluate the effectiveness of fatty acid amide used as an inhibitor of atmospheric corrosion. A comparative assessment of the protective effectiveness of FAA was determined in accordance with GOST 9.054-75 at elevated values of relative humidity and air temperature, exposure to salt mist, with constant immersion in an electrolyte and exposure to the hydrobromic acid. The authors compared preservation compositions based on FAA 16%, Avtokon LS, Kormin 50%, Rosoil 700, Kormin 30%. The protective properties of the products were studied on samples with dimensions of 50 × 50 mm made of steel grade St3. After the tests, the appearance of the samples was evaluated before and after removing the lubricant. According to the results of each experiment, the protective properties of the preservation compounds were arranged in the decreasing order. According to the results of four experiments, each composition was assigned a score characterizing the total assessment of the protective ability of the compositions according to GOST 9.407-2015. As a result of the study, the relationship between the effectiveness of preservative oils and the composition and amount of the inhibitor has been established. The effectiveness of fatty acid amides used as an inhibitor of atmospheric corrosion has been proven. Preservation oil made using 16% FAA exceeds the protective effect of analogue products in 1.1 to 2.0 times.

Keywords: agricultural machinery, inhibitor, corrosion, effectiveness of fatty acid amides, preservation oil, protective effect

For citation: Gaidar S.M., Pikina A.M., Barchukova A.S., Lapsar O.M., Vetrova S.M. Study of the effectiveness of fatty acid amides used as inhibitors of atmospheric corrosion. *Agricultural Engineering (Moscow)*. (In Russ.). 2024;26(5):10-15. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-10-15>

Введение

Сельскохозяйственная техника (СХТ) на всех этапах эксплуатации подвергается воздействию климатических и эксплуатационных факторов. Известно, что 70...80% деталей машин и элементов конструкций выходят из строя вследствие атмосферной коррозии и механических нагрузок. Из них доля поломок по причине потери прочности по причине коррозионного износа составляет 20...25% [1].

Необходимым условием сохранения ресурса и работоспособности СХТ является консервация, способная защищать металлические поверхности машин и оборудования от воздействия климатических факторов, вызывающих электрохимическую коррозию [2].

Для сельскохозяйственной техники рекомендована широкая номенклатура защитных материалов (ЗМ), выпускаемых отечественными производителями, однако их применение показало низкую эффективность. Анализ научных исследований выявил несколько причин этого [3]:

- отсутствие научной концепции разработки защитных материалов;
- сокращение сырьевой базы для производства полифункциональных ингибиторов;
- прекращение выпуска противокоррозионных материалов крупными нефтеперерабатывающими предприятиями ввиду их низкой рентабельности [4, 5].

Прекращение выпуска такого продукта, как синтетические жирные кислоты, привело к сокращению

на рынке целого ряда эффективных ингибиторов коррозии.

Ингибиторы коррозии в настоящее время выпускаются, как правило, на небольших химических предприятиях. Их продукты часто поставляются на рынок без должных лабораторных и натуральных испытаний, и как следствие, заявленная защитная эффективность является декларацией. Для получения достоверного защитного эффекта ингибитора коррозии целесообразно проводить сравнительные испытания методами, определенными ГОСТ 9.054-75.

Ранее авторами была разработана технология получения амидов жирных кислот (АЖК) из триглицеридов растительного, животного происхождения или жиросодержащих отходов.

Цель исследований: оценить защитную эффективность ингибитора коррозии на основе амидов жирных кислот по результатам сравнительных испытаний методами ГОСТ 9.054-75.

Материалы и методы

В исследованиях испытывали ингибиторы коррозии 5 составов:

- опытный образец – 16%-ный раствор ингибитора АЖК в минеральном масле И-20 [6];
- консервационное масло Автокон ЛС (ТУ 2389-059-27991970-00);
- консервационное масло Росойл 700 (ТУ 0253-027-06377289-2000);
- 50%-ный раствор ингибитора Кормин в минеральном масле (ТУ 38.1011159-88);

- 30%-ный раствор ингибитора Кормин в минеральном масле (ТУ 38.1011159-88).

Сравнительная оценка защитной эффективности опытного образца определялась по 1, 3, 4, 5 методам ГОСТ 9.054-75 [7, 8].

Исследование защитных свойств составов проводили на образцах размерами 50×50 мм из стали марки Ст3. Образцы перед испытаниями протирали чистой сухой салфеткой. Шероховатость поверхности (Ra), измеренная на 5 образцах в 4 точках, составила 0,30 мкм по наружной поверхности, 1,59 мкм – по внутренней.

Консервацию образцов проводили в течение 3-5 мин, после чего образцы выдерживались на воздухе в наклонном положении для удаления излишков нанесенного состава. Выдержка образцов продолжалась в течение 60 мин при обдуве вентилятором (температура составляла $\sim 60^\circ\text{C}$).

Оценка защитных свойств составов осуществлялась по времени появления первого очага коррозионного поражения и по площади коррозионного разрушения за время испытаний (скорости появления и развития коррозии) [9-11].

Исследование защитных свойств по 1 методу ГОСТ 9.054 (при повышенных значениях относительной влажности и температуры воздуха с периодической конденсацией влаги) проводилось в течение 45 рабочих циклов (63 суток). Испытания проводились в камере влажности SC450 (КСТ).

При исследовании защитных свойств по 3 методу ГОСТ 9.054 (при воздействии соляного тумана) дисперсность и водность соляного тумана контролировали по ГОСТ 15151-69. Водность соляного тумана поддерживали на уровне 0,5...0,8 мл/ч. Образцы испытывались при температуре $35 \pm 2^\circ\text{C}$ и при воздействии соляного тумана, создаваемого распылением 5%-ного раствора хлористого калия.

При исследовании защитных свойств по 4 методу ГОСТ 9.054 (при постоянном погружении в электролит) образцы с нанесенными консервационными составами помещали в стаканы с электролитом и выдерживали в нем при комнатной температуре ($23...27^\circ\text{C}$) в течение 24 ч.

После окончания испытаний оценивали: внешний вид раствора (цвет, наличие рыжей взвеси гидроокиси железа и масляной пленки на поверхности электролита); внешний вид образцов до удаления смазки и после него.

При исследовании защитных свойств по 5 методу ГОСТ 9.054 (при воздействии бромистоводородной кислоты) образец после окунания в 0,1%-ный раствор бромистоводородной кислоты обрабатывали в исследуемом консервационном составе при рабочей

температуре 60°C (в связи с высокой вязкостью ряда составов при комнатной температуре). Оценка защитной способности осуществлялась после 4-х ч выдержки при комнатной температуре по внешнему виду образца до удаления слоя консервационного состава и после него.

Результаты и их обсуждение

Защитные свойства опытного образца АЖК 16% в сравнении с другими составами исследовали с помощью четырех методов.

В результате воздействия повышенных значений относительной влажности и температуры воздуха в течение 45 рабочих циклов на испытуемых образцах очаги коррозии не наблюдались.

Результаты воздействия соляного тумана на образцы представлены в таблице 1.

По результатам второго эксперимента защитные свойства консервационных составов в порядке их снижения можно расположить в такой последовательности: АЖК 16%; Автокон ЛС; Кормин 50%; Росойл 700; Кормин 30%.

Исследование защитных свойств составов при постоянном погружении образцов течение 24 ч в стакан с электролитом при температуре $23...27^\circ\text{C}$ показали следующие результаты:

1. В электролите с образцами, обработанными составами Кормин 30% и Росойл 700, присутствует взвесь гидроокиси железа, в других стаканах взвесь отсутствует.

2. В стаканах с образцами, обработанными составами АЖК 16%, Автокон ЛС и Кормина, всплытие масла не наблюдается, в остальных случаях на поверхности электролита присутствует пленка масла с продуктами коррозии.

3. Отсутствует набухание пленки составов на всех образцах.

В 3 эксперименте защитная способность составов снижается в ряду: АЖК 16%; Автокон ЛС; Росойл 700; Кормин 30%; Комин 50%, причем у последних 3-х образцов защитная способность на одном уровне.

Результаты исследования защитных свойств составов при воздействии бромистоводородной кислоты представлены в таблице 2 и на рисунке 1.

Составы в порядке снижения защитной способности (способности вытеснять бромистоводородную кислоту) можно расположить в такой последовательности: АЖК 16%; Автокон ЛС; Росойл 700; Кормин 30%; Кормин 50%.

Итоговые результаты исследований защитных свойств 5 консервационных составов представлены на рисунке 2. Количество баллов, проставленных

Таблица 1

Результаты исследований консервационных составов при воздействии соляного тумана

Table 1

Results of studies of conservation compositions under the influence of salt mist

| Состав <i>Composition</i> | Время воздействия, ч / <i>Exposure time, h</i> | | |
|---------------------------------|---|---|--|
| | 2 | 4 | 6 |
| Автокон ЛС <i>Avtokon LS</i> | Без коррозии <i>No corrosion</i> | Без коррозии <i>No corrosion</i> | Три точки коррозии размером 2,1,2 мм ($S_{кор}$ менее 3%) <i>Three corrosion points 2, 1, and 2 mm in size ($S_{кор}$ less than 3%)</i> |
| АЖК 16% <i>FAA 16%</i> | Без коррозии <i>No corrosion</i> | Без коррозии <i>No corrosion</i> | Одна точка коррозии по торцу размером 1 мм ($S_{кор}$ менее 1%) <i>One corrosion point of 1 mm in size along the end face ($S_{кор}$ less than 1%)</i> |
| Росойл 700 <i>Rosoil 700</i> | 2 точки коррозии 1 мм <i>One corrosion point with a size of 1 mm</i> | Без изменения <i>No change</i> | Несколько точек и пятен коррозии размером 1, 3, 5 мм ($S_{кор}$ менее 5%) <i>Several points and spots of corrosion of 1, 3, and 5 mm in size ($S_{кор}$ less than 5%)</i> |
| Кормин 30% <i>Kormin 30%</i> | Пятна коррозии 5...10 мм более чем на 50% поверхности <i>Corrosion spots of 5 to 10 mm in size over more than 50% of the surface</i> | Усиление коррозии <i>Increased corrosion</i> | Сплошная коррозия на 50% поверхности <i>Continuous corrosion over 50% of the surface</i> |
| Кормин 50% <i>Kormin 50%</i> | Без коррозии <i>No corrosion</i> | Без коррозии <i>No corrosion</i> | Одна точка коррозии размером 1 мм ($S_{кор}$ менее 1%) <i>One corrosion point, 1 mm in size ($S_{кор}$ less than 1%)</i> |

Таблица 2

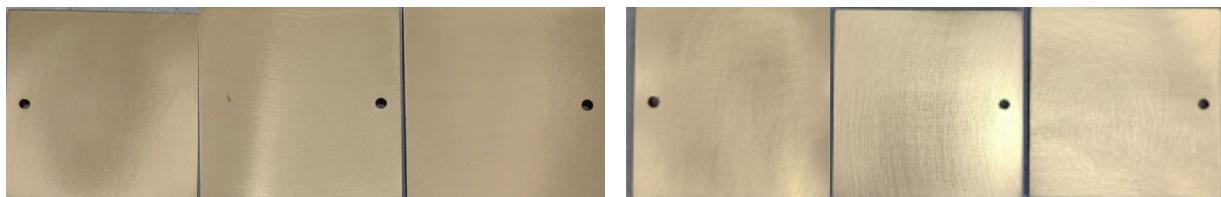
Результаты испытаний консервационных составов при воздействии бромистоводородной кислоты

Table 2

Test results of preservation formulations under the influence of hydrobromic acid

| Состав <i>Composition</i> | Внешний вид образца до удаления смазки <i>Appearance of the sample before removing the lubricant</i> | Внешний вид образца после удаления смазки <i>Appearance of the sample after removing the lubricant</i> |
|--------------------------------|---|---|
| Автокон ЛС / <i>Avtokon LS</i> | Без коррозии / <i>No corrosion</i> | Без коррозии / <i>No corrosion</i> |
| АЖК 16% / <i>FAA 16%</i> | Без коррозии / <i>No corrosion</i> | Без коррозии / <i>No corrosion</i> |
| Росойл 700 / <i>Rosoil 700</i> | Без коррозии / <i>No corrosion</i> | Без коррозии / <i>No corrosion</i> |
| Кормин 30% / <i>Kormin 30%</i> | Множество очагов коррозии <i>Many pockets of corrosion</i> | Значительные очаги коррозии <i>Significant pockets of corrosion</i> |
| Кормин 50% / <i>Kormin 50%</i> | Несколько точек коррозии размером 1...2 мм <i>Several corrosion points, 1 to 2 mm in size</i> | Несколько точек коррозии размером 1...2 мм <i>Several corrosion points, 1 to 2 mm in size</i> |

До испытаний / *Before the tests*



После испытаний / *After the tests*



а

б

Рис. 1. Сравнение защитной способности Кормин 30% (а) и АЖК 16% (б)

Fig. 1. Comparison of the protective ability of Kormin 30% (a) and FAA 16% (b)

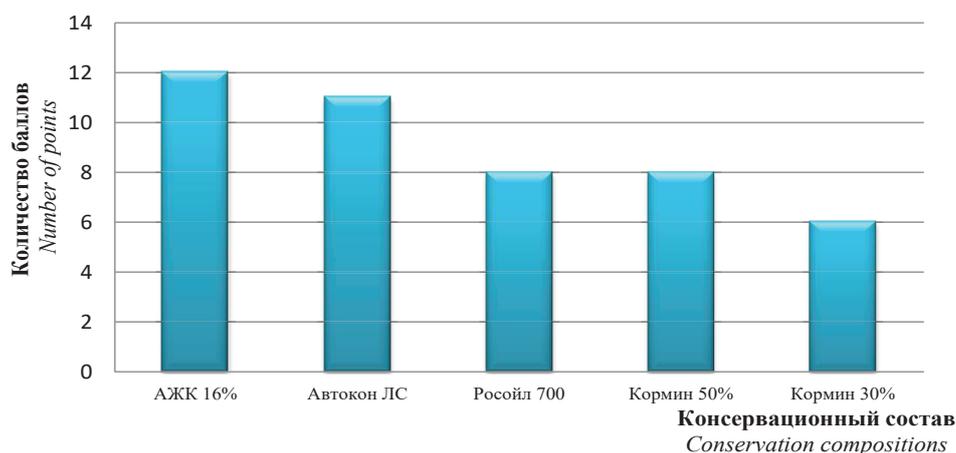


Рис. 2. Результаты испытаний защитных свойств консервационных составов, проведенных по ГОСТ 9.054-75

Fig. 2. Test results for the protective properties of conservation products carried out according to GOST 9.054-75

каждому составу, является суммарной оценкой защитной способности составов согласно ГОСТ 9.407-2015 «Единая система защиты от коррозии и старения».

По результатам сравнительных испытаний согласно ГОСТ 9.054-75 доказана эффективность амидов жирных кислот. Эффективность ингибитора коррозии АЖК 16% выше, чем у составов на основе Автокон ЛС, Кормин и Росойл 700.

Список источников

- Северный А.Э., Щеглов Е.В., Павшенцев В.П. и др. Повышение защитной способности консервационных составов // Мир транспорта и технологических машин. 2009. № 3. С. 44-47 EDN: TBTNNJ
- Вигдорович В.И., Цыганкова Л.Е., Емельяненко А.М. и др. Коррозия и кинетика электродных процессов на стали с гидрофобным покрытием в хлоридной среде и с добавкой сероводорода // Коррозия: материалы, защита. 2020. № 2. С. 21-26. EDN: OXETLJ
- Гайдар С.М., Низамов Р.К., Прохоренков В.Д., Кузнецова Е.Г. Инновационные консервационные составы для защиты сельскохозяйственной техники от коррозии // Техника и оборудование для села. 2012. № 11. С. 40-43. EDN: PGKURB
- Гайдар С.М., Пикина А.М., Лапсарь О.М., Голубев И.Г. Разработка технологии переработки жировых отходов в продукты технического назначения // Техника и оборудование для села. 2023. № 3 (309). С. 32-35. EDN: WUTRYF
- Gaidar S.M., Pikina A.M., Sergeeva N.A., Lapsar', O.M. Technology for producing anticorrosive materials from fat-containing waste. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(2):57-64. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-57-64>
- Способ получения моно- и диэтаноламидов жирных кислот: Патент на изобретение RU2787477 C1; МПК C07C233/18, C07C231/02 / С.М. Гайдар, В.Е. Коноплев, О.М. Лапсарь, Т.И. Балькова, А.М. Пикина, И.А. Посулько. Заявка № 2022109878 от 13.04.2022 г. EDN: BNRHHH
- Веролайнен Н.В., Ворончихина Л.И. Поверхностная активность и поверхностно-активные вещества // Вестник Тверского государственного университета. Серия «Химия». 2009. № 9. С. 4-19. EDN: OPVIZB

Выводы

- Экспериментальные исследования показали зависимость эффективности консервационных масел от состава и количества ингибитора, причем чем жестче условия проведения испытаний, тем сильнее проявляется эффект.
- Консервационное масло, изготовленное с использованием АЖК 16%, превышает защитный эффект аналогов в 1,1...2,0 раза.

References

- Severny A.E. et al. Improving the protective ability of conservation compositions. *World of Transport and Technological Machines*. 2009;3:44-47. (In Russ.)
- Vigdorovich V.I., Tsygankova L.E., Emelianenko A.M. et al. Corrosion and kinetics of electrode processes on steel with a hydrophobic coating in a chloride medium and with the addition of hydrogen sulfide. *Korroziya: Materialy, Zashchita*. 2020;2:21-26. (In Russ.)
- Gaidar S.M., Nizamov R.K., Prokhorenkov V.D., Kuznetsova E.G. The innovative conservation compounds for corrosion protection of agricultural equipment. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2012;11:40-43. (In Russ.)
- Gaidar S.M., Pikina A.M., Lapsar O.M., Golubev I.G. Development of technology for processing fat waste into technical products. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;3(309):32-35. (In Russ.)
- Gaidar S.M., Pikina A.M., Sergeeva N.A., Lapsar', O.M. Technology for producing anticorrosive materials from fat-containing waste. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(2):57-64. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-57-64>
- Method for producing mono- and diethanolamides of fatty acids: patent for invention RU2787477 C1; IPC C07C233/18, C07C231/02 / S.M. Gaidar, V.E. Konoplev, O.M. Lapsar, T.I. Balkova, A.M. Pikina, I.A. Posunko. Application No. 2022109878 dated 04/13/2022 (In Russ.)
- Verolainen N.V., Voronchikhina L.I. Surface activity and surfactants. *Vestnik Tverskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Series: Chemistry*. 2009;9:4-19. (In Russ.)
- Mansuraeva L.M., Yusupova I.I., Bulaev S.A. Surfactants: properties and application. *Vestnik Magistratury*. 2022;2-1(125):30-35. (In Russ.)

8. Мансураева Л.М., Юсупова И.И., Булаев С.А. Поверхностно-активные вещества: свойства и применение // Вестник магистратуры. 2022. № 2-1 (125). С. 30-35. EDN: RVKJKB

9. Карелина М.Ю., Дмитриевский А.Л., Лагузин А.Б. Влияние концентрации Фтор-ПАВ на качество защитной молекулярной пленки // Грузовик. 2018. № 7. С. 16-20. EDN: XZCIPJ

10. Карелина М.Ю. Концепция создания ингибиторов коррозии с использованием нанотехнологических подходов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2015. № 3 (42). С. 8-11. EDN: УННКRN

11. Емельянов А.А., Гайдар С.М., Балькова Т.И. Исследование ингибирующего действия поверхностно-активных органических веществ (паов) методом поляризационных измерений // Электротехнология. 2023. № 8. С. 30-40. EDN: QBLVTU

Информация об авторах

Сергей Михайлович Гайдар^{1,2}, д-р техн. наук, профессор; techmash@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>; Scopus Author ID: 57191589797; Researcher ID: I-4723-2018

Анна Михайловна Пикина^{1,2,3}, канд. техн. наук, доцент; pikina@rgau-msha.ru³; <https://orcid.org/0000-0001-7116-3526>

Алина Сергеевна Барчукова¹, аспирант; barchukova@rgau-msha.ru

Оксана Михайловна Лапсарь^{1,2}, аспирант;

o.lapsary@rgau-msha.ru

Софья Михайловна Ветрова¹, аспирант; s.vetrova@rgau-msha.ru

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434,

Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

² Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство); 119071,

Российская Федерация, г. Москва, ул. Малая Калужская, 1

Вклад авторов:

С.М. Гайдар – научное руководство, формулирование основных направлений исследований, формулирование общих выводов; Барчукова А.С. – формулирование общих выводов, литературный анализ, обработка результатов исследований;

Лапсарь О.М. – формулирование общих выводов, литературный анализ, обработка результатов исследований;

Ветрова С.М. – формулирование общих выводов, литературный анализ, обработка результатов исследований;

А.М. Пикина – обработка результатов исследований, подготовка рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила в редакцию 24.06.2024; поступила после рецензирования и доработки 11.09.2024; принята к публикации 14.09.2024

9. Karelina M.Yu., Dmitrevskij A.L., Laguzin A.B. Influence of fluoro-surfactant concentration on the quality of protective molecular film. *Gruzovik*. 2018;7:16-20. (In Russ.)

10. Karelina M.Yu. Conception of creating corrosion inhibitors with usage of nanotechnological approaches. *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. 2015;3:8-11. (In Russ.)

11. Emelyanov A.A., Gaidar S.M., Balkova T.I. Investigation of the inhibitory effect of surfactants by method of polarization measurements. *Elektrometallurgiya*. 2023;8:30-40. (In Russ.)

Authors Information

Sergey M. Gaidar^{1,2}, DSc (Eng), Professor, techmash@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>; Scopus Author ID: 57191589797; Researcher ID: I-4723-2018

Anna M. Pikina^{1,2,3}, CSc (Eng), Associate Professor; pikina@rgau-msha.ru³; <https://orcid.org/0000-0001-7116-3526>

Alina S. Barchukova¹, postgraduate student, barchukova@rgau-msha.ru

Oksana M. Lapsary^{1,2}, postgraduate student, o.lapsary@rgau-msha.ru

Sofya M. Vetrova¹, postgraduate student, s.vetrova@rgau-msha.ru

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

² Kosygin State University of Russia; 1, Malaya Kaluzhskaya str., Moscow, 119071, Russian Federation

Author Contribution

Gaidar S.M. – research supervision, conceptualization, general conclusions;

Barchukova A.S. – general conclusions, literature review, investigation, data curation;

Lapsary O.M. – general conclusions, literature review, literary analysis, investigation, data curation;

Vetrova S.M. – general conclusions, literature review, literary analysis, investigation, data curation;

Pikina A.M. – data curation, writing – original draft preparation, revising and editing

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests and are responsible for plagiarism

Received 24.06.2024; Revised 11.09.2024; Accepted 14.09.2024.

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.352.02

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-16-21>

Сегментно-пальцевая косилка для скашивания естественных и сеяных трав в условиях малых форм хозяйствования

В.Ф. Первушин¹, Ф.М. Абдуллин², М.З. Салимзянов³, А.Г. Ипатов⁴, А.Г. Иванов⁵^{1,2,3,4,5} Удмуртский государственный аграрный университет; г. Ижевск, Россия¹ pervushin54@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0572-2080>³ salimmar@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0877-4372>⁴ Ipatow.al@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2637-4214>⁵ ivalgen@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7111-7642>

Аннотация. При заготовке кормов применяют в основном сегментно-пальцевые косилки. Для улучшения их качественных и эксплуатационных показателей необходимо изучить траекторию движения, скорость и ускорение ножа косилки в условиях изменяющегося рельефа местности. С этой целью проведено исследование влияния изменения величины дезаксиала на качественные и энергетические показатели режущего аппарата косилки, а также определены параметры и режимы работы ножа косилки с аксиальным механизмом привода ножа. По результатам экспериментальных исследований установлено, что режущий аппарат в процессе копирования рельефа поля изменяет угол наклона относительно горизонта в пределах $\pm 15^\circ$. При этом величина дезаксиала изменяется в пределах 0,281...0,492 м с шагом в 1 градус. Изменение величины дезаксиала влечет за собой изменение хода, скорости и ускорения ножа. Используя аналитический метод кинематического исследования кривошипно-шатунных механизмов по Артоболовскому и выполнив расчеты в программе Excel, получили графические зависимости хода и скорости ножа в зависимости от углового расположения режущего аппарата с интервалом 0; 5; 10 и 15 градусов. Изменение расположения режущего аппарата до 15 градусов вызывает неравнозначность скоростей прямого и обратного хода ножа, а также увеличивает его с 76,2 до 89 мм, что повышает расход энергии на привод ножа до 17%. Недостатком дезаксиального кривошипно-шатунного механизма привода ножа является к тому же его динамическая неуравновешенность, которая только частично сглаживается установкой противовеса. Для устранения недостатков разработана экспериментальная косилка с аксиальным расположением КШМ на пальцевом брус режущего аппарата, позволяющая переводить пальцевой брус в транспортное положение в рабочем режиме режущего аппарата при объезде препятствий в виде кустарников, деревьев или грубых неровностей.

Ключевые слова: сегментно-пальцевая косилка, дезаксиал, кривошипно-шатунный механизм, механизм привода ножа, режущий аппарат, противовес

Для цитирования: Первушин В.Ф., Абдуллин Ф.М., Салимзянов М.З., Ипатов А.Г., Иванов А.Г. Сегментно-пальцевая косилка для скашивания естественных и сеяных трав в условиях малых форм хозяйствования // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 5. С. 16-21. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-16-21>

ORIGINAL ARTICLE

Segment-finger mower for cutting natural and artificially cultivated grasses in small-scale farming

V.F. Pervushin¹, F.M. Abdullin², M.Z. Salimzyanov³, A.G. Ipatov⁴, A.G. Ivanov⁵^{1,2,3,4,5} Udmurt State Agrarian University; Izhevsk, Russia¹ pervushin54@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0572-2080>³ salimmar@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0877-4372>⁴ Ipatow.al@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2637-4214>⁵ ivalgen@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7111-7642>

Abstract. Segment-finger mowers are used mainly in forage harvesting. To improve their qualitative and operational indicators it is necessary to study the trajectory of movement, speed and acceleration of the mower knife under variable terrain conditions. For this purpose, the authors studied the influence of change of the non-axial value on qualitative and energy indicators of the mower's cutter bar. They also determined parameters and operating modes of the mower knife with the axial knife drive mechanism. According to the results of experimental studies, it was established that

while copying the field relief, the cutter bar changes the angle of inclination relative to the horizon within the limits of ± 15 degrees. In this case, the non-axial value varies between 0.281 and 0.492 m with a step of one degree. The change of the non-axial value entails the change of the stroke, speed, and acceleration of the knife. Using the analytical method of kinematic study of crank mechanisms according to Artobolevsky's procedure and performing calculations in the Excel software kit, the authors have obtained graphical relationships between the knife stroke and speed depending on the angular position of the cutter bar with the interval of 0, 5, 10, and 15. A change in the location of the cutter bar up to 15 degrees causes unequal speeds of the forward and reverse knife strokes, increasing it from 76.2 to 89 mm, which increases the energy consumption for the knife drive up to 17%. Another disadvantage of the non-axial crank mechanism of the knife drive is its dynamic unbalance, which is only partially smoothed with a counterweight. To eliminate the drawbacks, the authors have developed an experimental mower with axial arrangement of the crank mechanism on the finger bar of the cutter bar. The new design makes it possible to activate the transport position of the finger bar in the working mode of the cutter bar when bypassing such obstacles as bushes, trees, or rough bumps.

Keywords: segment-finger mower, non-axial, crank mechanism, knife drive mechanism, cutter bar, counterweight

For citation: Pervushin V.F., Abdullin F.M., Salimzyanov M.Z., Ipatov A.G., Ivanov A.G. Segment-finger mower for cutting natural and artificially cultivated grasses in small-scale farming. *Agricultural Engineering (Moscow)*. (In Russ.). 2024;26(5):16-21. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-16-21>

Введение

В сельском хозяйстве при заготовке кормов широкое применение получили сегментно-пальцевые косилки (КС-Ф-2,1Б, КС-2,1М, КФН-2,1 и др.), характеризующиеся простотой конструкции. Режущий аппарат приводится в действие кривошипно-шатунным механизмом (КШМ), который конструктивно выполнен с наличием дезаксиала ξ , то есть со смещением оси вращения кривошипа относительно плоскости движения ножа (рис. 1).

Теоретическим исследованиям процесса резания сегментно-пальцевых косилок посвящены работы многих отечественных и зарубежных авторов. Аналитические исследования в кинематике и динамике кривошипно-шатунных механизмов отражены в работах И.И. Артоболевского. Исследованиям по уравновешиванию сил инерций ножа режущего аппарата посвящены работы Е.С. Босого. Однако до настоящего времени не были изучены зависимости траекторий движения, скорости и ускорения ножа режущего

аппарата в условиях изменяющегося внешнего фактора как рельефа местности, которому подвергается режущий аппарат во время работы. При этом в теоретических исследованиях сегментно-пальцевых косилок прибегают к ряду допущений, которые на практике оказывают существенное влияние на качественные и эксплуатационные показатели косилок.

Цель исследований: повышение производительности и эксплуатационной надежности сегментно-пальцевой косилки.

Материалы и методы

При скашивании трав режущий аппарат совершает свободное копирование рельефа местности, которое сопровождается изменением величины дезаксиала кривошипно-шатунного механизма (рис. 2).

Серийно выпускаемые промышленностью сегментно-пальцевые косилки имеют следующие конструктивные параметры привода ножа^{1,2} [1, 6-8]:

- радиус кривошипа $r = 0,038 \dots 0,040$ м;
- длина шатуна $L = 0,95$ м = 25 г;

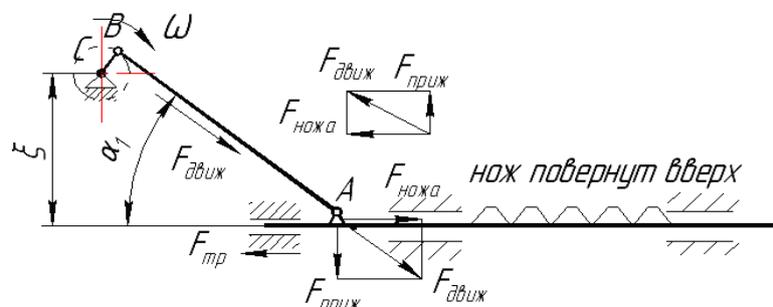


Рис. 1. Кривошипно-шатунный механизм серийных косилок. Схема работы

Fig. 1. Crank mechanism of serial mowers. Operation scheme

¹ Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1988. 636 с.

² Апокин Н.П. Анализ сил сопротивления движению ножа сегментно-пальцевого режущего аппарата с различными приводами механизмами // Вестник Челябинского государственного агроинженерного университета. 2006. Т. 48. С. 17-20.

- величина дезаксиала $h_0 = 0,266 \text{ м} = 7 \text{ r}$;
- угол наклона шатуна $\alpha = 16^\circ$.

В результате исследований режущего аппарата в процессе копирования установлено изменение угла наклона β в пределах $\pm 15^\circ$.

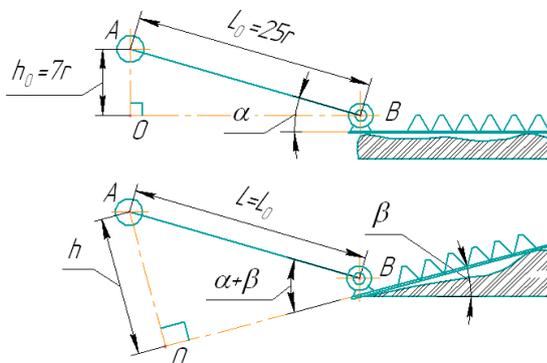


Рис. 2. Зависимость величины дезаксиала h от угла наклона β режущего аппарата

Fig. 2. Relationship between the non-axial value h and the cutter bar inclination angle β

Значения дезаксиала h в зависимости от угла расположения режущего аппарата β с шагом в 1 градус приведены в таблице.

Изменение величины дезаксиала влечет за собой изменение хода, скорости и ускорения ножа.

Используя аналитический метод кинематического исследования кривошипно-шатунных механизмов по Артоблевскому и выполнив расчеты в программе Excel, получили графические зависимости скорости ножа от углового расположения режущего аппарата β с интервалом 0; 5; 10 и 15 градусов (рис. 3).

Изменение расположения режущего аппарата до 15° вызывает неравнозначность скоростей прямого и обратного хода ножа, увеличивая ход ножа до 89 мм, что повышает затраты энергии по перемещению ножа до 17%.

К недостаткам дезаксиального кривошипно-шатунного механизма привода ножа относится также его динамическая неуровновешенность, которая частично сглаживается установкой противовеса (рис. 4).

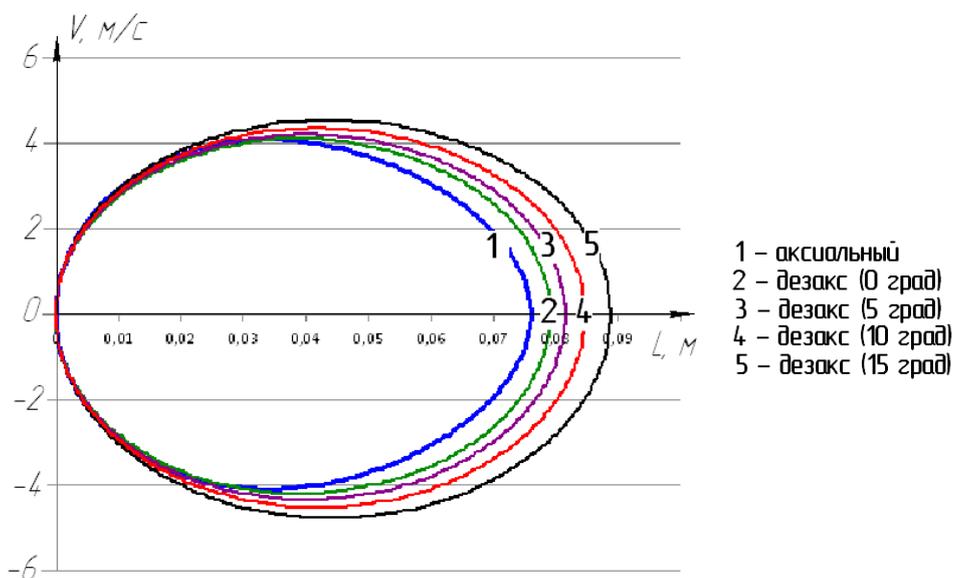
Величина дезаксиала h в зависимости от угла наклона β режущего аппарата

Таблица

Table

Deactivation value h depending on the cutter bar inclination angle β

| Угол β , град. Angle β , deg | Величина дезаксиала h , м Non-axial value h , m | Угол β , град. Angle β , deg | Величина дезаксиала h , м Non-axial value h , m | Угол β , град. Angle β , deg | Величина дезаксиала h , м Non-axial value h , m |
|---|--|---|--|---|--|
| 1 | 0,281 | 6 | 0,359 | 11 | 0,435 |
| 2 | 0,297 | 7 | 0,375 | 12 | 0,449 |
| 3 | 0,313 | 8 | 0,390 | 13 | 0,464 |
| 4 | 0,328 | 9 | 0,405 | 14 | 0,478 |
| 5 | 0,344 | 10 | 0,420 | 15 | 0,492 |



- 1 – аксиальный
- 2 – дезакс (0 град)
- 3 – дезакс (5 град)
- 4 – дезакс (10 град)
- 5 – дезакс (15 град)

Рис. 3. Характер изменения скорости ножа от увеличения его хода при угловом расположении режущего аппарата
Fig. 3. Pattern of change in the knife speed depending on the increase in its stroke at the angular arrangement of the cutter bar

Место установки противовеса (угол φ) на кривошипе определяется согласно Е.С. Босому по формуле:

$$\varphi = \arctg \left[\beta \left(1 + 0,5\beta^2 + \frac{3}{8}\lambda^2 \right) \right],$$

где β – отношение дезаксиала к длине шатуна, h/L ; λ – отношение длины кривошипа к длине шатуна, r/L .

Из выражения следует, что угол установки противовеса φ зависит от значений дезаксиала h , длины шатуна L и радиуса кривошипа r . Изменение значения дезаксиала, вызванное текущим угловым положением режущего аппарата, определяет новое значение угла установки противовеса. Следовательно, противовес, изготовленный с фиксированным углом φ , не обеспечивает устойчивого уравнивания механизма привода ножа при копировании рельефа поля режущим аппаратом.

Фактически в условиях изменяющегося рельефа местности на привод ножа дезаксиальным кривошипно-шатунным механизмом затрачивается больше энергии. Выявленные недостатки привода ножа снижают эксплуатационную надежность и срок службы косилки.

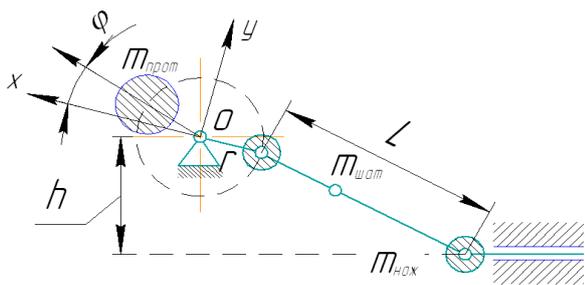


Рис. 4. Расположение противовеса кривошипа в дезаксиальном кривошипно-шатунном механизме привода ножа косилки

Fig. 4. Location of the crank counterweight in the non-axial crank mechanism of the mower knife drive mechanism

Результаты и их обсуждение

Для устранения указанных недостатков была разработана экспериментальная конструкция косилки с аксиальным расположением кривошипно-шатунного механизма привода режущего аппарата. Конструкция позволяет переводить пальцевый брус в транспортное положение без отключения ВОМ трактора (рис. 5) [3-5].

Экспериментальная косилка состоит из навесного устройства 1 (рис. 6), тяговой штанги 2, механизма подъема 3 и уравнивания 4 режущего аппарата 5, выполненного как одно целое с кривошипно-шатунным механизмом привода ножа 6, расположенного в полости внутреннего башмака 7, соединенного шарниром 8 с тяговой штангой 2.

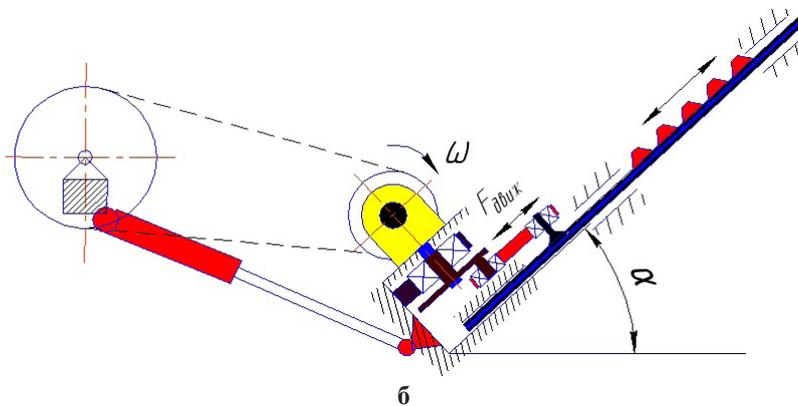
В состав режущего аппарата входят аксиальный КШМ 6 привода ножа, пальцевый брус 9, два башмака (внутренний 7 и наружный 10), отводная доска 11, нож 12, прижимные лапки 13, направляющие ножа 14, конический редуктор 15, клиноременная передача 16 и масляная полость 17.

Косилка работает следующим образом. При движении агрегата режущий аппарат выполняет срез растений на установленной башмаками высоте за счет шарнирного соединения 8 тяговой штанги с внутренним башмаком 7, обеспечивая копирование рельефа и допустимое удельное давление на почву за счет механизма уравнивания косилки 4. В рабочем положении режущего аппарата из масляной полости 17 внутреннего башмака 7 подается капельная смазка к направляющим ножа 14 [6-8].

Режущий аппарат переводится в транспортное положение гидроцилиндром 3, который поворачивает его вокруг оси 8 шарнирного соединения, соосного с валом редуктора 15. Окончательный перевод в транспортное положение производится навеской трактора.



а



б

Рис. 5. Косилка в транспортном положении режущего аппарата (а) и схема перевода режущего аппарата в транспортное положение (б)

Fig. 5. Mower in transport position of the cutter bar (a) and the procedure of activating the transport position of the cutter bar (b)

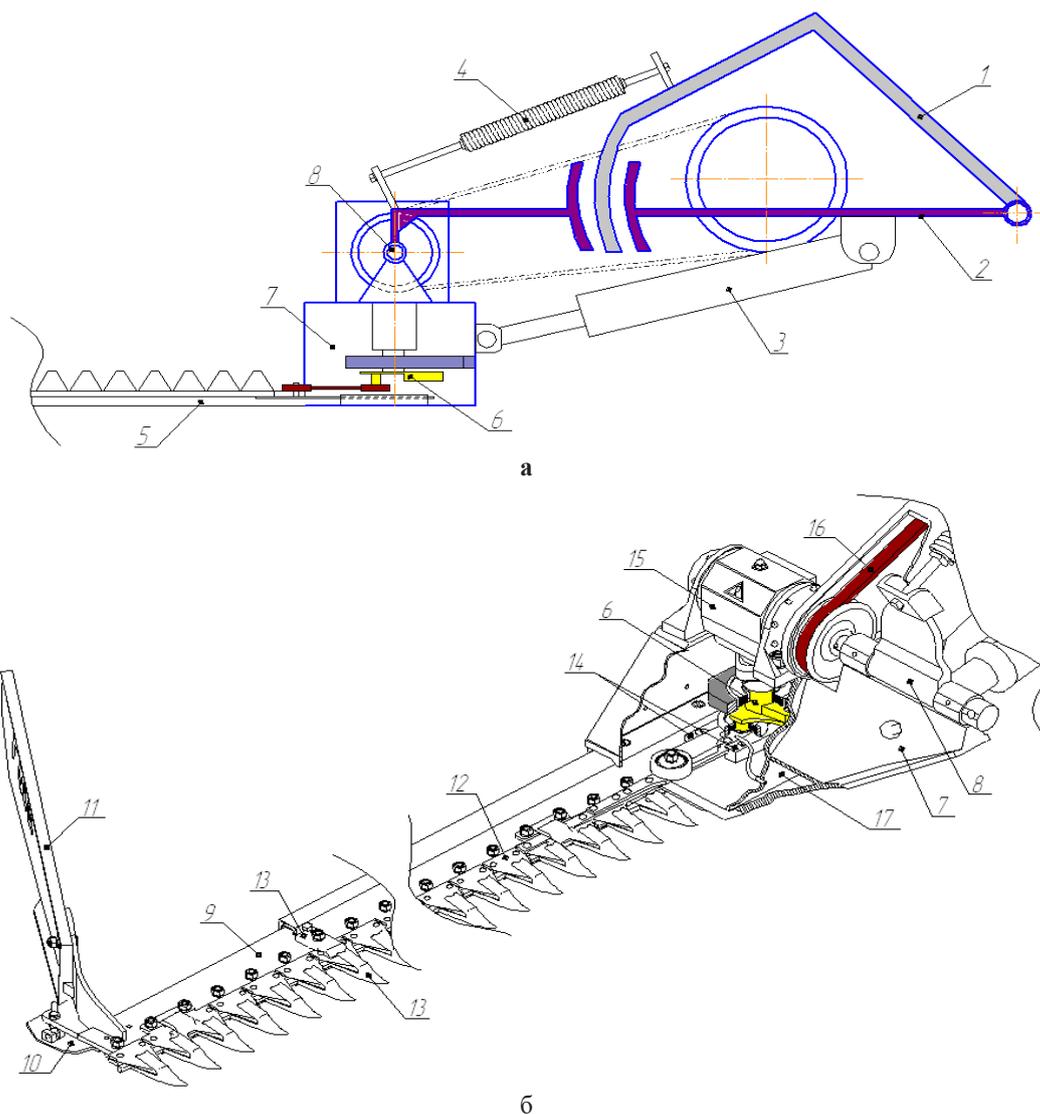


Рис. 6. Общая схема устройства (а) и 3D-модель режущего аппарата косилки с аксиальным расположением кривошипно-шатунного механизма (б):

- 1 – навесное устройство; 2 – тяговая штанга; 3 – гидроцилиндр; 4 – механизм подъема и уравнивания; 5 – режущий аппарат; 6 – аксиальный кривошипно-шатунный механизм привода ножа; 7, 10 – башмак внутренний и наружный; 8 – шарнирное соединение; 9 – пальцевый брус; 11 – отводная доска; 12 – нож; 13 – прижимные лапки; 14 – направляющие ножа; 15 – конический редуктор; 16 – клиноременная передача; 17 – масляная полость

Fig. 6. General scheme of the device (a) and 3D-model of the cutter bar of the mower with axial arrangement of the crank mechanism (b):

- 1 – attachment device; 2 – traction rod; 3 – hydraulic cylinder; 4 – lifting and balancing mechanism; 5 – cutter bar; 6 – axial crank mechanism of the knife drive; 7, 10 – inner and outer shoe; 8 – articulated joint; 9 – finger bar; 11 – diverter board; 12 – knife; 13 – presser feet; 14 – knife guides; 15 – conical reduction gear; 16 – V-belt gear; 17 – oil cavity

Конструктивные особенности экспериментальной косилки позволяют манипулировать работающим режущим аппаратом без отключения ВОМ трактора на участках, осложненных наличием кустарников, деревьев и других холмистых препятствий. Эти преимущества придают косилке повышенную производительность, маневренность и удобство в эксплуатации.

Выводы

1. Увеличение производительности сегментно-пальцевой косилкой достигается путем

сокращения времени на маневрирование, обкашивание различных препятствий в виде кустарников, деревьев и других холмистых участков, препятствующих работе косилки, а также за счет экономии времени на переезды с одного загона (участка) на другой.

2. Конструктивные особенности экспериментальной косилки позволяют выполнять скашивание естественных трав на крутых склонах и в логах со сложным рельефом местности, манипулируя работающим режущим аппаратом без отключения ВОМ трактора.

Список источников

1. Чайка В.П., Алдошин Н.В., Лылин Н.А. Перспективы развития конструкций режущих аппаратов // Чтения академика В.Н. Болтинского (115 лет со дня рождения): Сборник статей семинара; Под ред. М.Н. Ерохина. М.: Мегapolis, 2019. С. 49-56. EDN: WSEROW
2. Первушин В.Ф., Салимзянов М.З., Шакиров Р.Р., Касимов Н.Г., Абдуллин Ф.М. Сегментно-пальцевая косилка с бездеаксиальным кривошипно-шатунным механизмом // Сельский механизатор. 2023. № 11. С. 12-13. EDN: WUHGEA
3. Первушин В.Ф., Салимзянов М.З., Касимов Н.Г., Широков В.И., Шинкаренко С.Р. Теоретические исследования процесса скашивания трав сегментно-пальцевой косилкой // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 3 (67). С. 72-79. https://doi.org/10.48012/1817-5457_2021_3_72
4. Первушин В.Ф., Левшин А.Г., Салимзянов М.З., Ипатов А.Г., Широков В.И. Классификация ротационных рабочих органов сельскохозяйственных машин и их траектории движения // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 3. С. 57-64. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-57-64>
5. Pervushin V.F., Salimzyanov M.Z., Ivanov A.G., Kostin A.V., Shklyayev K.L. Theoretical prerequisites for substantiating the parameters of a rotary ripper for interrow potato cultivation. *E3S Web of Conferences*, Bishkek, 2022. Bishkek: EDP Sciences. 2023;380:01003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338001003>
6. Kalimullin M., Salimzyanov M., Pervushin V., Latypov R., Ayugin N., Sharipov R. Development and theoretical study of the impact of the working body on the soil. *BIO Web of Conferences: International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources"*, Kazan, 2022;52:00056. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20225200056>
7. Kemper S., Lang T., Frerichs L. The overlaid cut in a disc mower – results from field tests and simulation. *Landtechnik*. 2014;69(4):171-175.
8. Pirchio M. et al. Autonomous mower vs. rotary mower: effects on turf quality and weed control in tall fescue lawn. *Agronomy*. 2018;8(2):15. <https://doi.org/10.3390/agronomy8020015>

Информация об авторах

Владимир Федорович Первушин^{1✉}, д-р техн. наук, профессор; pervushin54@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-0572-2080>

Фаниль Мансурович Абдуллин², соискатель, канд. техн. наук

Марат Зуфарович Салимзянов³, канд. техн. наук, доцент; salimmar@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0877-4372>

Алексей Геннадьевич Ипатов⁴, канд. техн. наук, доцент; Ipatow.al@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2637-4214>

Алексей Генрихович Иванов⁵, канд. техн. наук, доцент; ivalgen@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7111-7642>

^{1,2,3,4,5} Удмуртский государственный аграрный университет; Россия, Удмуртская Республика, 426059, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 11.

Вклад авторов

В.Ф. Первушин – руководство исследованием, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование; Ф.М. Абдуллин – проведение исследований; М.З. Салимзянов – создание черновика рукописи; А.Г. Ипатов – концептуализация и формальный анализ; А.Г. Иванов – программное обеспечение и верификация данных.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила в редакцию 12.03.2024; поступила после рецензирования и доработки 01.04.2024; принята к публикации 05.04.2024

References

1. Chaika V.P., Aldoshin N.V., Lylin N.A. Prospects for the development of cutter equipment. Readings devoted to Academician V.N. Boltinsky (115th Anniversary of the scientist): Seminar proceedings; Ed. by M.N. Erokhin. Moscow, Megapolis, 2019. Pp. 49-56. (In Russ.)
2. Pervushin V.F., Salimzyanov M.Z., Shakirov R.R., Kasimov N.G., Abdulin F.M. Segment-tine mower with non-axial crank mechanism. *Selskiy Mekhanizator*. 2023;11:12-13. (In Russ.)
3. Pervushin V.F., Salimzyanov M.Z., Kasimov N.G., Shirobokov V.I., Shinkarenko S.R. Theoretical studies of the process of grass mowing by segmented-finger mower. *The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2021;3(67):72-79. (In Russ.) https://doi.org/10.48012/1817-5457_2021_3_72
4. Pervushin V.F., Levshin A.G., Salimzyanov M.Z., Ipatov A.G., Shirobokov V.I. Classification of rotary cultivation tools of agricultural machines and their motion trajectories. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(3):57-64. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-57-64>
5. Pervushin V.F., Salimzyanov M.Z., Ivanov A.G., Kostin A.V., Shklyayev K.L. Theoretical prerequisites for substantiating the parameters of a rotary ripper for interrow potato cultivation. *E3S Web of Conferences*, Bishkek, 2022. Bishkek: EDP Sciences. 2023;380:01003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338001003>
6. Kalimullin M., Salimzyanov M., Pervushin V., Latypov R., Ayugin N., Sharipov R. Development and theoretical study of the impact of the working body on the soil. *BIO Web of Conferences: International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources"*, Kazan, 2022;52:00056. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20225200056>
7. Kemper S., Lang T., Frerichs L. The overlaid cut in a disc mower – results from field tests and simulation. *Landtechnik*. 2014;69(4):171-175.
8. Pirchio M. et al. Autonomous mower vs. rotary mower: effects on turf quality and weed control in tall fescue lawn. *Agronomy*. 2018;8(2):15. <https://doi.org/10.3390/agronomy8020015>

Author Information

Vladimir F. Pervushin^{1✉}, DSc (Eng), Professor; pervushin54@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-0572-2080>

Fanil M. Abdullin², co-researcher, Ph. Sci.

Marat Z. Salimzyanov³, CSc (Eng), Associate Professor; salimmar@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0877-4372>

Aleksey G. Ipatov⁴, CSc (Eng), Associate Professor; Ipatow.al@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2637-4214>

Aleksey G. Ivanov⁵, CSc (Eng), Associate Professor; ivalgen@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7111-7642>

^{1,2,3,4,5} Udmurt State Agrarian University; Russia, Udmurt Republic, 426059, Izhevsk, 11, Studencheskaya Str.

Author Contribution

V.F. Pervushin – research supervision, finalizing (revising and editing) of the manuscript; F.M. Abdullin – investigation; M.Z. Salimzyanov – writing – original draft preparation; A.G. Ipatov – conceptualization and formal analysis; A.G. Ivanov – software and data verification.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests and are responsible for plagiarism

Received 12.03.2024; Revised 01.04.2024; Accepted 05.04.2024.

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 632.08

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-22-30>

Полимерный композит для распылителей сельскохозяйственных опрыскивателей: испытания

В.Э. Славкина¹, Ю.В. Катаев², А.С. Свиридов³, Е.Ф. Малыха⁴, Н.В. Сергеева⁵^{1,2,3} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия^{4,5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ slavkina@vimlab.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2906-8917>² ykataev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0832-3608>³ sviridov.vim@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9396-2281>⁴ efmalykha@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7143-7574>⁵ nvsergeeva@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6757-1666>

Аннотация. Долговечность сельскохозяйственного опрыскивателя зависит от материала, из которого изготовлены распылители. Для повышения износостойкости полимерных форсунок в композит внедряют дисперсные наполнители. Композит для распылителей сельскохозяйственных опрыскивателей должен отличаться высокой химической стойкостью к агрохимикатам и механической прочностью, а также низким гидроабразивным износом. С целью выбора оптимального полимерного композита для распылителей сельскохозяйственных опрыскивателей изготовлены три композита на основе полиоксиметилена марки MASCON POM 27, в которых в качестве дисперсных наполнителей использовались стекловолокно, графит и карбид кремния со степенью объемного наполнения 10, 15 и 20%. Полимерные композиты исследовались в течение 14 недель на химическую стойкость к агрохимикатам (гербицид «Лазурит», фунгицид «Ракурс», инсектицид «Борей-Нео»), механическую прочность и гидроабразивный износ. В качестве эталона выступали образцы из полиоксиметилена марки MASCON POM 27. Результаты испытаний на механическую прочность при растяжении показали наибольшее увеличение показателя прочности при 15%-ном содержании наполнителя независимо от его типа. Прочность композита с карбидом кремния увеличилась на 30,2%, со стекловолокном – на 26,8%, с графитом – на 27,4%. Установлено, что химическая стойкость композитов не зависит от концентрации раствора агрохимикатов. Экспериментами по гидроабразивному износу выявлено, что графит и карбид кремния эффективны как наполнители и способны снизить износ до 7,5 раза. Для изготовления распылителей сельскохозяйственных опрыскивателей рекомендуется применять полиоксиметилен с 15%-ным содержанием карбида кремния.

Ключевые слова: композит для распылителей сельскохозяйственных опрыскивателей, полиоксиметилен, композит, дисперсный наполнитель, испытания, распылитель, химическая стойкость композитов, износостойкость

Для цитирования: Славкина В.Э., Катаев Ю.В., Свиридов А.С., Малыха Е.Ф., Сергеева Н.В. Полимерный композит для распылителей сельскохозяйственных опрыскивателей: испытания // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 5. С. 22-30. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-22-30>

ORIGINAL ARTICLE

Polymer composite for farm sprayer atomizers: test results

V.E. Slavkina¹, Yu.V. Kataev², A.S. Sviridov³, E.F. Malykha⁴, N.V. Sergeeva⁵^{1,2,3} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia^{4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ slavkina@vimlab.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2906-8917>² ykataev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0832-3608>³ sviridov.vim@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9396-2281>⁴ efmalykha@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7143-7574>⁵ nvsergeeva@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6757-1666>

Abstract. The long service life of a farm sprayer depends on the material, the nozzles are made of. To increase the wear resistance of polymer nozzles, dispersed fillers are incorporated into the composite. Composites for agricultural sprayer atomizers should have high chemical resistance to agrochemicals and mechanical strength, as well as low

hydro-abrasive wear. In order to select the optimal polymer composite for farm sprayer atomizers, three composites based on polyoxymethylene of MASCON POM 27 brand were produced, in which glass fiber, graphite and silicon carbide with the degree of volume filling 10, 15 and 20% were used as disperse fillers. The polymer composites were tested for 14 weeks for chemical resistance to agrochemicals (herbicide “Lazurit”, fungicide “Rakurs”, insecticide “Borei-Neo”), mechanical strength and hydro-abrasive wear. MASCON POM 27 polyoxymethylene samples served as a reference. The results of mechanical tensile strength tests showed the greatest increase in the strength index at 15% filler content regardless of its type. The strength of the composite with silicon carbide increased by 30.2%, with glass fiber – by 26.8%, with graphite – by 27.4%. It was found that the chemical resistance of composites does not depend on the concentration of agrochemical solution. The experiments on hydro-abrasive wear revealed that graphite and silicon carbide are effective as fillers and can reduce wear up to 7.5 times. It is recommended to use polyoxymethylene with 15% content of silicon carbide for manufacturing farm sprayer atomizers.

Keywords: composite product for farm sprayer atomizers, polyoxymethylene, composite, dispersed filler, tests, atomizer, chemical resistance of composites, wear resistance

For citation: Slavkina V.E., Kataev Yu.V., Sviridov A.S., Malykha E.F., Sergeeva N.V. Polymer composite for farm sprayer atomizers: test results. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(5):22-30. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-22-30>

Введение

По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО), глобальные потери от вредителей и болезней растений ежегодно составляют около 20...25% потенциального урожая продовольственных культур в мире. В России потери достигают 20...25% от фактического производства сельскохозяйственной продукции, то есть каждый пятый гектар не приносит ожидаемого урожая [1, 2]. Решить данную проблему может химический способ защиты растений. Без применения пестицидов потери урожая для плодовых культур составили бы 78%, для овощных – 54%, для зерновых – 32% [3, 4].

Наиболее распространенным методом химической обработки сельскохозяйственных культур является опрыскивание рабочим раствором пестицидов. Одним из основных рабочих органов, влияющих на качество опрыскивания, является распылитель, обеспечивающий формирование симметричных распыляющих шлейфов путем дозирования и разделения рабочей жидкости на капли определенного размера [5, 6].

На российском рынке в настоящее время представлены опрыскиватели фирм Lechler, Lurmark (Германия), Teejet, Нурро, Combo-Jet (США),

AgroPlast (Польша), Albus, Nozal (Франция), Har-di (Дания), ARAG (Италия) и др.

Замена и выход из строя опрыскивателя случаются по причине износа сопла распылителя (рис. 1, 2), в результате которого происходит изменение формы факела распыла (рис. 3). Причиной износа является абразивность рабочего раствора [7-9].

При выборе распылителя одним из важнейших факторов является износостойкость, характеризующаяся временем работы распылителя без изменения производительности. Износостойкость зависит от материала. В основном распылители опрыскивателя изготавливают из керамики, нержавеющей стали, латуни и полимеров (рис. 4) [10-12].

Срок службы полимерных распылителей не уступает распылителям из нержавеющей стали, но износостойкость их ниже керамических [13]. Основной причиной отказа от керамических распылителей в пользу полимерных является их высокая стоимость, а также специфические требования к обслуживанию. Например, после окончания сезона полевых работ и при хранении опрыскивателя в неотопляемых помещениях керамические распылители необходимо снимать.

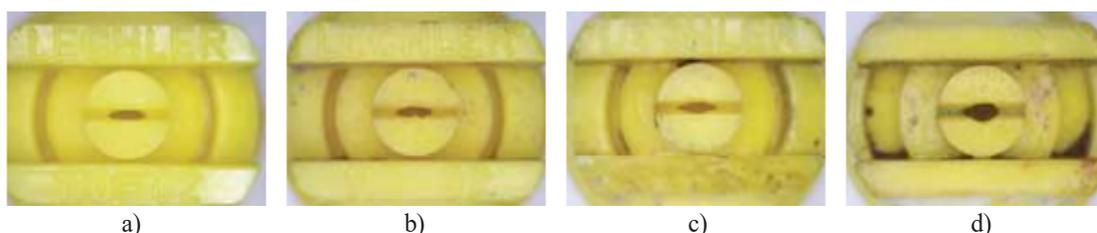


Рис. 1. Сопло форсунки сельскохозяйственного опрыскивателя: новое (а) и после использования в течение 40 ч (б), 70 ч (с) и 180 ч (д)

Fig.1. Nozzle of the farm sprayer injector: new (a) and after use in temperatures for 40 h (b), 70 h (c) and 180 h (d)

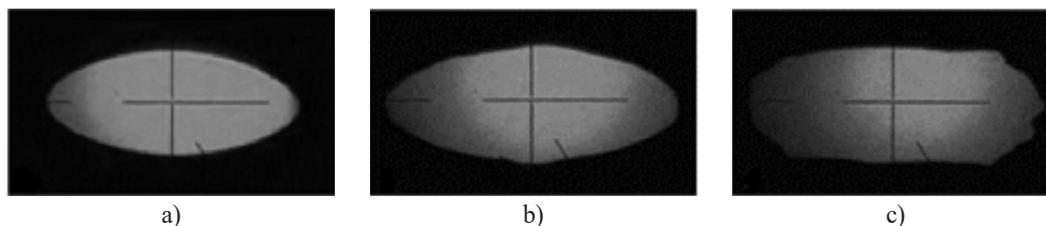


Рис. 2. Форма сопла форсунки сельскохозяйственного опрыскивателя при 20-кратном увеличении:
 а) оригинальная форма; б) частично изношенная форсунка; в) катастрофический износ

Fig. 2. Shape of an farm sprayer injector nozzle (20-fold magnification):
 a) original form; b) partially worn-out nozzle; c) extremely gross wear



Рис. 3. Изменение формы распыла в результате износа сопла

Fig. 3. Change in the spray pattern due to the nozzle wear

Полимер для изготовления распылителей должен обладать химической стойкостью, высокой износостойкостью и способностью к переработке литьем под давлением. Наиболее распространенным полимером, используемым в производстве распылителей, является полиоксиметилен с дисперсными наполнителями, которые способствуют изменению физико-механических свойств и химической стойкости композитов, позволяя получать новый полимерный материал с заданными свойствами [14, 15].

Повысить износостойкость распылителей можно за счет введения в полимер наполнителей, твердость которых выше твердости данного полимера. Такими наполнителями могут быть стеклянные микросферы, керамические частицы, твердые волокна.

Цель исследований: изготовить три композиционных материала на основе термопластичного полимера, провести испытания и на их основе рекомендовать лучший композит для распылителей сельскохозяйственных опрыскивателей.

Материалы и методы

В качестве полимерной матрицы был выбран полиоксиметилен марки MASCON POM 27 (POM). На основании проведенного ранее аналитического обзора в качестве дисперсных наполнителей выбраны стекловолокно, графит и карбид кремния (табл. 1). Степень объемного наполнения

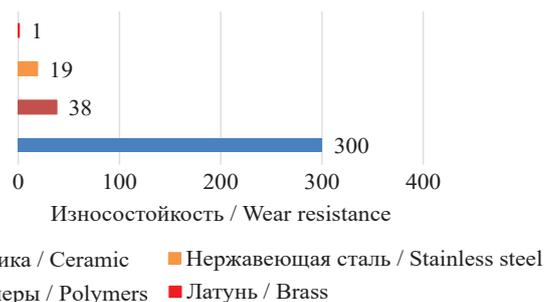


Рис. 4. Относительная износостойкость материалов распылителей

Fig. 4. Relative wear resistance of sprayer materials

принималась как среднее между рекомендуемыми значениями наполнения всех используемых типов наполнителей.

Изготовление образцов осуществлялось путем замешивания в роторном смесителе периодического действия. Перед замешиванием гранулы полиацетата высушивали в термощкафу в течение 6 ч при температуре 100°C. Смешивание полиацетата и наполнителя происходило при температуре 170°C и скорости вращения ротора 50 мин⁻¹, время смешения составляло 40 мин. Полученную смесь измельчали до получения гранул (рис. 5).

Полученный гранулят прессовали в плиты толщиной 2 мм с помощью гидравлического пресса при температуре 180°C в течение 30 мин, после чего плиты охлаждали под прессом в течение 1 ч для обеспечения равномерного охлаждения по всему образцу. С помощью лазерного станка вырезали образцы нужной геометрии (табл. 2).

Изготовленный композит для распылителей сельскохозяйственных опрыскивателей исследовался на химическую стойкость к агрохимикатам, гидроабразивному износу и механическую прочность.

Прочность композитных образцов исследовали на разрывной машине И1147М-50-01-1. Образец растягивали вдоль его главной продольной оси с постоянной скоростью 5 мм/мин. В процессе растяжения измеряли нагрузку, выдерживаемую образцом, и его удлинение.

Таблица 1

Составы исследуемых смесей
Compositions of the mixtures tested

Table 1

| Показатель Indicators | Тип наполнителя / Filler type | | | | | | | | |
|---|-------------------------------|----|----|----------------------------------|----|----|-------------------|----|----|
| | Стекловолокно / Fiberglass | | | Карбид кремния / Silicon carbide | | | Графит / Graphite | | |
| Объемное содержание наполнителя, % Volume content of the filler, % | 10 | 15 | 20 | 10 | 15 | 20 | 10 | 15 | 20 |
| Размер частиц / Particle size | l = 0,2 мм (mm) | | | d = 5...10 нм (µm) | | | d = 1,5 мм (mm) | | |

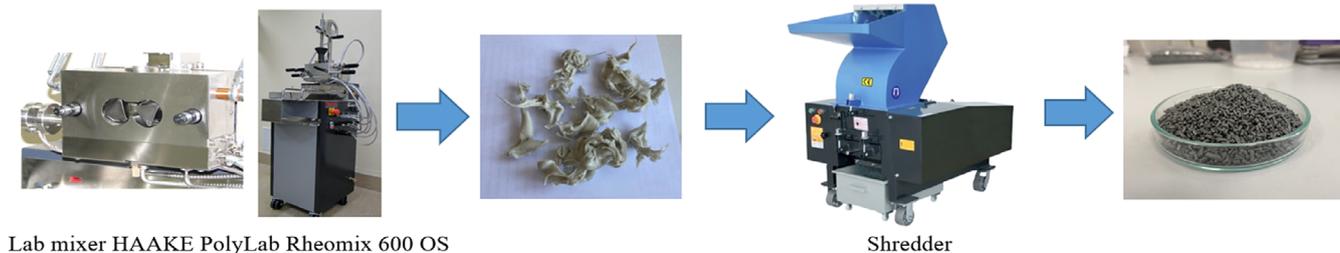


Рис. 5. Изготовление композитных гранул
Fig. 5. Manufacturing of composite granules

Размеры образцов для испытаний

Таблица 2

Table 2

Dimensions of test samples

| Размеры / Size | Значение / Value, mm |
|--|----------------------|
| Общая длина / Total length | 73 |
| Толщина рабочей части Thickness of the operating part | 2 |
| Длина рабочей части Length of the operating part | 35 ± 1 |
| Большой радиус кривизны Large radius of curvature | 25 ± 1 |
| Малый радиус кривизны Small radius of curvature | 14,0 ± 0,5 |
| Ширина головки / Head width | 12 ± 1 |
| Ширина рабочей (узкой) части Width of the narrow (operating) part | 4,0 ± 0,4 |

Исследование химической стойкости композитов проводили в соответствии с рекомендациями стандартов по определению стойкости к воздействию химических средств (ГОСТ Р 56818-2015). Для эксперимента подготовили 60 квадратных образцов со стороной 60,0 мм и толщиной 1,0 мм (рис. 6). В качестве эталона выступали образцы, состоящие из полиоксиметилена марки MASCON POM 27 (POM) (рис. 6а).

В качестве химических средств использовались растворы гербицида «Лазурит», фунгицида «Ракурс» и инсектицида «Борей-Нео». Испытания проводились как в растворах стандартной концентрации, рекомендованной для обработки сои, так и в растворах с 5-кратным

превышением концентрации химических веществ для интенсификации процесса испытаний (табл. 3).

Химическую стойкость образцов оценивали по изменению их массы и твердости при вымачивании в исследуемых растворах. Измерение массы проводили на аналитических весах AND GR-200 (дискретность 0,1 мг). Твердость определялась под нагрузкой 5 кг в течение 10 с при помощи твердомера Шора D (погрешность составляет ±2). Измерения проводились в трех точках образца, затем определялось среднее арифметическое полученных значений.

В течение первой недели измерение массы и твердости производилось ежедневно, затем – единожды в неделю, и каждый раз готовился новый раствор. Продолжительность испытания составила 14 недель.

Обзор способов проведения испытаний на истирание в воде показал возможность использования схемы, когда стакан заполняется абразивной жидкостью, а испытуемые образцы размером 1 × 1 см крепятся на ротор, полностью погруженный в стакан с жидкостью. Абразивные частицы приводятся в движение и истирают испытуемый образец (рис. 7) [16]. Скорость вращения ротора составляла 100 об/мин.

Для интенсификации процесса изнашивания в воду добавляли 30% песка. Испытывали эталонные образцы (100% POM) и образцы, содержащие 15% каждого вида наполнителя. Гидроабразивный износ определялся разностью массы образцов с помощью весов AND GR-200 до испытания и после него. Поскольку полимеры гигроскопичны, то для удаления воды из образцов после испытания их помещали в печь на 2 ч при 100°C.

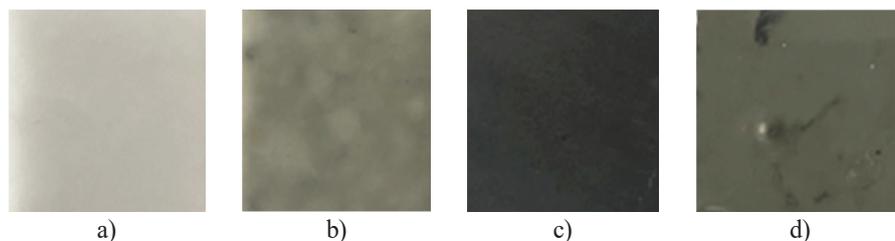


Рис. 6. Образцы композитов для исследования химической стойкости к коррозионным средам: а) 100% POM (эталон); б) POM + стекловолокну; в) POM + графит; д) POM + карбид кремния

Fig. 6. Samples of composites for studying chemical resistance to corrosive environments: а) 100% POM (reference); б) POM + fiberglass; в) POM + graphite; д) POM + silicon carbide

Таблица 3

Концентрация действующих препаратов

Table 3

Chemical product concentrations

| Препарат <i>Chemical product</i> | Норма расхода <i>Consumption rate</i> | Объем расходуемой воды, мл <i>Volume of water used, ml</i> | Количество препарата <i>Amount of chemical products needed</i> | |
|---|--|---|---|--|
| | | | Стандартная концентрация <i>Standard concentration</i> | Увеличенная концентрация <i>Increased concentration</i> |
| Гербицид «Лазурит» / <i>Herbicide "Lazurit"</i> | 0,5...1,0 кг/га (kg/ha) | 400 | 1 г (g) | 5 г (g) |
| Фунгицид «Ракурс» / <i>Fungicide "Rakurs"</i> | 0,2 л/га (l/ha) | 500 | 0,5 мл (ml) | 2,5 мл (ml) |
| Инсектицид «БорейНео» <i>Insecticide "Borei Neo"</i> | 0,1...0,2 л/га (l/ha) | 500 | 0,5 мл (ml) | 2,5 мл (ml) |

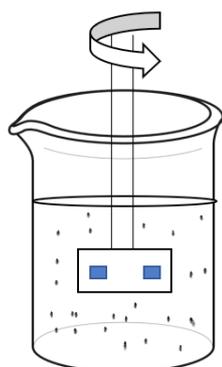


Рис. 7. Испытание на гидроабразивный износ

Fig. 7. Hydro-abrasive wear testing scheme

Характер взаимодействия полимерной матрицы с наполнителями изучался с помощью оптического микроскопа OLYMPUS BX53M. Исследовалась поверхность образцов после гидроабразивного износа. Исследования проводились при 4- и 20-кратном увеличении.

Оценка погрешности результатов испытаний осуществлялась путем использования доверительного интервала с уровнем доверия 95%:

$$\bar{X} - t_{\alpha, n-1} \cdot \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{X} + t_{\alpha, n-1} \cdot \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}},$$

где \bar{X} – среднее значение; $t_{\alpha, n-1}$ – коэффициент Стьюдента α ; $\hat{\sigma}$ – стандартное отклонение.

В соответствии с поставленными задачами использовались графический метод исследований, методы математического анализа с применением программного обеспечения, методы системного и статистического анализа с использованием пакетов Microsoft Office Excel 2020 и др. Результаты испытаний на химическую стойкость были обработаны с помощью программы Google Colaboratory.

Результаты и их обсуждение

Результаты испытаний на механическую прочность при растяжении изготовленных образцов представлены на рисунке 8.

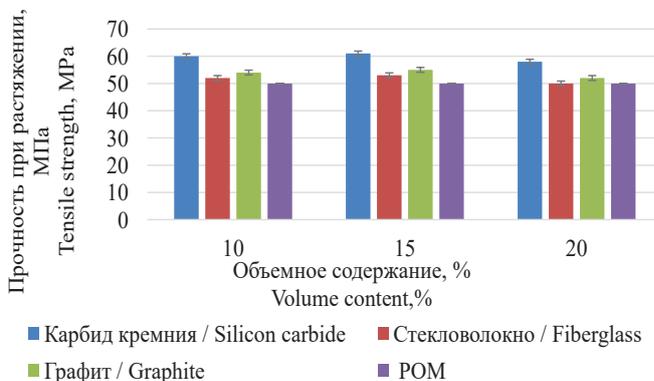


Рис. 8. Прочность при растяжении в зависимости от вида и количества наполнителя

Fig. 8. Value of mechanical strength

Согласно результатам исследований добавление дисперсных наполнителей приводит к увеличению прочности при растяжении, причем наибольшее увеличение показателя прочности достигается при 15%-ном содержании наполнителя независимо от его типа. Дисперсные наполнители обладают высокой прочностью и жесткостью по сравнению с полимерами и способствуют равномерному распределению механической нагрузки в материале. Их использование предотвращает возникновение напряжений в отдельных областях и повышает общую прочность композитного материала. Наиболее ярко это проявляется в композитных смесях с карбидом кремния. При использовании карбида кремния в качестве наполнителя прочность увеличивается на 30,2%. При добавлении стекловолокна прочность на разрыв увеличивается на 26,8%, при добавлении графита – на 27,4%.

Твердость образцов из POM, выдержанных в течение 14 недель в 1%-ном и 5%-ном растворах гербицида «Лазурит», фунгицида «Ракурс» и инсектицида «Борей-Нео», представлена на рисунке 9.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что увеличение концентрации раствора в 5 раз относительно эталона не оказывает существенного влияния на скорость изменения твердости исследуемых материалов. Аналогичная картина наблюдается и относительно изменения массы.

Высокая механическая прочность и химическая стойкость композитов наблюдались у образцов с 15%-ным содержанием наполнителя, поэтому данные составы в дальнейшем испытывали на гидроабразивный износ. Результаты замеров массы образцов, подвергшихся абразивному воздействию в течение 1 и 5 ч, представлены на рисунке 10.

Максимальный износ показали образцы композита со стекловолокном. Через 1 ч испытаний скорость износа композитов с графитом и карбидом кремния была в 3 раза ниже, чем у эталона (100% POM). Через 5 ч испытаний результаты изменились: у эталонных образцов износ увеличился почти в 5 раз, у графитовых образцов – всего в 2 раза, а у композитов с карбидом кремния – в 13 раз.

Согласно результатам испытаний гидроабразивного износа графит и карбид кремния являются эффективными наполнителями, способными снизить износ до 7,5 раза. Однако данные, полученные ранее по абразивному износу композиционных смесей [17], показали наибольшую износостойкостью смеси на основе POM с 15%-ным наполнением карбида кремния.

Фотографии, полученные с помощью оптической микроскопии, представлены на рисунке 11.

По результатам оптической микроскопии, наблюдается ориентационное растяжение частиц наполнителя преимущественно по углам образцов. В образцах с графитовым наполнителем он распределен

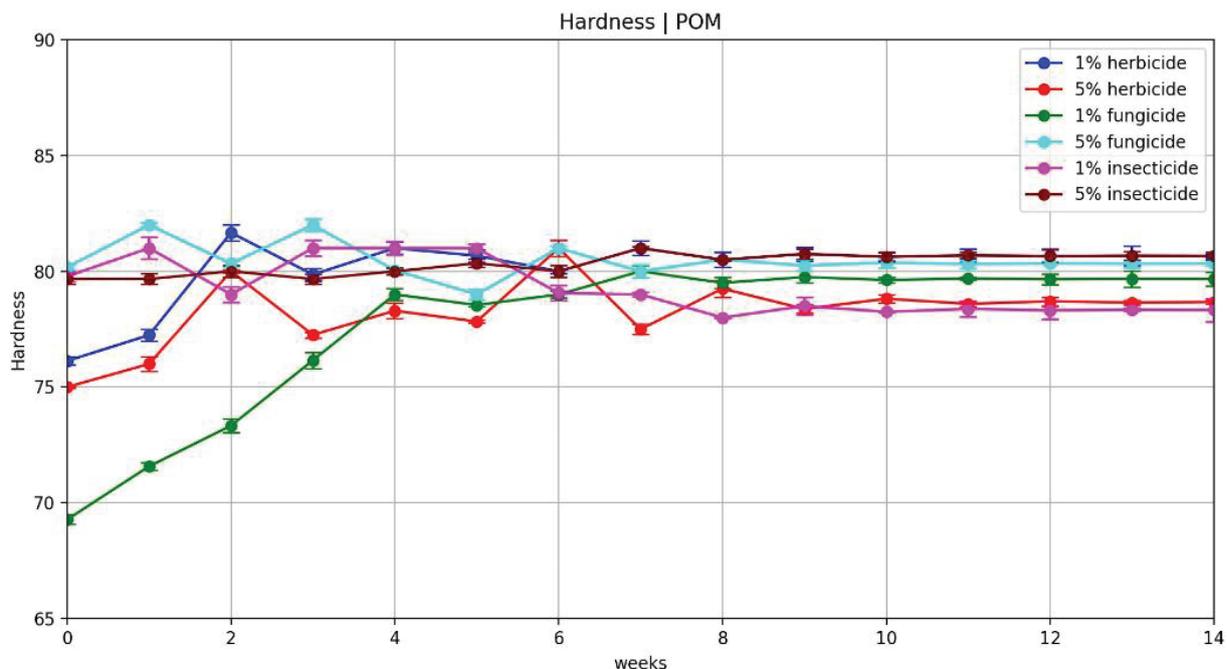


Рис. 9. Химическая стойкость композитов: изменение твердости образцов из POM в зависимости от типа, концентрации препарата и времени выдержки

Fig. 9. Chemical resistance of composites: change in the hardness of samples from POM depending on the type and concentration of the product and exposure time

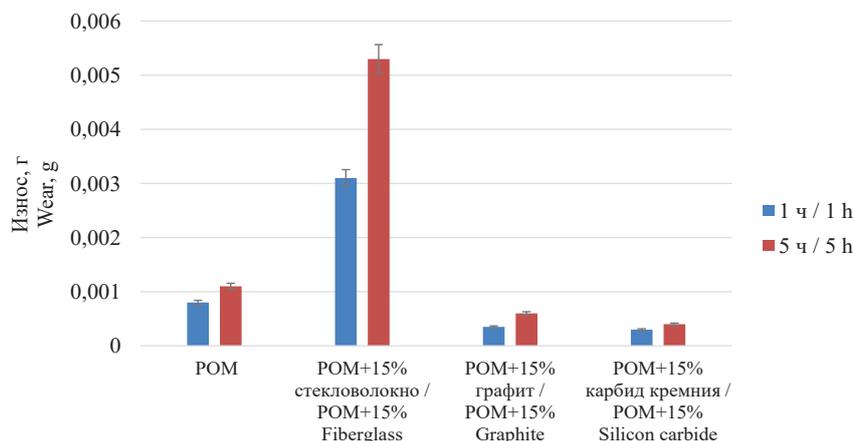


Рис. 10. Объемный износ образцов после гидроабразивных испытаний

Fig. 10. Volumetric wear of specimens after hydro-abrasive testing

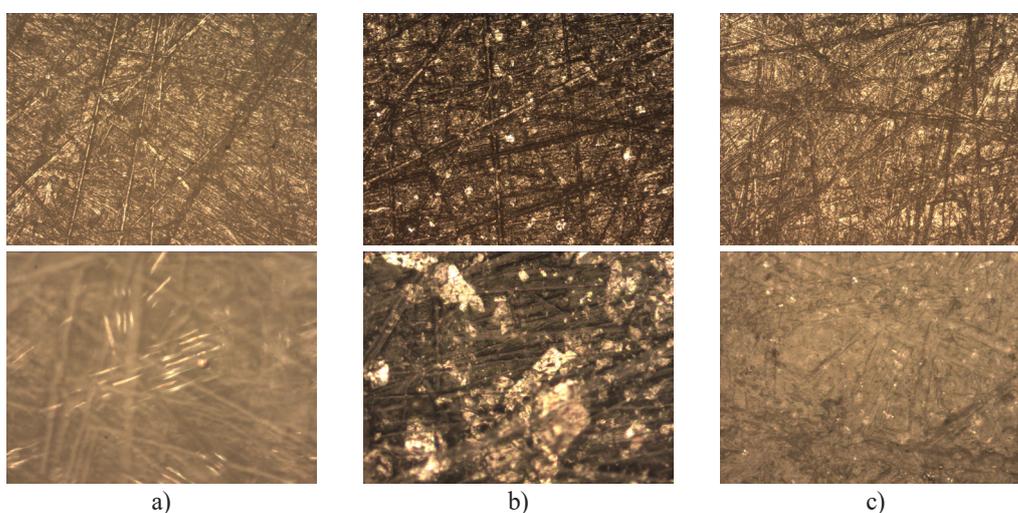


Рис. 11. Результаты микроскопических исследований при 4-кратном (фото слева) и 20-кратном (фото справа) увеличении:

a) POM + стекловолокно; b) POM + графит; c) POM + карбид кремния

Fig. 11. Results of microscopic examinations at 4-fold (photo on the left) and 20-fold magnification (photo on the right):

a) POM + fiberglass; b) POM + graphite; c) POM + silicon carbide

между макромолекулами матрицы, и частицы наполнителя способны к агрегации, по-видимому, за счет электростатических сил. Предположительно образуется «сетка в сетке», способствующая улучшению прочностных свойств за счет дополнительных связей и образования дополнительного «каркасного» элемента. В образцах с наполнителем из карбида кремния наблюдается хаотичное распределение частиц наполнителя между макромолекулами матрицы с выходом частиц на поверхность материала, что объясняет наибольшую стойкость этих образцов к гидроабразивному износу.

Выводы

1. Композит для распылителей сельскохозяйственных опрыскивателей должен отличаться высокой

химической стойкостью к агрохимикатам и механической прочностью, а также низким гидроабразивным износом.

2. Добавление в полиоксиметилен (POM) дисперсных наполнителей в количестве 15% приводит к увеличению механической прочности композита с карбидом кремния на 30,2%, со стекловолокном – на 26,8%, с графитом – на 27,4%.

3. Концентрация растворов агрохимикатов не оказывает значительного влияния на химическую стойкость композита.

4. Графит и карбид кремния эффективны как наполнители и способны снизить износ в 7,5 раза.

5. Рекомендуется композит для распылителей сельскохозяйственных опрыскивателей, включающий в себя POM и 15% карбида кремния.

Список источников

1. Колесников А.В., Харина М.В. Оценка объемов производства основных видов сельскохозяйственной продукции в России в 2024 году // АПК: экономика, управление. 2024. № 4. С. 13-23. <https://doi.org/10.33305/244-13>
2. Petukhova M.S. Innovative development of the Russian grain sector. *Russian Journal of Economics*. 2022;8(1):49-59. <https://doi.org/10.32609/j.ruje.8.78314>
3. Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В. Перспективы развития методов и технических средств защиты сельскохозяйственных растений // Агроинженерия. 2021. № 1. С. 26-35. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-1-26-35>
4. Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В., Курбанов Р.К. Технические средства для химической защиты растений: состояние и перспективы развития // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 3. С. 12-18. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-12-18>
5. Chen S., Lan Y., Zhou Z., Deng X., Wang J. Research advances of the drift reducing technologies in application of agricultural aviation spraying. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021;14(5):1-10.
6. Liliane T.N., Charles M.S. Factors affecting yield of crops. *Agronomy-Climate Change and Food Security*. 2020:9. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90672>
7. Vulshinskaya I., Glytvan K., Stepanchenko V., Ugryumov E. Methods for improving the wear resistance of machine parts operating under conditions of abrasive wear. *The Scientific Heritage*. 2021;66-1:39-41. <https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-66-1-39-41>
8. Гончарова Ю.А., Денисов В.А. Анализ отказов полимерных деталей сельскохозяйственной техники // Технический сервис машин. 2021. № 3 (144). С. 146-154. <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2021-59-3-146-154>
9. Славкина В.Э., Свиридов А.С., Арумугам Г., Гончарова Ю.А., Касимов Р.М. Разработка конструкции щелевого сельскохозяйственного распылителя и исследование его выходных параметров // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. Т. 16, № 4. С. 34-37. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-34-37>
10. Slavkina V.E., Mirzaev M.A., Kuzmin A.M., Kutyrév A.I., Tuzhilin S.P., Denisov V.A., Kataev Y.V. Testing of polymer composites for manufacturing of sprayer nozzles. *Polymers*. 2024;16(4):496. <https://doi.org/10.3390/polym16040496>
11. Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Миронова А.В. Основные направления повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2023. Т. 17, № 1. С. 41-50. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50>
12. Смирнов И.Г., Личман Г.И., Марченко Л.А. Алгоритм расчета параметров штангового садового опрыскивателя для внесения пестицидов // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. Т. 16, № 4. С. 26-33. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-26-33>
13. Свиридов А.С., Катаев Ю.В., Загоруйко М.Г. Анализ типов распылителей сельскохозяйственных опрыскивателей // Аграрный научный журнал. 2021. № 6. С. 96-100. <https://doi.org/10.28983/asj.y2021i6pp96-100>
14. Rueda M.M., Auscher M-C., Fulchiron R., Périé T., Martin G., Sonntag P., Cassagnau P. Rheology and applications of highly filled polymers: A review of current understanding. *Progress in Polymer Science*. 2017;66:22-53. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2016.12.007>
15. Денисов В.А., Катаев Ю.В., Гончарова Ю.А., Славкина В.Э., Шитов А.О. Оценка триботехнических свойств и возможности применения композита ULTRAN630CF для узлов трения сельскохозяйственной техники

References

1. Kolesnikov A.V., Kharina M.V. The main agricultural products production assessment in Russia in 2024. *AIC: Economics, Management*. 2024;4:13-23. (In Russ.) <https://doi.org/10.33305/244-13>
2. Petukhova M.S. Innovative development of the Russian grain sector. *Russian Journal of Economics*. 2022;8(1):49-59. <https://doi.org/10.32609/j.ruje.8.78314>
3. Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eschin A.V. Prospects for the development of methods and technical means of protecting agricultural plants. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2021;1:26-35. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-1-26-35>
4. Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eschin A.V., Kurbanov R.K. Technical means for chemical plant protection: status and development prospects. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(3):12-18. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-12-18>
5. Chen S., Lan Y., Zhou Z., Deng X., Wang J. Research advances of the drift reducing technologies in application of agricultural aviation spraying. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021;14(5):1-10.
6. Liliane T.N., Charles M.S. Factors affecting yield of crops. *Agronomy-Climate Change and Food Security*. 2020:9. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90672>
7. Vulshinskaya I., Glytvan K., Stepanchenko V., Ugryumov E. Methods for improving the wear resistance of machine parts operating under conditions of abrasive wear. *The Scientific Heritage*. 2021;66-1:39-41. <https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-66-1-39-41>
8. Goncharova Yu.A., Denisov V.A. Failures of polymer parts of agricultural machinery. *Machinery Technical Service*. 2021;3(144):146-154. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2021-59-3-146-154>
9. Slavkina V.E., Sviridov A.S., Arumugam G., Goncharova Yu.A., Kasimov R.M. Developing the design for a slotted agricultural sprayer and studying its output parameters. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022;16(4):34-37. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-34-37>
10. Slavkina V.E., Mirzaev M.A., Kuzmin A.M., Kutyrév A.I., Tuzhilin S.P., Denisov V.A., Kataev Y.V. Testing of polymer composites for manufacturing of sprayer nozzles. *Polymers*. 2024;16(4):496. <https://doi.org/10.3390/polym16040496>
11. Lobachevsky Ya.P., Mironov D.A., Mironova A.V. Increasing the operating lifetime of wearable working bodies of agricultural machines. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(1):41-50. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50>
12. Smirnov I.G., Lichman G.I., Marchenko L.A. Algorithm for calculating the parameters of a garden boom sprayer for pesticide application. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022;16(4):26-33. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-26-33>
13. Sviridov A.S., Kataev Yu.V., Zagoruiko M.G. Analysis of the types of agricultural sprayers' nozzles. *The Agrarian Scientific Journal*. 2021;6:96-100. (In Russ.) <https://doi.org/10.28983/asj.y2021i6pp96-100>
14. Rueda M.M., Auscher M-C., Fulchiron R., Périé T., Martin G., Sonntag P., Cassagnau P. Rheology and applications of highly filled polymers: A review of current understanding. *Progress in Polymer Science*. 2017;66:22-53. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2016.12.007>
15. Denisov V.A., Kataev Yu.V., Goncharova Yu.A., Slavkina V.E., Shitov A.O. Evaluation of tribological properties and the possibility of using the ULTRAN630CF composite for friction units of agricultural machinery. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;6(312):31-34. (In Russ.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-6-31-34>

// Техника и оборудование для села. 2023. № 6 (312). С. 31-34.
<https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-6-31-34>

16. Борисевич В.Д., Шемякинский Б.А. Гидроабразивный износ различных покрытий // Неделя науки СПбПУ: Материалы научной конференции с международным участием: В 2 ч. Ч. 2. СПб.: Политех-Пресс, 2020. С. 206-208. EDN: VCBSIM

17. Slavkina V., Goncharova Y., Sviridov A. Influence of the type quantity of fillers on the abrasive wear of composite materials. *AIP Conference Proceedings*. 2023;2697(1):040006. <https://doi.org/10.1063/5.0112492>

Информация об авторах

Виктория Эдуардовна Славкина¹,

младший научный сотрудник; slavkina@vimlab.ru;
<https://orcid.org/0000-0003-2906-8917>

Юрий Владимирович Катаев^{2,3}, канд. техн. наук, доцент,
 ведущий научный сотрудник; ykataev@mail.ru^{2,3};
<https://orcid.org/0000-0003-0832-3608>

Алексей Сергеевич Свиридов³, младший научный сотрудник;
sviridov.vim@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9396-2281>

Екатерина Федоровна Малыха⁴, канд. экон. наук, доцент;
efmalykha@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7143-7574>

Наталья Викторовна Сергеева⁵, канд. экон. наук, доцент;
nvsergeeva@rgau-msha.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-6757-1666>

^{1,2,3} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ;
 109428, Российская Федерация, г. Москва,
 1-й Институтский проезд, 5

^{4,5} Российский государственный аграрный университет –
 МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434,
 Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

В.Э. Славкина – методология проекта, проведение исследований, формальный анализ, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

Ю.В. Катаев – научное руководство исследованием, формулирование основных направлений исследования, цели и задачи, формулирование общих выводов;

А.С. Свиридов – анализ литературных источников для постановки цели, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

Е.Ф. Малыха – проведение исследований, формальный анализ, создание черновика рукописи, визуализация;

Н.В. Сергеева – проведение исследований, визуализация

Конфликт интересов

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

Статья поступила 08.03.2024, после рецензирования и доработки 03.07.2024; принята к публикации 04.07.2024

16. Borisevich V.D., Shemyakinskiy B.A. Water abrasive wear of various coatings. *SPbPU Science Week: Proceedings of a scientific conference with international participation*. Part 2. St. Petersburg: Politekh-Press, 2020. Pp. 206-208. (In Russ.)

17. Slavkina V., Goncharova Y., Sviridov A. Influence of the type quantity of fillers on the abrasive wear of composite materials. *AIP Conference Proceedings*. 2023;2697(1):040006. <https://doi.org/10.1063/5.0112492>

Author Information

Viktoriya E. Slavkina¹, Junior Research Engineer;
slavkina@vimlab.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2906-8917>

Yuriy V. Kataev², CSc (Eng), Associate Professor,
 Lead Research Engineer; ykataev@mail.ru;
<https://orcid.org/0000-0003-0832-3608>

Aleksey S. Sviridov³, Junior Research Engineer;
sviridov.vim@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9396-2281>

Ekaterina F. Malykha⁴, CSc (Econ), Associate Professor;
efmalykha@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0001-7143-7574>

Natalya V. Sergeeva⁵, CSc (Econ), Associate Professor;
nvsergeeva@rgau-msha.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-6757-1666>

^{1,2,3} Federal Scientific Agricultural Engineering Center VIM;
 1st Institutsky Proezd Str., Moscow, 5109428,
 Russian Federation

^{4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural
 Academy named after K.A. Timiryazev;
 Timiryazevskaya Str., 49, Moscow, 127434, Russian Federation

Author Contribution

V.E. Slavkina – project methodology, research, formal analysis, finalizing (revising and editing) of the manuscript

Yu.V. Kataev – research supervision; formulation of the main steps, goals and objectives of the research; general conclusions;

A.S. Sviridov – literature review, goal setting, writing – original draft preparation, finalizing (revising and editing) of the manuscript;

E.F. Malykha – investigation, formal analysis, writing – original draft preparation, visualization

N.V. Sergeeva – investigation, visualization

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interest and are responsible for plagiarism

Received 08.03.2024, Revised 03.07.2024, Accepted 04.07.2024

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.9

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-31-38>

Анализ технологий восстановления коленчатых валов автотракторной техники

*В.И. Балабанов¹, Д.В. Добряков²*¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Москва, Россия² Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований

по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса; р.п. Правдинский, Московская обл., Россия

¹ vbalabanov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>² dimasdobr@rambler.ru

Аннотация. Характерными дефектами коленчатых валов ДВС автотракторной техники являются износы поверхностей трения: шеек, торцов, пазов и резьбы, а также остаточные деформации и усталостные трещины. Для устранения дефектов проводится восстановление коленчатых валов с использованием технологических операций по восстановлению формы и расположения, линейных и угловых размеров, а также шероховатости, износостойкости и усталостной прочности элементов и поверхностей коленчатого вала. С целью анализа технологий восстановления коленчатых валов автотракторной техники рассмотрены условия эксплуатации, основные дефекты и виды наплавки и напыления, наносимые с помощью электродугового, газопламенного, детонационного и плазменного (индукционного и плазменно-дугового) методов. Отмечается, что у восстановленных деталей в сравнении с новыми для соответствия показателям надежности соотношение твердости (HRC_B/HRC_H) и предела усталостной прочности (G_{-1B}/G_{-1H}) должно быть больше единицы. Однако ни одна технология восстановления коленчатых валов в полной мере не отвечает этому показателю, поскольку износостойкость новых коленчатых валов в большинстве случаев выше износостойкости восстановленных деталей. В результате анализа технологий восстановления коленчатых валов особо выделена финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) с применением антифрикционных, износостойких и твердосмазочных покрытий, наносимых на детали различными способами, позволяющая повысить износо- и коррозионную стойкость, сопротивление усталостному износу деталей и улучшить приработку трущихся деталей машин.

Ключевые слова: коленчатый вал, изнашивание, восстановление коленчатых валов, ремонт, наплавка, напыление, шлифование, финишная антифрикционная безабразивная обработка

Для цитирования: Балабанов В.И., Добряков Д.Ю. Анализ технологий восстановления коленчатых валов автотракторной техники // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 5. С. 31-38. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-31-38>

ORIGINAL ARTICLE

Analyzing the techniques for restoring crankshafts of automotive vehicles

*V.I. Balabanov¹, D.V. Dobryakov²*¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia² Russian Research Institute of Information and Feasibility Studies for Engineering and Technical Support of the Agribusiness Sector; Pravdinsky, Moscow Region, Russia¹ vbalabanov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>² dimasdobr@rambler.ru

Abstract. Characteristic defects of internal combustion engine crankshafts of automotive vehicles include wear of friction surfaces – journals, faces, grooves and threads, – as well as residual deformations and fatigue cracks. To eliminate defects, crankshafts are repaired using technological operations to restore the shape and location, linear and angular dimensions, as well as roughness, wear resistance and fatigue resistance of elements and surfaces. To analyze the restoration techniques of crankshafts of automotive vehicles the operating conditions, the authors

considered the main defects and types of surfacing and spraying applied by means of electric arc, gas-flame, detonation, and plasma (induction and plasma-arc) methods. The authors note that to meet reliability requirements, the restored parts should have a ratio of hardness (HRC_B/HRC_H) and fatigue strength (G_{IB}/G_{IH}) higher than one as compared to new parts. However, no crankshaft restoration technique fully meets this requirement, because the wear resistance of new crankshafts in most cases is higher than that of restored parts. Based on the analysis of crankshaft restoration techniques, the authors determined the following effective ones: the finishing antifriction non-abrasive treatment (FANT) with the use of antifriction, wear-resistant and solid lubricant coatings applied to the parts using various methods. This technique increases wear and corrosion resistance, resistance to fatigue wear, and improves the running-in of the rubbing machine parts.

Keywords: crankshaft, wear, crankshaft restoration, repair, surfacing, spraying, grinding, finishing antifriction non-abrasive treatment (FANT)

For citation: Balabanov V.I., Dobryakov D.V. Analyzing the techniques for restoring crankshafts of automotive vehicles. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(5):31-38. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-31-38>

Введение

Послеремонтный ресурс отечественных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) автотракторной техники после капитального ремонта составляет 30...80% от ресурса новых. Например, автомобильная техника поступает на первый капитальный ремонт примерно через 5 лет эксплуатации, в то время как их двигатели уже 2-3 раза ремонтировались. Анализ эксплуатации автотракторной техники показал, что 34...45% отказов приходится именно на двигатели¹ [1-3].

Наиболее сложной и дорогостоящей деталью ДВС является коленчатый вал, тяжелые условия работы которого обуславливают его интенсивное изнашивание. При ремонте ДВС большинство коленчатых валов требует замены. Приобретение новых коленчатых валов на импортную автотракторную технику затруднительно, поэтому актуальным становится их восстановительный ремонт.

Установлено, что отказы кривошипно-шатунного механизма ДВС приводят к падению давления масла в главной магистрали вследствие износа и образованию продольных рисок в подшипниках и шейках коленчатого вала, а также течи моторного масла через уплотнительные устройства² [1-3].

Коленчатые валы ДВС автотракторной техники в большей степени подвержены абразивному и усталостному изнашиванию. Изнашивание при «схватывании» проявляется при механическом взаимодействии шероховатостей [4, 5].

Абразивное изнашивание возникает в результате царапающего или режущего воздействия высокотвердых частиц абразива, находящихся в закреплённом виде на сопрягаемых поверхностях вкладышей

и шеек коленчатого вала или в свободном состоянии в составе моторного масла. Абразивные частицы диаметром 1...30 мкм в достаточном количестве присутствуют в окружающей среде, моторном масле или на трущихся поверхностях. Абразивным материалом также могут являться частицы износа поверхностей трущихся деталей, твердых оксидов металлов поверхности, топливного или масляного нагара и др.³ [5, 6].

Коленчатые валы работают в условиях знакопеременных нагрузок, вследствие чего испытывают уменьшение усталостной прочности. Критическим напряжением для усталостной прочности коленчатого вала является предел выносливости. В отличие от других видов механических характеристик, например, пределов прочности, текучести и упругости, этот прочностной показатель в большой степени определяется состоянием поверхностей трения шеек коленчатого вала.

Напряженность работы коленчатого вала в процессе работы растёт, в том числе, вследствие повышения зазоров между шейками валом и коренными вкладышами по причине неравномерного износа, что в свою очередь приводит к появлению несоосности коренных шеек и коренных опор блока, дополнительному изгибу и снижению запаса прочности.

Для коленчатых валов ДВС наиболее характерными дефектами являются износы различных поверхностей трения, прежде всего – шеек, торцов, пазов и резьбы, а также остаточные деформации и усталостные трещины. Для устранения указанных дефектов проводятся технологические операции по восстановлению формы и расположения, линейных и угловых размеров, а также шероховатости, износостойкости и усталостной прочности элементов и поверхностей коленчатого вала (табл. 1).

Цель исследований: анализ технологий восстановления коленчатых валов автотракторной техники.

¹ Черноиванов В.И., Бледных В.В., Северный А.Э., Лялякин В.П., Ольховацкий А.К. Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве: учеб. пособие. Москва-Челябинск: ЧГАУ, 2001. 600 с.

² Там же.

³ Там же

Таблица 1

Основные дефекты и методы ремонта коленчатых валов автотракторной техники⁴

Table 1

Main defects and repair methods of crankshafts of automotive vehicles⁴

| Возможный дефект <i>Possible defect</i> | Способ установления и средства контроля дефекта <i>Method of defect detection and means of defect control</i> | Рекомендации по устранению дефекта <i>Recommendations on defect elimination</i> |
|--|--|---|
| Обломы и трещины <i>Breaks and cracks</i> | Дефектоскоп <i>Fault indicator</i> | Браковать <i>Reject</i> |
| Изгиб вала <i>Shaft bending</i> | Стенд контроля прогиба <i>Bench deflection control</i> | Править при биении более 0,03 мм <i>Restore if runout exceeds 0.03 mm</i> |
| Увеличение длины шатунных шеек <i>Increased length of crank-throws</i> | Калибр <i>Gauge</i> | Браковать при увеличении длины более допустимой <i>Reject if the length is longer than permissible</i> |
| Износ шатунных и коренных шеек. Уменьшение диаметров шеек меньше номинального <i>Wear of crank-throws and main bearing journals. Decreased diameter of the journals (less than the nominal one)</i> | Скоба <i>Clip</i> | Шлифовать шейки под ремонтный размер <i>Grind journals for the repair size</i> |
| Износ шейки под средний противовес и шестерню привода масляного насоса <i>Worn journals of the middle counterweight and oil pump drive gear</i> | Скоба <i>Clip</i> | Шлифовать шейку под ремонтный размер <i>Grind journals for the repair size</i> |
| Нарушение взаимного углового расположения относительно 1-й шатунной шейки: 2-й шатунной шейки 3-й шатунной шейки <i>Distorted mutual angular position relative to the 1st crank-throw: 2nd crank-throw 3rd crank-throw</i> | Приспособление для проверки углового расположения шатунных шеек <i>Instrument for checking angular position of crank-throws</i> | Браковать при угловом расположении более +25° <i>Reject at angular position of more than +25°</i> |
| Изменение радиуса кривошипа менее допустимого <i>Changed crank radius (less than permissible)</i> | Приспособление для замера радиуса <i>Instrument for radius measurement</i> | Браковать <i>Reject</i> |
| Риски, задиры или износ шейки под манжету <i>Scratching and scoring or wear of the collar areas</i> | Скоба <i>Clip</i> | Шлифовать до устранения рисков и задиров <i>Grind to remove any scratching and scoring</i> |
| Износ шпоночного паза под задний противовес и распределительную шестерню <i>Worn keyway for the rear counterweight and timing gear</i> | Калибр <i>Gauge</i> | Обработать под ремонтный размер <i>Grind to repair size</i> |
| Износ отверстия под подшипник первичного вала коробки передач <i>Worn bore for the bearing of the gearbox input shaft</i> | Пробка <i>Plug</i> | Установить втулку <i>Install the bushing</i> |
| Биение заднего торца коленчатого вала <i>Run-out of the rear end of the crankshaft</i> | Индикаторное приспособление <i>Indicator instrument</i> | Шлифовать до устранения биения <i>Grind until run-out is eliminated</i> |
| Риски и задиры на опорной поверхности шейки под задний противовес и распределительную шестерню <i>Scratching and scoring on the bearing surface of the throw of the rear counterweight and the distributor gear</i> | Калибр <i>Gauge</i> | Обработать участки износа <i>Grind wear areas</i> |

⁴Черноиванов В.И., Бледных В.В., Северный А.Э., Лялякин В.П., Ольховацкий А.К. Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве: учеб. пособие. Москва-Челябинск: ЧГАУ, 2001. 600 с.

Материалы и методы

Улучшить качество ремонта техники можно применением прогрессивных технологических процессов ремонта, обеспечивающих повышение надежности отремонтированных машин⁵ [4, 6].

Повышение ресурса работы, увеличение срока службы коленчатых валов, а следовательно, ДВС в целом, могут быть достигнуты с помощью наплавки защитных покрытий, напыления порошкового материала, электроискровой обработки, электроконтактного напекания (приварки) металлического слоя (порошков, ленты и т.д.), пластического деформирования материала, нанесения электрохимических и химических покрытий, методов диффузионной металлизации⁶ [2-4].

Технология электродуговой наплавки в среде защитных газов заключается в подаче под давлением защитного газа в зону горения электрической дуги, в результате столб дуги и сварочная ванна изолируются от атмосферного кислорода и азота. Такая разновидность наплавки значительно снижает ряд несовершенств наплавки под слоем флюса.

Наплавка коленчатых валов в среде защитных газов также имеет ряд недостатков: разбрызгивание металла до 5...10% и перерасход защитного газа; невысокое легирование наплавляемого металла; уменьшение износостойкости наплавленных поверхностей и усталостной прочности валов на 10...20%; необходимость защиты сварщика от интенсивного светового излучения электрической дуги. При этом использование защитных газов так же, как и флюса, при дуговой наплавке имеет ряд технологических трудностей. Отказаться от флюса или защитных газов позволяют технологии применения порошковой проволоки или ленты с соответствующим компонентным составом сердечника⁷ [2].

При формировании металлических покрытий целесообразно применять самофлюсующиеся высокоуглеродистые порошковые сплавы (табл. 2), которые достаточно точно и в широких пределах позволяют регулировать химический и фазовый состав наносимых покрытий за счет смешивания порошков с различными свойствами. Покрытия из таких композиций можно наносить как методами газотермического напыления или газопорошковой наплавки, так и индукционным напеканием, электроконтактной

приваркой или другими способами. Например, при плазменной наплавке обрабатываемая деталь включена в цепь тока нагрузки, и плазменная струя одновременно нагревает наносимый материал и поверхность восстанавливаемой детали. Наносимый порошковый материал переносится в зону наплавки плазменной струей с температурой более 20000 К. Данная технология позволяет формировать тонкослойные покрытия на коленчатые, кулачковые и распределительные валы, валы турбокомпрессоров, оси, крестовины карданных шарниров, направляющие станочного оборудования и другие высоконагруженные детали.

Технологический процесс плазменной наплавки порошковых материалов и образования тонкослойных износостойких покрытий более эффективен по сравнению с гальваническими процессами нанесения покрытий. Плазменной наплавкой можно наносить широкий спектр покрытий толщиной 0,2...6,5 мм и шириной 1,2...45 мм. При нанесении легкоплавкого материала имеется возможность проплавления только очень тонких поверхностных слоев без оплавления самой поверхности детали⁸ [2].

Различные виды наплавки сопровождаются значительным тепловыделением в основном материале детали, что может приводить к выгоранию легирующих элементов, закалке поверхностных слоев, образованию микротрещин, возникновению трудностей с последующей механической обработкой нанесенных покрытий. С другой стороны, наплавкой под слоем флюса можно получить толщину покрытия более 3 мм, а вибродуговой наплавкой в среде защитных газов – более 2 мм. Вследствие этого при последующей механической обработке покрытия большая часть наплавленного металла отправляется в стружку. В связи с этим для восстановления изношенных шеек коленчатого вала целесообразно использование технологий, сохраняющих твердые фазы металла. К таким технологиям следует отнести электроконтактную приварку (ЭКП) металлической ленты на предварительно подготовленные поверхности шеек и различные способы газотермического напыления⁹ [2-4].

Технология ЭКП металлического слоя заключается в приварке его к изношенной поверхности шеек коленчатого вала мощными импульсами тока с одновременным приложением давления. При ЭКП наносимый материал металлической ленты детали расплавляется в результате горения электрической дуги только в точках его контакта

⁵Черноиванов В.И., Бледных В.В., Северный А.Э., Лялякин В.П., Ольховацкий А.К. Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве: учеб. пособие. Москва-Челябинск: ЧГАУ, 2001. 600 с.

⁶Там же

⁷Там же

⁸Там же

⁹Там же

с поверхностью детали, а не по всей толщине покрытия [1, 3].

В зависимости от способа нагрева и диспергирования напыляемых порошковых материалов технологии нанесения покрытий подразделяются на электродуговое, газопламенное, детонационное и плазменное (индукционное и плазменно-дуговое напыление) (табл. 3).

Повышение скорости напыляемых частиц увеличивает запас их кинетической энергии. Например, при детонационном напылении порошковых материалов нагрев и ускорение (повышение кинетической энергии) наплавляемого материала осуществляются за счет энергии взрывного сгорания (детонации) пропан-бутановой смеси. Накопленная энергия затем расходуется на деформирование частиц

и их закрепление на обрабатываемой поверхности, а малое время окисления способствует снижению толщины оксидных пленок, что в итоге уменьшает пористость покрытий и значительно повышает их физико-механические и эксплуатационные свойства¹⁰ [2-4].

Во ВНИИТВЧ им. В.В. Вологодина была разработана технология индукционного напыления, при которой металлическая проволока подается в специальный индуктор, где расплавляется вихревыми токами переменного магнитного поля, расплывается сжатым воздухом и наносится на обрабатываемую деталь. Особенностью индукционного аппарата является высокочастотный индуктор и специальный концентратор тока, которые обеспечивают локальный нагрев и распыление проволоки¹¹.

Таблица 2

Компонентный состав и физико-механические характеристики порошковых сплавов

Table 2

Component composition and physical and mechanical characteristics of powder alloys

| Марка Grade | Химический состав, % Chemical composition, % | Твердость, HRC Hardness, HRC | Температура плавления, T _{пл} , °C Melting point, T _{пл} , °C | Структура покрытия Coating structure |
|----------------|---|---------------------------------|--|--|
| ПГ-СР2 | 0,4 C; 13,5 Cr; 4,5 Si; 1,8 B; Ni – остальное | 40...45 | 1050 | Карбиды и бориды в никелевой основе Carbides and borides in the nickel base |
| ПГ-СР3 | 0,3 C; 15,0 Cr; 3,0 Si; 2,4 B; Ni – остальное | 50...55 | 1050 | |
| ПГ-СР4 | 0,8 C; 16,5 Cr; 3,7 Si; 3,3 B; Ni – остальное | 58...62 | 990 | |
| ПГ-С1 | 2,9 C; 29,0 Cr; 3,5 Si; 4,2 Mn; 4,0 Ni; Fe – остальное | 51 | 1280...1320 | Карбиды хрома в железной основе Chromium carbides in the iron base |
| ПГ-С27 | 3,9 C; 26,0 Cr; 1,5 Si; 1,7 Ni; 0,3 W; 2,1 Mn; Fe – остальное | 59 | 1280...1320 | |
| ПГ-УС25 | 4,9 C; 38,0 Cr; 2,1 Si; 2,5 Mn; 1,4 Ni; Fe – остальное | 55 | 1290...1320 | |

Таблица 3

Показатели параметров различных технологий напыления

Table 3

Parameter values of different spraying techniques

| Параметр Parameter | Способы напыления / Methods of spraying | | | |
|--|---|----------------------------|----------------------|-----------------------------|
| | Электродуговое Electric arc | Газопламенное Gas-flame | Плазменное Plasma | Детонационное Detonation |
| Производительность технологического процесса, кг/г Process productivity, kg/g | 3...50 | 1...10 | 3...12 | 0,1...6,0 |
| Коэффициент использования напыляемого материала Coefficient of utilization of spraying material | 0,80...0,95 | | 0,70...0,90 | 0,30...0,60 |
| Прочность покрытия с подложкой, МПа Strength of coating with a substrate, MPa | до 40 | до 50 | до 60 | до 200 |
| Температура напыляемых частиц, °C Temperature of sprayed particles, °C | до 1800 | до 3000 | | до 4000 |
| Скорость напыляемых частиц, м/с Velocity of sprayed particles, m/s | 50...150 | 20...120 | 50...400 | 600...800 |

¹⁰ Черноиванов В.И., Бледных В.В., Северный А.Э., Лялякин В.П., Ольховацкий А.К. Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве: учеб. пособие. Москва-Челябинск: ЧГАУ, 2001. 600 с.

¹¹ Там же.

Технология индукционного напыления при минимальном окислении наносимого металла обеспечивают высокую прочность покрытий, но при этом по сравнению другими способами отличается невысокой производительностью процесса, сложностью и высокой стоимостью применяемого оборудования.

Технологический процесс восстановления шеек коленчатых валов методом напыления материала в общем виде включает в себя следующие основные операции: предварительную подготовку наносимого порошка; механическую обработку восстанавливаемой поверхности (нарезание «рваной» резьбы, дробеструйную обработку и обезжиривание); защиту поверхностей, не подлежащих напылению (установку заглушек в масляные каналы вала, нанесение защитного лака); нагрев материала покрытия; нанесение подслоя; нанесение основного покрытия; оплавление нанесенного покрытия; выдержку в термосе; удаление защитных экранов и заглушек, очистку коленчатого вала.

Широкое внедрение технологий напыления в ремонтном производстве ограничивается достаточно высокой стоимостью порошковых материалов, а также возможными отклонениями от требований технологии. При этом следует учитывать, что покрытия, полученные при помощи технологий напыления, работоспособны при минимальной толщине около 0,3 мм.

Многолетний опыт ряда машиностроительных заводов России и зарубежных стран показывает, что при выполнении специфических требований и рекомендаций напыление все чаще применяется для восстановления номинальных размеров деталей¹² [2-4].

Способы напыления порошковых материалов в порядке увеличения удельных затрат на единицу массы покрытия располагаются в следующем порядке: электродуговое – газопламенное – плазменное – детонационное; по удельным затратам на газ: электродуговое – газопламенное плазменное – детонационное; по затратам на электроэнергию: газопламенное – детонационное – электродуговое – плазменное; по затратам на заработную плату с начислениями (трудоемкости): электродуговое – газопламенное – плазменное – детонационное.

Анализ этих прогрессивных технологий с точки зрения образования тонкослойных износостойких покрытий указывает на их высокую удельную себестоимость, недостаточную производительность, низкую универсализацию, неполную реализацию потенциальных физико-механических характеристик порошковых материалов, невысокую автоматизацию процесса и ряд других недостатков (например,

¹² Черноиванов В.И., Бледных В.В., Северный А.Э., Лялякин В.П., Ольховацкий А.К. Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве: учеб. пособие. Москва-Челябинск: ЧГАУ, 2001. 600 с.

при применении детонационного напыления высокой является шумность процесса), поэтому необходимо их дальнейшее развитие и совершенствование.

Улучшение качества наносимых покрытий ведется в направлении повышения прочности сцепления и плотности благодаря применению устройств для ускорения частиц порошка, установки высокоскоростного газопламенного напыления, использованию новых технических решений, снижающих потери тепловой энергии пламени газопламенной установки и повышающих качество смешивания горючего газа и окислителя, а также нагрева частиц порошка в пламени.

В ремонтном производстве широко распространен метод, заключающийся в шлифовании шеек коленчатых валов под ремонтный размер с нормативным интервалом, как правило, составляющим 0,25 мм. Данный метод ремонта отличается минимальной трудоемкостью и относительной простотой процесса. Недостатками этого метода являются удаление термообработанного поверхностного слоя обрабатываемых шеек, подрез краев галтелей, а также снижение усталостной прочности восстановленных коленчатых валов. В стружку отправляется конструкционный материал вала, и фактически сокращается заложенный в коленчатый вал межремонтный ресурс. При последующей эксплуатации ДВС, после достижения третьего ремонтного размера, наблюдается повышение износа коренных шеек на 15...20% и снижение усталостной прочности до 25% при шлифовании на последний ремонтный размер.

Результаты и их обсуждение

Российскими учеными В.И. Черноивановым (ГОСНИТИ) и Э.С. Каракозовым (ВНИИТУВИД «Ремдеталь») установлено, что при разработке технологических процессов восстановления деталей и соответствующего оборудования для формирования качественных покрытий следует учитывать ряд условий: термические воздействия не должны приводить к фазовым или структурным изменениям в основном металле; смешивание конструкционных материалов детали и покрытия должно быть незначительным; необходимо исключить возможность изменения химического и фазового состава нанесенного покрытия по сравнению с материалом детали; в зоне контакта должны отсутствовать релаксационные процессы, способные изменить структуру и фазовый состав покрытий¹³ [2, 5].

В наибольшей степени требованиям надежности отвечают технологические процессы, у которых отношения твердости (HRC_B/HRC_H) и предела усталостной прочности (G_{1B}/G_{1H}) восстановленных (в) и новых (н) деталей численно равны или больше единицы¹⁴ [2-4, 7].

¹³ Там же

Как показывает анализ данных (табл. 4), ни одна из известных технологий восстановления коленчатых валов в полной мере не удовлетворяет данные показатели. При этом износостойкость новых коленчатых валов также в большинстве случаев выше износостойкости восстановленных деталей¹⁵ [2-4].

Важнейшим условием получения высокой износостойкости шеек коленчатых валов является технология их окончательной (финишной) абразивной обработки, применяемой для обеспечения оптимального параметра шероховатости поверхности (тонкое шлифование, суперфиниширование, полирование и др.).

В промышленности и на транспорте достаточно широко применяется метод ФАБО [5, 7-9]. Сущность ФАБО заключается во фрикционном (при помощи трения) нанесении антиизносных покрытий из пластичных металлов на поверхности обрабатываемых деталей – таких, как коренные и шатунные шейки коленчатого вала и гильзы цилиндров ДВС; различного

вида валики, оси, штоки, пальцы трансмиссии и ходовой части автотракторной техники; резьбовые соединения буровой техники; поверхности качения и реборды колесных пар железнодорожного транспорта и ряд других. Технология применяется для повышения задиристости, снижения интенсивности изнашивания и потерь на трение трущихся поверхностей, а также интенсификации процессов образования защитных «сервоитных» пленок в период приработки после изготовления или ремонта изделий и их дальнейшей эксплуатации [5, 7-9].

В результате анализа патентов и литературы, триботехнических исследований нами установлено, что применение антифрикционных, износостойких и твердосмазочных покрытий, наносимых на детали различными способами, позволяет повысить износостойкость и коррозионную стойкость, сопротивление усталостному износу и улучшить приработку шеек коленчатых валов ДВС автотракторной техники [7-9].

Оценка способов восстановления коленчатых валов¹⁶ [2]

Таблица 4

Evaluation of crankshaft restoration methods¹⁶ [2]

Table 4

| Способы восстановления / Methods of restoration | HRC _в / HRC _н | G _{-1B} / G _{-1H} |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Шлифование шеек под ремонтный размер / Grinding of journals for repair size | 0,9 | 0,9 |
| Обточка шеек с постановкой полувтулок / Roughing of journals with the placing of half bushing | 1,0 | 0,6 |
| Автоматическая электровибрационная наплавка / Automatic electro-vibrating surfacing | 0,7 | 0,4 |
| Наплавка в защитных средах / Cladding in protective media | 0,9 | 0,6 |
| Механизированная дуговая наплавка порошковой проволокой с внутренней защитой / Mechanized arc cladding with a flux cored wire having internal protection | 0,7 | 0,4 |
| Электрометаллизация / Arc spraying | 0,6 | 0,9 |
| Гальванические покрытия / Electroplated coatings | 0,4 | 0,5 |
| Наплавка плазменной дугой / Plasma arc cladding | 0,9 | 0,9 |

Выводы

1. Наиболее прогрессивными технологиями восстановления шеек коленчатых валов ДВС является плазменное и газопламенное напыление, а самым дешевым и распространенным способом – шлифование под ремонтный размер. Однако недостатками последнего являются удаление термообработанного поверхностного слоя обрабатываемых деталей, подрез краев галтелей и снижение усталостной прочности восстановленных коленчатых валов.

2. Улучшение качества наносимых покрытий (прочности сцепления и плотности покрытия)

может быть достигнуто применением новых технических решений, снижающих потери тепловой энергии, а также использованием новых композиционных материалов с высокими прочностными, антифрикционными и противоизносными свойствами.

3. Повышение задиристости и износостойкости восстановленных поверхностей трения шеек коленчатых валов ДВС может быть обеспечено за счет фрикционно-механического (при помощи трения) нанесения антиизносных, антифрикционных покрытий в процессе ФАБО.

¹⁴Черноиванов В.И., Бледных В.В., Северный А.Э., Лялякин В.П., Ольховацкий А.К. Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве: учеб. пособие. Москва-Челябинск: ЧГАУ, 2001. 600 с.

¹⁵ Там же.

¹⁶ Там же.

Список источников

1. Сковородин В.Я., Антипов А.В. Влияние режима от-делочно-антифрикционной обработки шеек коленчатого вала на параметры шероховатости поверхности // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2017. № 49. С. 245-251. EDN: YOKAYQ
2. Денисов А.С., Погораздов В.В., Тугушев Б.Ф., Горшенина Е.Ю. Технологическое обеспечение качества восстановлен-ных коленчатых валов дизельных двигателей // Вестник Сара-товского государственного технического университета. 2010. Т. 4, № 1. С. 49-54. EDN: NXCXPD
3. Голубев И.Г., Апатенко А.С., Севрюгина Н.С., Бы-ков В.В., Голубев М.И. Перспективные направления исполь-зования аддитивных технологий в ремонтном производстве // Техника и оборудование для села. 2023. № 6 (312). С. 35-38. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-6-35-38>
4. Корнейчук Н.И., Ялякин В.П. Перспективы использования индустриальных методов восстановления изношенных деталей машин гальваническими и полимерными покрытиями в современ-ных условиях развития агропромышленного технического сервиса // Труды ГОСНИТИ. 2018. Т. 130. С. 254-264. EDN: YVGNJW
5. Гаркунов Д.Н. Финишная антифрикционная безабразив-ная обработка (ФАБО) поверхностей трения деталей // Ремонт, восстановление и модернизация. 2009. № 2. С. 10-17. EDN: KNXVUH; 2009. № 3. С. 36-41 EDN: KXIXAZ; 2009. № 4. С. 20-24 EDN: KXIXEV; 2009. № 5. С. 24-29 EDN: KXIXKP; 2009. № 6. С. 38-42 EDN: KXIXRN
6. Сковородин В.Я., Антипов А.В. Влияние режима финиш-ной обработки шеек коленчатого вала на антифрикционные свойства поверхности // Известия Международной академии аграрного образования. 2018. № 41-1. С. 38-43. EDN: YQNAHR
7. Балабанов В.И. Повышение качества отремонтирован-ных двигателей внутреннего сгорания путем реализации изби-рательного переноса при трении // Вестник машиностроения. 2001. № 8. С. 14-19. EDN: TPBWOX
8. Балабанов В.И., Голубев И.Г., Добряков Д.В. Совершенство-вание технологического процесса фрикционного нанесения защит-ных покрытий // Техника и оборудование для села. 2023. № 10 (316). С. 31-34. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-10-31-34>
9. Balabanov V.I., Dobryakov D.V., Alipichev A. Yu. Developing the technology of friction alitising. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(5):52-56. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-52-56>

Информация об авторах

Виктор Иванович Балабанов^{1✉}, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой организации и технологий гидромелиоративных и строительных работ; vbalabanov@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>; SPIN-код: 1885-6817, Scopus author ID: 7005293644, Researcher ID: L-7456-2017.

Дмитрий Викторович Добряков², аспирант; dimasdobr@rambler.ru.

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, Москва, ул. Тимирязевская, 49

² Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса (Росинформагротех); 141261, Российская Федерация, Московская обл, р.п. Правдинский, ул. Лесная, 60

Конфликт интересов

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

Статья поступила в редакцию 12.04.2024; поступила после рецензирования и доработки 11.09.2024; принята к публикации 14.09.2024

References

1. Skovorodin V.Ya., Antipov A.V. Effect of the crankpin finishing and antifriction treatment mode on surface roughness parameters. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2017;49:245-251. (In Russ.)
2. Denisov A.S., Pogorazdov V.V., Tugushev B.F., Gorshenina E.Yu. Technological quality maintenance of diesel engines restored crankshafts. *Vestnik Saratovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2010;4(1):49-54. (In Russ.)
3. Golubev I.G., Apatenko A.S., Sevryugina N.S., Bykov V.V., Golubev M.I. Promising paths for the use of additive technologies in the repair industry. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;6:35-38. (In Russ.)
4. Korneychuk N.I., Lyalyakin V.P. Prospects for the use of industrial methods of repairing worn machine parts electroplating and polymer coating in modern conditions of development of agroindustrial technical services. *Trudy GOSNITI*. 2018;130:254-264. (In Russ.)
5. Garkunov D.N. Finishing antifriction non-abrasive treatment (FANT) of friction surfaces of parts. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*. 2009;2:10-17, 2009;3:36-41, 2009;4:20-24, 2009;5:24-29, 2009;6:38-42. (In Russ.)
6. Skovorodin V.Ya., Antipov A.V. The effect of mode of finishing of crankshaft journals on anti-friction surface properties. *Izvestiya Mezhdunarodnoy Akademii Agrarnogo Obrazovaniya*. 2018;41-1:38-43. (In Russ.)
7. Balabanov V.I. Improving the quality of repaired internal combustion engines by selective friction transfer. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2001;8:14-19. (In Russ.)
8. Balabanov V.I., Golubev I.G., Dobryakov D.V. Improving the technological process of frictional application of protective coatings. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;10:31-34. (In Russ.)
9. Balabanov V.I., Dobryakov D.V., Alipichev A. Yu. Developing the technology of friction alitising. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(5):52-56. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-52-56>

Author Information

Viktor I. Balabanov^{1✉}, DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Organization and Technologies of Irrigation and Construction Works; vbalabanov@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>; SPIN-код: 1885-6817, Scopus author ID: 7005293644, Researcher ID: L-7456-2017.

Dmitry V. Dobryakov², postgraduate student; dimasdobr@rambler.ru

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

² Russian Research Institute of Information and Feasibility Studies for Engineering and Technical Support of the Agribusiness Sector (Rosinformagrotekh); 60, Lesnaya Str., Pravdinsky, Moscow Region, 141261, Russian Federation

Conflict of interests

Authors declare no conflict of interests and are responsible for plagiarism.

Received 12.04.2024; Revised 11.09.2024; Accepted 14.09.2024.

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.815

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-39-46>**Качество обработки коренных шеек коленчатого вала под ремонтный размер: статистический анализ****О.А. Леонов¹, Н.Ж. Шкаруба², Г.Н. Темасова³, Д.А. Пупкова⁴, Л.А. Гринченко⁵, И.Н. Кравченко⁶**^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ oaleonov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>² shkaruba@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>³ temasova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0555-2758>⁴ bogolyubova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0273-2796>⁵ grinchenko@rgau-msha.ru⁶ kravchenko-in@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>

Аннотация. Механическая обработка ответственных деталей влияет на качество ремонта двигателей. Исследования проведены с целью оценки качества настройки станка для обработки коренных шеек коленчатого вала двигателя ЗМЗ под ремонтный размер. Исследовались диаметры 20 коренных шеек коленчатого вала двигателя ЗМЗ после обработки под ремонтный размер. Контроль размеров диаметров осуществлялся скобой рычажной СР-75. Качество обработки шеек коленчатого вала оценивалось последовательно с помощью инструментов качества: диаграммы «Ящик с усами», контрольных карт Шухарта и гистограммы. По диаграмме «Ящик с усами» установлено, что после обработки под ремонтный размер все шейки имеют диаметр в границах поля допуска на обработку, но при этом существует разброс между диаметрами шеек в пределах одного коленчатого вала. В результате анализа контрольных карт Шухарта установлено, что разброс значений размахов внутри одной подгруппы (коленчатого вала) и разброс значений между подгруппами вызваны обычными причинами, и такой характер разброса можно считать случайным. Следовательно, технологический процесс можно считать стабильным и управляемым. С помощью гистограммы установлены вероятность появления исправимого брака после обработки коренной шейки двигателя под ремонтный размер, равная 1,95%, и вероятность появления неисправимого брака, равная 0. Рассчитанный индекс воспроизводимости 0,93 свидетельствует о существенном износе оборудования. Со временем индекс будет уменьшаться и риски возникновения брака будут возрастать. Сделан вывод о приемлемом качестве настройки станка для обработки коренных шеек коленчатого вала под ремонтный размер. Рекомендуется регулярно проверять качество обработки коренных шеек коленчатого вала под ремонтный размер, последовательно применяя все три инструмента для выявления разброса размеров и несоответствий, что особенно актуально для изношенного оборудования.

Ключевые слова: ремонт двигателей, качество обработки, качество обработки коренных шеек коленчатого вала, настройки станка, диаграмма «Ящик с усами», контрольные карты Шухарта, гистограмма, индекс воспроизводимости, брак

Для цитирования: Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Темасова Г.Н., Пупкова Д.А., Гринченко Л.А., Кравченко И.Н. Качество обработки коренных шеек коленчатого вала под ремонтный размер: статистический анализ // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26, № 5. С. 39-46. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-39-46>

ORIGINAL ARTICLE

Assessment of the quality of the crankshaft grinding process for repair size**O.A. Leonov¹, N.Zh. Shkaruba², G.N. Temasova³, D.A. Pupkova⁴, L.A. Grinchenko⁵, I.N. Kravchenko⁶**^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ oaleonov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>² shkaruba@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>³ temasova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0555-2758>⁴ bogolyubova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0273-2796>⁵ grinchenko@rgau-msha.ru⁶ kravchenko-in@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>

Abstract. Mechanical processing of critical parts affects the quality of engine repair. The authors carried out research to assess the quality of setting for machining the crankshaft main journals of the ZMZ engine for the repair size.

They studied the diameters of 20 crankshaft main journals of the ZMZ engine after machining for the repair size. The diameters were controlled by a lever clamp SR-75. The following tools were sequentially used to evaluate the quality of machining main bearing journals: a “box-and-whisker” diagram, Shewhart control charts, and a histogram. According to the “Box and Whiskers” diagram it was found that after machining for the repair size all the journals have a diameter within the machining tolerance field, but at the same time there is a scatter between the diameters of the journals of the same crankshaft. After analyzing the Shewhart control charts, it was found that the scatter values within one subgroup (crankshaft) and between the subgroups were caused by the usual reasons, and this scatter pattern can be considered random. Consequently, the technological process can be considered stable and controllable. The histogram helped to determine the probability of correctable rejects after machining of the engine journal for the repair size, equal to 1.95%, and the probability of irreparable rejects, equal to 0. The calculated reproducibility index of 0.93 indicates a significant wear of the equipment. Over time, the index will decrease and the risks of rejects will increase. The authors conclude that the quality of setting for machining crankshaft main bearing journals for the repair size is acceptable. It is desirable to regularly check the quality of machining crankshaft main journals for the repair size, consistently applying all the three tools to identify the size variation and inconsistencies, which is especially relevant for worn equipment.

Keywords: engine repair, machining quality, machining quality of crankshaft main bearing journals, machine settings, box-and-whisker diagram, Shewhart control charts, histogram, reproducibility index, rejects

For citation: Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Temasova G.N., Pupkova D.A., Grinchenko L.A., Kravchenko I.N. Assessment of the quality of the crankshaft grinding process for repair size. *Agricultural Engineering (Moscow)*. (In Russ.). 2024;26(5):39-46. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-39-46>

Введение

Поддержание техники в работоспособном состоянии является актуальной задачей на современном этапе развития АПК [1-4]. Для проведения сельскохозяйственных работ и перевозки грузов в хозяйстве используется техника с двигателями внутреннего сгорания. Ввиду сложности конструкции и нагруженности ряда ответственных соединений наиболее частым является отказ двигателей.

Ремонт двигателей внутреннего сгорания заключается в его разборке и мойке, дефектовке основных деталей, обработке под ремонтный размер коленчатых и распределительных валов, а также гильз цилиндров, в комплектации и сборке.

Операции механической обработки ответственных деталей являются главными слагаемыми качества ремонта. Для анализа качества обработки можно использовать контрольные карты Шухарта и гистограммы.

Цель исследований: оценить качество настройки станка для обработки коренных шеек коленчатого вала под ремонтный размер.

Объект исследований: технологический процесс обработки коренных шеек коленчатого вала двигателя ЗМЗ под ремонтный размер.

Предмет исследований: диаметры коренных шеек коленчатого вала двигателя ЗМЗ после обработки под ремонтный размер.

Материалы и методы

Основным способом восстановления работоспособности изношенных коленчатых валов двигателей является обработка шеек под ремонтный размер методом чистового шлифования [5-8]. Однако

технологические возможности ремонтных предприятий не позволяют обеспечить качество поверхности на уровне заводов-изготовителей. В результате ресурс кривошипно-шатунных узлов отремонтированных двигателей снижается [9]. Важнейшую роль в повышении ресурса играет контроль качества настройки оборудования для обработки под ремонтный размер.

Для проведения статистического анализа качества настройки станка для обработки под ремонтный размер были проконтролированы диаметры коренных шеек 20 коленчатых валов двигателя ЗМЗ. Ремонтный размер коренных шеек $-61,75_{-0,054}^{+0,035}$. Для контроля размеров диаметров использовали скобу рычажную СР-75 (точность отсчета – 0,001 мм, погрешность измерений составила $\pm 0,001$ мм). Для проведения статистического анализа последовательно применяли три инструмента контроля качества технологического процесса: диаграмму «Ящик с усами», контрольные карты Шухарта и гистограмму. Для обработки экспериментальных данных использовались методы теории вероятностей и математической статистики^{1,2} [10, 11].

Результаты и их обсуждение

Для анализа разброса диаметров коренных шеек после обработки под ремонтный размер для каждого коленчатого вала были построены диаграммы «Ящик

¹Клячкин В.Н., Кувайскова Ю.Е., Алексеева В.А. Статистические методы анализа данных: Учебное пособие. М.: Финансы и Статистика, 2021. 240 с.

²ГОСТ Р ИСО 22514-4-2021. Статистические методы. Управление процессами. Часть 4. Оценка показателей воспроизводимости и пригодности процесса. Введ. 01.01.2022. М.: Изд-во Стандартиформ, 2021. 40 с.

с усами» (рис. 1). Диаграмма «Ящик с усами» является универсальной и наилучшим образом подходит для предварительного визуального анализа полученных данных [12]. На представленной диаграмме каждый «ящик» объединяет в себе разброс диаметров коренных шеек после обработки под ремонтный размер на одном коленчатом валу. В качестве границ «ящика» выступают первый и третий квартили (25-й и 75-й процентиля соответственно), линия в середине ящика – медиана (50-й процентиль), крестиком обозначены средние арифметические значения. Пунктирными линиями на диаграмме обозначены верхняя и нижняя граница поля допуска на обработку коренной шейки коленчатого вала под ремонтный размер.

Анализируя диаграмму (рис. 1), можно сделать следующие выводы:

- среди контролируемых диаметров отсутствуют выбросы, все контролируемые размеры находятся в пределах между 25-й и 75-й процентилем соответственно;
- у 1, 3 и 7 коленчатых валов одна из шеек имеет размер после обработки больше на 1 мкм (верхний «ус ящика») установленного верхнего предела (пунктирная линия);
- разница между медианой и средними арифметическими значениями указывает на присутствие нескольких размеров с экстремальными значениями, которые увеличивают среднее арифметическое значение.

Для нашего случая более важной характеристикой является медиана, так как для оценки качества обработки коленчатого вала важным являются единичные значения (диаметр каждой шейки), а не их среднее арифметическое.

Из диаграммы (рис. 1) следует, что размах диаметров коренных шеек (высота «ящика») имеет разброс как внутри одного коленчатого вала, так и между валами. Чтобы установить, вызван этот разброс особыми

причинами или является следствием влияния обычных причин, применим контрольные карты Шухарта [13].

Исходные данные для построения контрольных карт средних арифметических значений и скользящих размахов диаметров коренных шеек двигателя ЗМЗ после обработки под ремонтный размер представлены в таблице 1.

С использованием данных таблицы 1 построены контрольные карты средних арифметических значений и скользящих размахов диаметров коренных шеек двигателя ЗМЗ после обработки под ремонтный размер (рис. 2).

Исходные данные для построения контрольных карт средних арифметических значений и размахов диаметров коренных шеек двигателя ЗМЗ после обработки под ремонтный размер представлены в таблице 2.

Используя данные таблицы 2, построили контрольные карты средних арифметических значений и размахов диаметров коренных шеек двигателя ЗМЗ после обработки под ремонтный размер (рис. 2).

Проверка контрольных карт (рис. 2, 3) показала, что разброс значений размахов внутри одной подгруппы (коленчатого вала) и разброс значений между подгруппами вызваны обычными причинами, то есть можно такой характер разброса считать случайным. Таким образом, технологический процесс можно считать стабильным и предсказуемым.

Для оценки статистических характеристик исследуемого процесса построим гистограмму распределения, оценим закон распределения и вероятность появления бракованных коренных шеек после обработки под ремонтный размер. Исходные данные для построения гистограммы и эмпирической и теоретической кривой распределения диаметров коренных шеек коленчатых валов, обработанных под ремонтный размер, представлены в таблице 3.

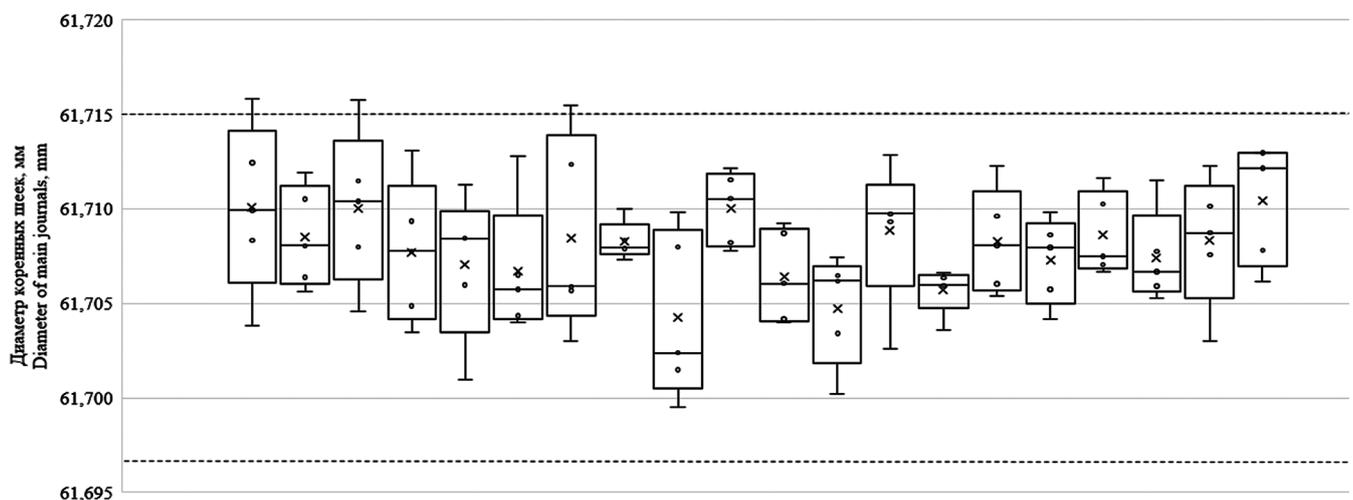


Рис. 1. Диаграмма «Ящик с усами» диаметров коренных шеек после обработки под ремонтный размер

Fig. 1. The “box-and-whisker” diagram of the diameters of the main bearing journals after processing for the repair size

Таблица 1

Исходные данные для построения контрольных карт средних арифметических значений и скользящих размахов диаметров коренных шеек двигателя ЗМЗ после обработки под ремонтный размер

Table 1

Initial data for the construction of control maps of arithmetic averages and moving ranges of the diameters of the ZMZ engine main bearing journals after processing for the repair size

| Параметр контрольной карты / Parameter of the control card | Значение, мм / Value, mm |
|--|--------------------------|
| Центральная граница \bar{X} -карты / Central boundary of the \bar{X} -card | 61,708 |
| Верхняя контрольная граница \bar{X} -карты / Upper control boundary of the \bar{X} -card | 61,7147 |
| Нижняя контрольная граница \bar{X} -карты / Lower control boundary of the \bar{X} -card | 61,701 |
| Центральная граница R-карты / Central boundary of the R-card | 0,002 |
| Верхняя контрольная граница R-карты / Upper control boundary of the R-card | 0,0069 |
| Нижняя контрольная граница R-карты / Lower control boundary of the R-card | 0 |

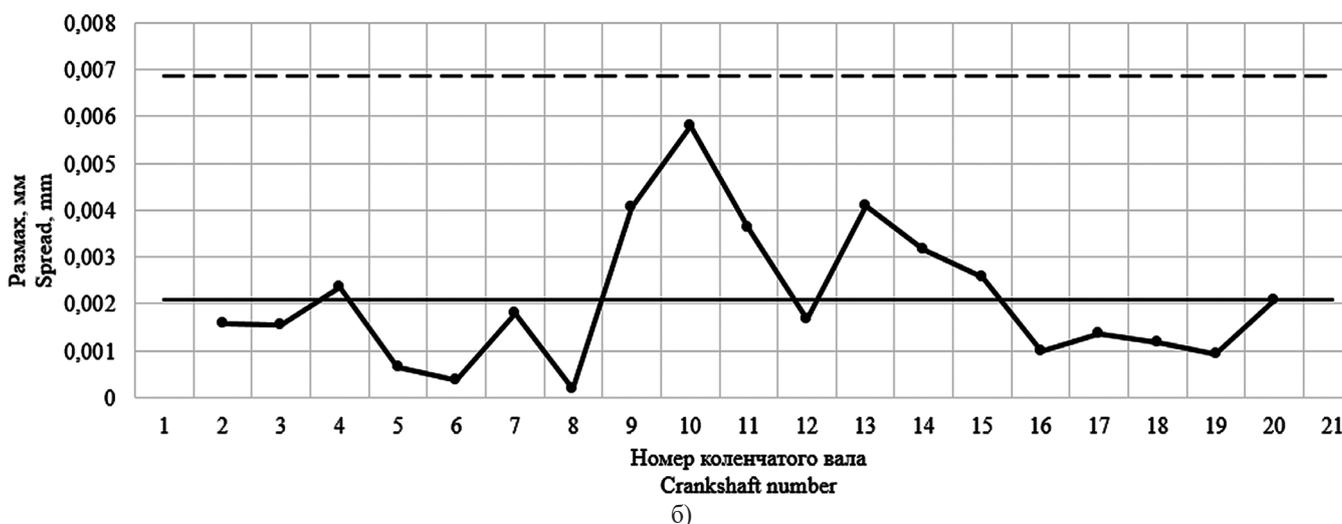
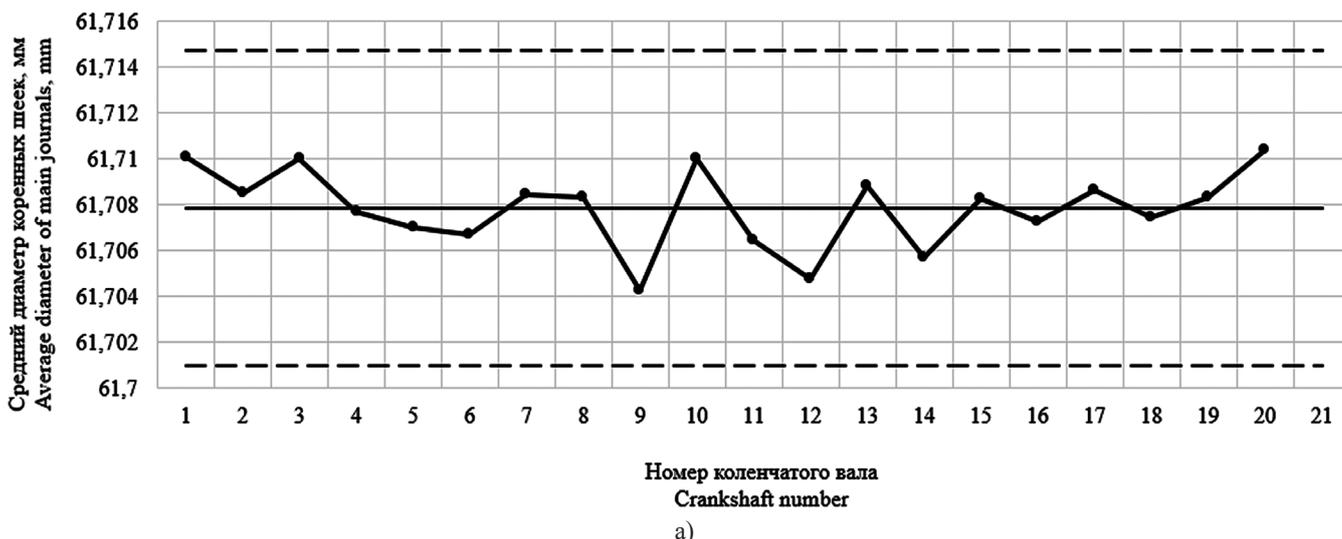


Рис. 2. Карты средних арифметических значений (а) и скользящих размахов (б) диаметров коренных шеек двигателя ЗМЗ после обработки под ремонтный размер

Fig. 2. Maps of arithmetic averages (a) and moving ranges (b) of diameters of the ZMZ engine main bearing journals after processing for the repair size

Таблица 2

Исходные данные для построения контрольных карт средних арифметических значений и размахов диаметров коренных шеек двигателя ЗМЗ после обработки под ремонтный размер

Table 2

Initial data for the construction of control maps of arithmetic averages and diameter ranges of the ZMZ engine main bearing journals after processing for the repair size

| Параметр контрольной карты / Parameter of the control card | Значение, мм / Value, mm |
|--|--------------------------|
| Центральная граница \bar{X} -карты / Central boundary of the \bar{X} -card | 61,708 |
| Верхняя контрольная граница \bar{X} -карты / Upper control boundary of the \bar{X} -card | 61,7123 |
| Нижняя контрольная граница \bar{X} -карты / Lower control boundary of the \bar{X} -card | 61,7034 |
| Центральная граница R-карты / Central boundary of the R-card | 0,008 |
| Верхняя контрольная граница R-карты / Upper control boundary of the R-card | 0,0162 |
| Нижняя контрольная граница R-карты / Lower control boundary of the R-card | 0 |

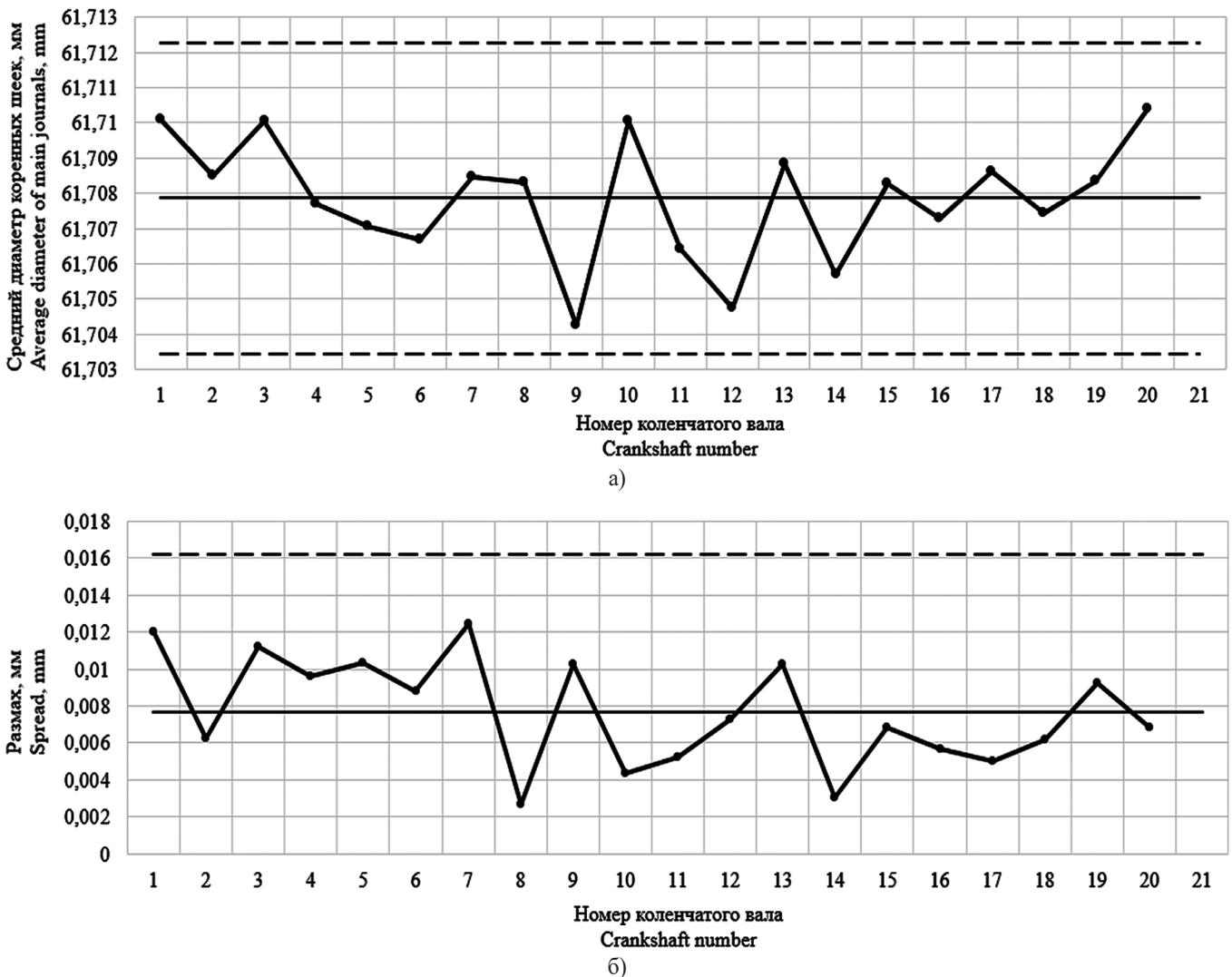


Рис. 3. Карты средних арифметических значений (а) и размахов (б) диаметров коренных шеек двигателя ЗМЗ после обработки под ремонтный размер

Fig. 3. Maps of arithmetic mean values (a) and transverse values (b) of the diameters of the ZMZ engine main bearing journals after processing for the repair size

Таблица 3

Исходные данные для построения гистограммы и эмпирической и теоретической кривой распределения диаметров коренных шеек коленчатых валов, обработанных под ремонтный размер

Table 3

Initial data for constructing a histogram and empirical and theoretical curves of the diameter distribution of the main bearing journals processed for the repair size

| Границы интервала, мм / Boundaries of the interval, mm | | Относительная частота Relative frequency | Теоретическая частота Theoretical frequency |
|--|-----------------|---|--|
| Нижняя / Lower | Верхняя / Upper | | |
| 61,700 | 61,702 | 0,04 | 0,05 |
| 61,702 | 61,704 | 0,12 | 0,14 |
| 61,704 | 61,707 | 0,22 | 0,31 |
| 61,707 | 61,709 | 0,27 | 0,40 |
| 61,709 | 61,711 | 0,15 | 0,33 |
| 61,711 | 61,714 | 0,17 | 0,16 |
| 61,714 | 61,716 | 0,03 | 0,04 |

По данным, представленным в таблице 3, построены гистограмма и полигон эмпирического распределения. Проверка гипотезы о нормальности эмпирического распределения с помощью критерия χ -квадрат показала, что с вероятностью 85% распределение можно считать нормальным.

По данным таблицы 3 были рассчитаны статистические характеристики рассеяния диаметров коренных шеек коленчатых валов, обработанных под ремонтный размер (табл. 4).

Индекс воспроизводимости процесса обработки коренных шеек коленчатых валов двигателей ЗМЗ составил $C_p = 0,93$ (табл. 4). Поскольку $C_p < 1$, то процесс можно считать неудовлетворительным (зона рассеяния шире поля допуска). Это означает, что изменчивость технологической системы не позволяет обрабатывать коренные шейки коленчатого вала без брака. Коэффициент настроенности (центрированности) технологического процесса составляет 0,0015. При такой настройке даже с учетом индекса воспроизводимости $C_p < 1$ вероятность появления неисправимого брака близка к нулю, а вероятность появления исправимого брака равна 1,95%.

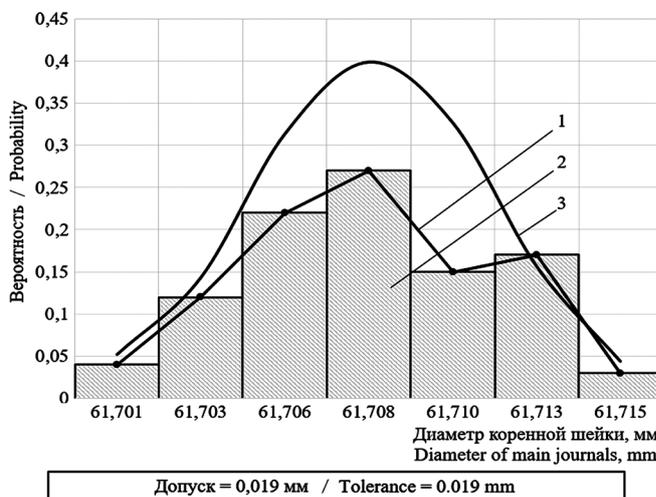


Рис. 4. Рассеяние диаметров коренных шеек коленчатых валов двигателей ЗМЗ, обработанных под ремонтный размер:
1 – полигон эмпирического распределения;
2 – гистограмма эмпирического распределения;
3 – теоретическая кривая распределения

Fig. 4. Scatter of the diameters of the ZMZ engines main bearing journals processed for repair size:
1 – polygon empirical distribution polygon; 2 – histogram of the empirical distribution; 3 – theoretical distribution curve

Таблица 4

Статистические характеристики рассеяния диаметров коренных шеек коленчатых валов, обработанных под ремонтный размер

Table 4

Statistical characteristics of the diameter scatter of the main bearing journals processed for the repair size

| Параметр распределения / Distribution parameter | Значение / Value |
|---|------------------|
| Среднее арифметическое, \bar{x} , мм / Arithmetic mean \bar{x} , mm | 61,708 |
| Зона рассеяния, ω , мм / Scattering zone ω , mm | 0,0204 |
| Вероятный процент исправимого брака, $Q_{ис}$, % / Probable percentage of correctable defects Q_{is} % | 1,95 |
| Вероятный процент неисправимого брака, $Q_{неис}$, % / Probable percentage of incorrigible defects Q_{ineis} % | 0 |
| Суммарная вероятность брака, $Q_{бп}$, % / Total probability of defects Q_{bp} % | 1,95 |
| Индекс воспроизводимости, C_p / Reproducibility index C_p | 0,93 |
| Коэффициент настроенности технологического процесса, K_n / Coefficient of adjustment of the technological process K_n | 0,015 |

Выводы

Оценка обработанных шеек коленчатого вала двигателя ЗМЗ под ремонтный размер по диаграмме «Ящик с усами» показала, что все диаметры шеек находятся в границах поля допуска на обработку. Контрольные карты Шухарта показали случайный характер разброса, технологический процесс является стабильным и управляемым. С помощью гистограммы установлена вероятность появления исправимого брака после обработки коренной шейки двигателя под ремонтный размер (1,95%), вероятность появления неисправимого брака равна нулю. Рассчитанный индекс воспроизводимости 0,93 свидетельствует

о существенном износе оборудования, и со временем индекс будет уменьшаться. В связи с этим риски возникновения брака будут возрастать.

Качество настройки станка для обработки коренных шеек коленчатого вала под ремонтный размер можно считать приемлемым, а качество обработки под ремонтный размер – соответствующим требованиям технической документации на ремонт.

Для анализа качества процесса обработки коренных шеек коленчатого вала под ремонтный размер рекомендуется регулярное последовательное применение трех инструментов для выявления разброса размеров и несоответствий, что особенно актуально для изношенного оборудования.

Список источников

1. Ерохин М.Н., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Скороходов Д.М. Производство и ремонт отечественных машин для агропромышленного комплекса с позиции принципа 5М // Вестник машиностроения. 2023. № 8. С. 701-704. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-8-701-704>
2. Бурак П.И., Голубев И.Г. Обновление парка сельскохозяйственной техники в рамках ведомственного проекта «Техническая модернизация агропромышленного комплекса» // Техника и оборудование для села. 2023. № 7 (313). С. 2-7. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-7-2-7>
3. Малыха Е.Ф., Катаев Ю.В., Закарчевский О.В., Тарасова В.А. Критерии формирования и развития вторичного рынка подержанной сельскохозяйственной техники // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2021. № 6 (75). С. 103-109. <https://doi.org/10.33938/216-103>
4. Кушнарев Л.И., Севостьянова Д.Л. К стабильно высокому качеству продукции машиностроения // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2022. № 2. С. 32-36. EDN: LDMOSA
5. Корнилович С.А., Трофимов Б.С. Анализ точности, стабильности технологического процесса шлифования коленчатых валов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2018. Т. 15, № 6 (64). С. 878-885. EDN: YUNIKD
6. Tarasenko B., Dzasheev A.M., Markov V., Zagidullin R., Akhmetshin S., Yakushev A. Method for repairing steel crankshaft joints. E3S Web of Conferences: II International Conference on Environmental Technologies and Engineering for Sustainable Development (ETESD-II 2023). Tashkent: EDP Sciences. 2023;443:04005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344304005>
7. Kumaran S.V., Wahab D.A., Aziz N.A., Wahid Z. Guidelines for Automotive Component Repair Using Additive Manufacturing in Industry 4.0: Design and Process Perspective. Journal of Information System and Technology Management. 2024;9(34):20-32. <https://doi.org/10.35631/JISTM.934002>
8. Aziz N.A., Elanggoven L., Wahab D.A., Zakaria A., Kamarulzaman N., Awang N. Failure-based design validation for effective repair of multi-metal additive manufacturing: the case of remanufacturable brake caliper. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024;132:1425-1437. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13425-x>
9. Сквородин В.Я., Антипов А.В. Влияние режима финишной обработки шеек коленчатого вала на антифрикционные свойства поверхности // Известия Международной академии аграрного образования. 2018. № 41-1. С. 38-43. EDN: YQNAHR

References

1. Erokhin M.N., Leonov O.A., Shkaruba N.J. Vergazova Yu.G., Skorokhodov D.M. Production and repair of domestic machines for agroindustrial complexes from the position of the 5M principle. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2023;8:701-704. (In Russ.) <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-8-701-704>
2. Burak P.I., Golubev I.G. Renewal of the park of agricultural machinery with the framework of the departmental project "technical modernization of the agro-industrial complex". *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;7:2-7. (In Russ.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-7-2-7>
3. Malykha E.F., Kataev Yu.V., Zakarchevski O.V., Tarasova V.A. Criteria for the formation and development of the secondary market of used agricultural machinery. *Ekonomika, Trud, Upravlenie v Selskom Khozyaystve*. 2021;6:103-109. (In Russ.) <https://doi.org/10.33938/216-103>
4. Kushnarev L.I., Sevostyanova D.L. On high-repeatability quality of engineering industry products. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*. 2022;2:32-36. (In Russ.)
5. Kornilovich S.A., Trofimov B.S. Precision, stability analysis of the crankshaft grinding technological process. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018;15(6):878-885. (In Russ.)
6. Tarasenko B., Dzasheev A.M., Markov V., Zagidullin R., Akhmetshin S., Yakushev A. Method for repairing steel crankshaft joints. *E3S Web of Conferences: II International Conference on Environmental Technologies and Engineering for Sustainable Development (ETESD-II 2023)*. Tashkent: EDP Sciences. 2023;443:04005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344304005>
7. Kumaran S.V., Wahab D.A., Aziz N.A., Wahid Z. Guidelines for automotive component repair using additive manufacturing in industry 4.0: design and process perspective. *Journal of Information System and Technology Management*. 2024;9:20-32. <https://doi.org/10.35631/JISTM.934002>
8. Aziz N.A., Elanggoven L., Wahab D.A., Zakaria A., Kamarulzaman N., Awang N. Failure-based design validation for effective repair of multi-metal additive manufacturing: the case of remanufacturable brake caliper. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024;132:1425-1437. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13425-x>
9. Skovorodin V.Ya., Antipov A.V. The effect of mode of finishing of crankshaft journals on anti-friction surface properties. *Izvestiya Mezhdunarodnoy Akademii Agrarnogo Obrazovaniya*. 2018;41-1:38-43. (In Russ.)

10. Розно М.И. Статистический приемочный контроль качества продукции: свойства и возможности. Ч. 1 // Контроль качества продукции. 2020. № 9. С. 32-39. EDN: OLZZCK

11. Бриш В.Н., Старостин А.В., Осипов Ю.Р. Применяемость статистических методов анализа и контроля качества продукции машиностроения на разных этапах производства // Фундаментальные исследования. 2016. № 12-4. С. 719-724. EDN: XHTVZ

12. Шпер В.Л. Инструменты качества и не только! Ч. 3. С чего начать (продолжение) // Методы менеджмента качества. 2021. № 3. С. 48-54. EDN: RNZYNO

13. Рогожина Е.А., Тверской О.Ю. Сравнение типов контрольных карт Шухарта для количественных данных с помощью верификации разработанных алгоритмов // Промышленность и сельское хозяйство. 2022. № 1 (42). С. 46-56. EDN: AAOYLZ

Информация об авторах

Олег Альбертович Леонов^{1,2,3,4,5,6}, д-р техн. наук, профессор; oaleonov@rgau-msha.ru^{1,2}; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>

Нина Жоровна Шкаруба², д-р техн. наук, профессор; shkaruba@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>

Галина Николаевна Темасова³, канд. экон. наук, доцент; temasova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0555-2758>

Дарья Александровна Пупкова⁴, ассистент; bogolyubova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0273-2796>

Лаврентий Александрович Гринченко⁵, ассистент; grinchenko@rgau-msha.ru

Игорь Николаевич Кравченко⁶, д-р техн. наук, профессор; kravchenko-in@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>

^{1,2,3,4,5,6} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

О.А. Леонов – концептуализация и общее научное руководство; Н.Ж. Шкаруба – компьютерная графика, аппроксимация и верификация массива полученных данных, редактирование окончательной версии рукописи;

Г.Н. Темасова – проведение исследований, обработка массива полученных данных, формирование черновика рукописи, разработка аннотации;

Д.А. Пупкова – литературный анализ;

Л.А. Гринченко – обработка информации, оформление черновика рукописи.

И.Н. Кравченко – научное руководство

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила в редакцию 19.03.2024; поступила после рецензирования и доработки 20.05.2024; принята к публикации 24.05.2024

10. Rozno M.I. Statistical acceptance quality control: properties and capabilities. Part I. *Production Quality Control*. 2020;9:32-39. (In Russ.)

11. Brish V.N., Starostin A.V., Osipov Yu.R. Applicability of statistical methods of analysis and quality control of engineering products at different stages of production. *Fundamentalnye Issledovaniya = Fundamental Research*. 2016;12-4:719-724. (In Russ.)

12. Shper V.L. Quality tools and something more! Part 3. Where to begin (to be continued). *Metody Menedzhmenta Kachestva = Methods of Quality Management*. 2021;3:48-54. (In Russ.)

13. Rogozhina E.A., Tverskoy O.Yu. Comparing the types of Shewhart control charts for quantitative data through the verification of the developed algorithms. *Promyshlennost i Selskoe Khozyaystvo*. 2022;1:46-56. (In Russ.)

Author Information

Oleg A. Leonov^{1,2,3,4,5,6}, DSc (Eng), Professor, oaleonov@rgau-msha.ru^{1,2}; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>

Nina Zh. Shkaruba², DSc (Eng), Professor, shkaruba@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>

Galina N. Temasova³, PhD (Econ), Associate Professor; temasova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0555-2758>

Daria A. Pupkova⁴, Assistant Professor, bogolyubova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0273-2796>

Lavrentiy A. Grinchenko⁵, Assistant Professor, grinchenko@rgau-msha.ru

Igor N. Kravchenko⁶, DSc (Eng), Professor, kravchenko-in@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>

^{1,2,3,4,5,6} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya, 49, Moscow, 127434, Russia

Author Contribution

O.A. Leonov – conceptualization and general research supervision; N.Zh. Shkaruba – computer graphics, approximation and verification of the data set, finalizing (revising and editing) of the manuscript;

G.N. Temasova – investigation, processing of the data set, writing – original draft preparation, abstract writing;

D.A. Pupkova – literature review;

L.A. Grinchenko – data processing, writing – original draft preparation.

I.N. Kravchenko – research supervision.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests and are responsible for plagiarism

Received 19.03.2024; Revised 20.05.2024; Accepted 24.05.2024.

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.3.004.5

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-47-52>**Интенсификация процесса очистки деталей погружением в моющий раствор****В.М. Корнеев^{1✉}, Д.И. Петровский², Н.В. Корнеев³**^{1,2} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия³ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия¹ tsmo@rgau-msha.ru² petrovsky@rgau-msha.ru³ swy16@mail.ru

Аннотация. Качество очистки металлических деталей от загрязнений зависит от физико-химических свойств моющей среды и интенсивности механического воздействия жидкости на очищаемые поверхности. Интенсификация процесса очистки деталей возможна при создании неустановившегося режима движения моющей жидкости, характеризующегося изменением давления и скорости жидкости во времени и в каждой рассматриваемой точке очищаемой поверхности. С целью подтверждения теоретического положения о зависимости эффективности очистки от скорости потока моющей жидкости проведен эксперимент, в котором использовалась комбинированная погружная моечная машина, характеризующаяся сочетанием двух гидромеханических способов интенсификации процесса очистки. Перемещение деталей в ванне осуществлялось посредством колебания платформы. Турбулентный поток моющей жидкости относительно объекта очистки обеспечивался лопастным винтом. В качестве объекта очистки использовались шатуны двигателей внутреннего сгорания, имеющие на поверхностях трудно удаляемые асфальтосмолистые загрязнения. Исследование процесса очистки проводилось в водном растворе моющего средства Темп-100Д концентрацией 20 г/л при температуре 65...70°C. Продолжительность очистки составляла 15 мин. Качество очистки деталей от загрязнений контролировалось по смачиваемости очищенной поверхности водой. Исследованиями установлено, что интенсивность очистки, характеризуемая скоростью потока жидкости, необходимой для отрыва частиц загрязнений, зависит от частоты колебаний платформы с деталями. Увеличение частоты колебаний от 0,25 до 1,0 Гц приводит к повышению скорости потока моющего раствора в 3 раза, что обеспечивает интенсивное удаление загрязнений с одновременным повышением качества очистки. При увеличении частоты колебаний от 0 до 1,0 Гц эффективность очистки повышается в 2,5 раза. Теоретическое положение о зависимости эффективности очистки от скорости потока моющей жидкости подтверждено.

Ключевые слова: интенсификация процесса очистки деталей, загрязнения, качество очистки, эффективность очистки, скорость потока жидкости, турбулентный поток моющей жидкости, погружная моечная машина

Для цитирования: Корнеев В.М., Петровский Д.И., Корнеев Н.В. Интенсификация процесса очистки деталей погружением в моющий раствор // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 5. С. 47-52. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-47-52>

ORIGINAL ARTICLE

Intensified cleaning of parts immersed in a detergent solution**V.M. Korneev^{1✉}, D.I. Petrovsky², N.V. Korneev³**^{1,2} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia³ Federal Scientific Agroengineering Centre IM; Moscow, Russia¹ tsmo@rgau-msha.ru² petrovsky@rgau-msha.ru³ swy16@mail.ru

Abstract. The quality of cleaning metal parts from contaminants depends on the physical and chemical properties of the washing medium and the intensity of the mechanical impact of the liquid on the surfaces subject to cleaning. Intensified cleaning of the parts is possible when there is an unsteady mode of a washing liquid flow, characterized by change of pressure and speed of a liquid in time and in each considered point of a surface subject to cleaning. In order to confirm the theoretical statement about the dependence of cleaning efficiency on the speed

of the washing liquid flow, the authors made an experiment. They took a combined submerged washing machine using a combination of two hydromechanical methods of cleaning intensification. The parts subject to cleaning moved in the bath by means of the platform vibration. A helical blower provided the turbulent flow of the washing liquid relative to the object subject to cleaning. The authors used connecting rods of internal combustion engines as the objects to be cleaned. Their surfaces contained asphalt-resin contaminants, which were hard to remove. The cleaning process was studied in the aqueous solution of detergent Temp-100D with a concentration of 20 g/l at a temperature of 65 to 70°C. The cleaning lasted for 15 min. The quality of cleaning from contaminants was controlled by wettability of the cleaned surface with water. It was found that the intensity of cleaning, characterized by the liquid flow rate necessary for the detachment of dirt particles, depends on the vibration frequency of the platform holding the cleaned parts. Increasing the vibration frequency from 0.25 to 1.0 Hz leads to a three-fold increase in the flow rate of the cleaning solution, which provides an intensive removal of contaminants while increasing the quality of cleaning. When increasing the vibration frequency from 0 to 1.0 Hz, the cleaning efficiency increases in 2.5 times. The study results confirmed the theoretical supposition of the relationship between the cleaning efficiency and the washing liquid flow rate.

Keywords: intensified cleaning of parts, contamination, cleaning quality, cleaning efficiency, liquid flow rate, turbulent flow of the washing liquid, submerged washing machine

For citation: Korneev V.M., Petrovsky D.I., Korneev N.V. Intensified cleaning of parts immersed in a detergent solution. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(5):47-52. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-47-52>

Введение

Очистка поверхностей деталей сельскохозяйственных машин является начальным этапом ремонтно-обслуживающих воздействий. Необходимость очистки обусловлена наличием на поверхностях деталей загрязнений, разнообразных по составу, свойствам, толщине и прочности сцепления. Исследованиями установлено, что качественная очистка рабочих поверхностей деталей от эксплуатационных и технологических загрязнений предотвращает преждевременное изнашивание ответственных деталей, увеличивает срок безотказной работы сборочных агрегатов и обеспечивает значительный экономический эффект^{1,2,3,4}.

¹Корнеев В.М., Кравченко И.Н., Петровский Д.И. и др. Технологическая подготовка предприятий технического сервиса. М.: ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2019. 244 с. (Высшее образование: Бакалавриат). https://doi.org/10.12737/textbook_5c10d4f2041e91.56370235.

²Корнеев В.М., Кравченко И.Н., Новиков В.С. и др. Технология ремонта машин: Учебник для студентов, обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 «Агроинженерия» М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2019. 266 с. EDN: GRGJOO.

³Юдин В.М. Применение современных ресурсосберегающих технологий очистки машин и оборудования в сельском хозяйстве: Практические рекомендации. М.: Информагро, 1998. 48 с. EDN: VDNOQR.

⁴Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024621195. Российская Федерация. Ресурсосберегающая технология струйной гидродинамической очистки наружных поверхностей автотракторной техники: № 2024620813. Заяв. 11.03.2024; Опубл. 19.03.2024 / И.Н. Кравченко, В.М. Корнеев, А.В. Корнеев и др. EDN: HНQXAH.

Очистка является весьма трудоемким процессом. При выполнении технологических операций очистки на нагрев моющих растворов расходуется до 13% энергетических ресурсов общего расхода сервисного предприятия. В системе технического сервиса агропромышленного комплекса установленная мощность электродвигателей моечного оборудования составляет 20% от общей установленной мощности ремонтно-обслуживающих предприятий. Ежегодно на операцию очистки расходуется до 20 тыс. т моющих средств. В связи с этим изыскиваются способы уменьшения энергоемкости процесса очистки⁵.

Для очистки деталей ремонтируемых машин широко используется погружная моечная машина. Эффективность очистки деталей в этих машинах определяется физико-химическими характеристиками синтетических моющих средств (состав, концентрация, температура) и характером взаимодействия моющей среды с очищаемой поверхностью (степень возбуждения моющей жидкости и характер ее движения относительно частиц загрязнения) [1-3].

При очистке металлических поверхностей деталей в моечных машинах погружного типа в качестве механического воздействия применяются возбуждение моющей жидкости вокруг объекта очистки (статические активаторы), перемещение деталей в моющем растворе (динамические активаторы), механическое перемешивание раствора вокруг перемещающихся деталей (комбинированные активаторы).

⁵Козлов Ю.С., Кузнецов О.К., Тельнов А.Ф. Очистка изделий в машиностроении: монография. М.: Машиностроение, 1982. 261 с.

Очевидно, что отрыв частиц от поверхности детали возможен при умеренной средней скорости моющего раствора и искусственном возмущении, вызванным путем колебания давления или скорости потока жидкости. Таким образом, при погружном способе для качественной очистки деталей сложной конфигурации и интенсификации процесса необходимо относительно очищаемых поверхностей создавать под высоким давлением многонаправленные турбулентные потоки моющей жидкости [4].

Результаты анализа практического опыта показывают, что часто специалисты ремонтно-обслуживающих предприятий, стремясь повысить эффективность погружной очистки, занимаются совершенствованием имеющегося моечного оборудования и созданием новых конструкций на основе известного производственного опыта и собственной интуиции. Без научно обоснованного критерия оценки уровня воздействия моющей среды на очищаемую поверхность, без исследований энергоемкости различных способов интенсификации гидромеханической очистки такие попытки приводят к значительным затратам и не обеспечивают достижения поставленной цели⁶ [5].

Таким образом, изыскание и исследование гидромеханических способов повышения эффективности очистки деталей является актуальным научным направлением интенсификации процессов отрыва загрязнений от очищаемых поверхностей [6-8].

Цель исследований: повышение эффективности удаления загрязнений с очищаемых поверхностей деталей путем интенсификации процесса очистки за счет увеличения силы гидродинамического воздействия моющего раствора на частицы загрязнений; подтверждение теоретического положения о зависимости эффективности очистки от скорости потока моющей жидкости.

Материалы и методы

Теоретические исследования базировались на законах гидромеханики о движении жидкости и процессах ее взаимодействия с твердым телом⁷.

Для изучения влияния характера движения моющей жидкости и амплитудно-частотных характеристик потока на эффективность очистки деталей использовалась погружная моечная машина,

реализующая комбинированный способ интенсификации процесса.

В экспериментальной установке вблизи очищаемых поверхностей деталей обеспечивается турбулентный поток моющей жидкости за счет вращения винтового активатора, а реализация требуемого характера колебаний жидкости осуществляется путем прямолинейного возвратно-поступательного перемещения контейнера с очищаемыми деталями (рис. 1).

Измерение скорости течения водного раствора синтетического моющего средства производилось прибором ИСП-1 совместно с регистратором ПСВ-1. Контроль амплитудно-частотных характеристик потока жидкости осуществлялся пьезоэлектрическим акселерометром RION TECHNOLOGY AKE3948-40.

Для измерения скорости потока использовался погружной датчик скорости, закрепляемый на гидрометрической штанге. Интенсивность колебательных процессов фиксировалась датчиками переменного давления, закрепленными в трех точках платформы, равноудаленных друг от друга.

В качестве объекта очистки использовались шатуны двигателей внутреннего сгорания, имеющие на поверхностях трудноудаляемые асфальтосмолистые загрязнения.

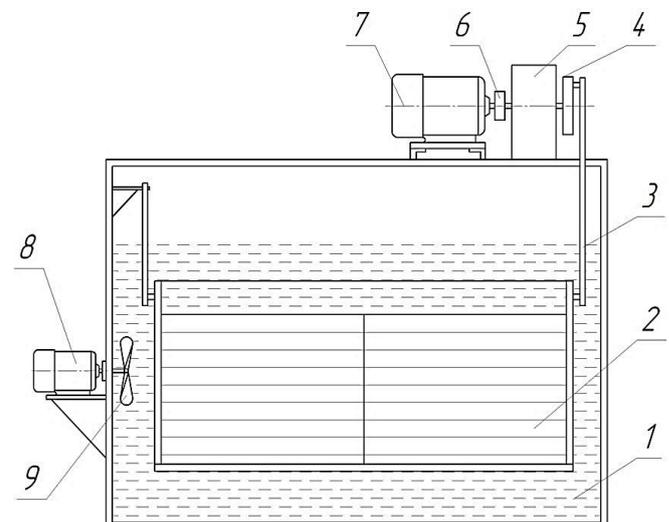


Рис. 1. Кинематическая схема экспериментальной установки:

- 1 – моечная камера;
- 2 – платформа с корзинами для деталей;
- 3 – шатун привода платформы; 4 – кривошип;
- 5 – редуктор; 6 – соединительная муфта;
- 7, 8 – электродвигатели;
- 9 – ротор-активатор (лопастной винт)

Fig. 1. Kinematic scheme of the experimental installation:

- 1 – washing chamber;
- 2 – platform with baskets for parts;
- 3 – connecting rod of the platform drive; 4 – crank;
- 5 – reduction gear; 6 – coupling; 7, 8 – electric motors;
- 9 – rotor-activator (helical blower)

⁶Фадеев И.В., Успенский И.А., Юхин И.А., Шемякин А.В. Совершенствование технологии мойки деталей при ремонте машин: монография. Чебоксары: Чувашский государственный педагогический университет им. И.Я. Яковлева, 2020. 343 с. EDN: NRCSJQ.

⁷Моргунов К.П. Гидравлика: учебник для СПО. 3-е изд., стер. СПб.: Лань, 2023. 280 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/284033> (дата обращения: 01.04.2024).

Исследование процесса очистки проводилось в водном растворе моющего средства Темп-100Д при следующих технологических режимах: концентрация моющего средства в растворе – 20 г/л; температура моющего раствора – 65...70°C, продолжительность очистки – 15 мин.

При экспериментальном исследовании эффективности очистки турбулентным потоком жидкости определялось влияние интенсивности колебательных процессов на скорость потока моющей жидкости и эффективность удаления загрязнений в зависимости от величин частоты колебаний давления и средней скорости потока.

Уровень варьирования фактора для частоты колебаний платформы составил 25%, границы варьирования частоты колебаний платформы – от 0 до 1 Гц.

Контроль качества очистки проводился по смачиваемости поверхности объекта исследования водой:

$$K = \frac{S_{\text{очист}}}{S_{\text{общ}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $S_{\text{очист}}$ – площадь поверхности, покрытой непрерывной пленкой воды, см²; $S_{\text{общ}}$ – общая площадь поверхности объекта очистки, см².

Контроль качества очистки способом смачивания водой основан на способности очищенной поверхности удерживать непрерывную пленку воды, если эта поверхность свободна от загрязнений. Совершенно чистая поверхность полностью смачивается неразрывной в течение 5 с пленкой воды. Загрязненная поверхность не смачивается водой, пленка воды сразу разрывается и лишь частично покрывает поверхность детали. Показатель качества очистки определяется визуально по выделенной площади смачиваемости очищенной поверхности детали водой. Для смачивания применяют холодную дистиллированную воду, которая наносится на поверхность детали методом погружения.

Результаты и их обсуждение

Повышению производительности и качества погружной очистки способствует гидродинамическая активация моющего раствора. Колебания платформы с деталями и активация моющего раствора лопастным винтом приводят к образованию турбулентного потока жидкости, для которого характерно наличие поперечных (по отношению к основному направлению движения) пульсационных скоростей жидкости, являющихся следствием переноса конечных масс моющей жидкости.

Наличие в турбулентном потоке пульсационных скоростей жидкости способствует отрыву частиц загрязнений от очищаемой поверхности и их

транспортированию из зоны очистки. Таким образом, повысить эффективность очистки можно, если искусственно турбулизовать поток моющей жидкости.

При исследовании эффективности очистки возникла необходимость в изучении процесса отрыва загрязнений от очищаемой поверхности.

Теоретически установлено, что твердые частицы загрязнений, лежащие на очищаемой поверхности, испытывают со стороны потока водного раствора синтетического моющего средства силовое воздействие, причиной которого является сила лобового сопротивления частицы $P_{\text{лоб}}$. Под действием силы $P_{\text{лоб}}$ происходит процесс отрыва частиц загрязнений от очищаемой поверхности.

Реализация процесса очистки при механическом воздействии жидкости на загрязнения возможна при условии, если сила гидродинамического воздействия превысит прочностные свойства загрязнений (адгезионно-когезионной характеристики загрязнений, зависящей от прочности загрязнений на сжатие, растяжение, сдвиг и адгезию к поверхности):

$$P_{\text{лоб}} > P_{\text{адк}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{адк}}$ – адгезионно-когезионная сила, Н.

Величину силы лобового сопротивления частицы загрязнения можно определить по формуле Н.Е. Жуковского:

$$P_{\text{лоб}} = 0,2 \cdot \pi \cdot d_{\text{ч}}^2 \cdot \rho \cdot V^2, \quad (3)$$

где $d_{\text{ч}}$ – диаметр частицы загрязнения, м; ρ – плотность моющей жидкости, кг/м³; V – скорость потока моющей жидкости относительно загрязненной поверхности, м/с.

Из формулы (3) следует, что определяющим фактором отрыва загрязнений от очищаемой поверхности является скорость турбулентного потока моющего раствора. Следовательно, правомерность формулы (3), описывающей кинетику процесса очистки деталей потоком жидкости, целесообразно подтвердить экспериментальным путем.

При проведении эксперимента была выявлена зависимость величины средней скорости потока жидкости U внутри контейнера от величины частоты колебаний f контейнера с очищаемыми деталями (рис. 2).

Установлено, что с увеличением частоты колебаний контейнера от 0,25 до 1,0 Гц средняя скорость потока жидкости, необходимая для отрыва частиц загрязнений, возрастает в 3 раза. Это объясняется образованием касательных напряжений трения на очищаемых поверхностях при воздействии на них колебаний давления моющей жидкости.

Результаты исследования влияния амплитудно-частотных характеристик потока жидкости на качество очистки (рис. 3) показали, что чем выше частота колебаний контейнера с деталями и, соответственно, скорость потока моющего раствора, тем меньше остаточная загрязненность очищаемых поверхностей, то есть качество очистки повышается. При этом снижается интенсивность уменьшения остаточной загрязненности, особенно

при частоте колебаний более 0,3 Гц, что свидетельствует о высокой эффективности гидродинамического фактора воздействия моющего раствора на частицы загрязнений.

Таким образом, в процессе исследований подтверждено теоретическое положение Н.Е. Жуковского о зависимости эффективности очистки от скорости потока моющей жидкости, то есть степени ее турбулизации.

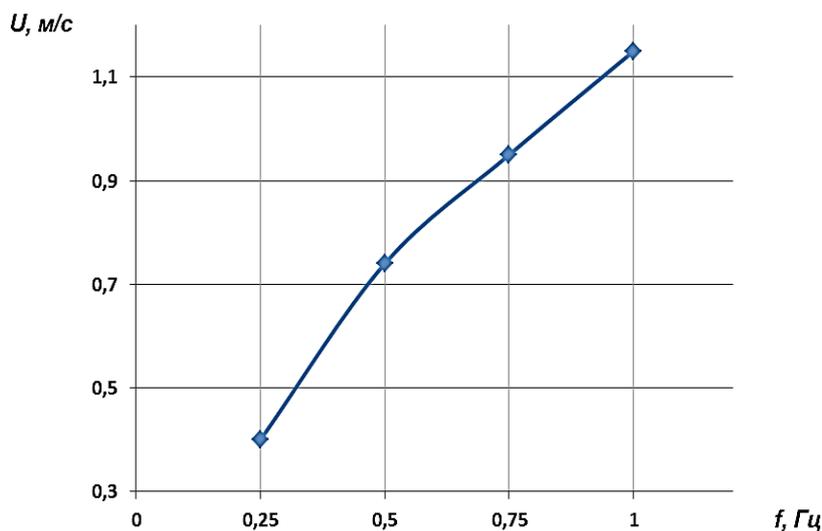


Рис. 2. Скорость потока жидкости в зависимости от величины частоты колебаний контейнера с деталями

Fig. 2. Fluid flow rate depending on the vibration frequency of the container with parts

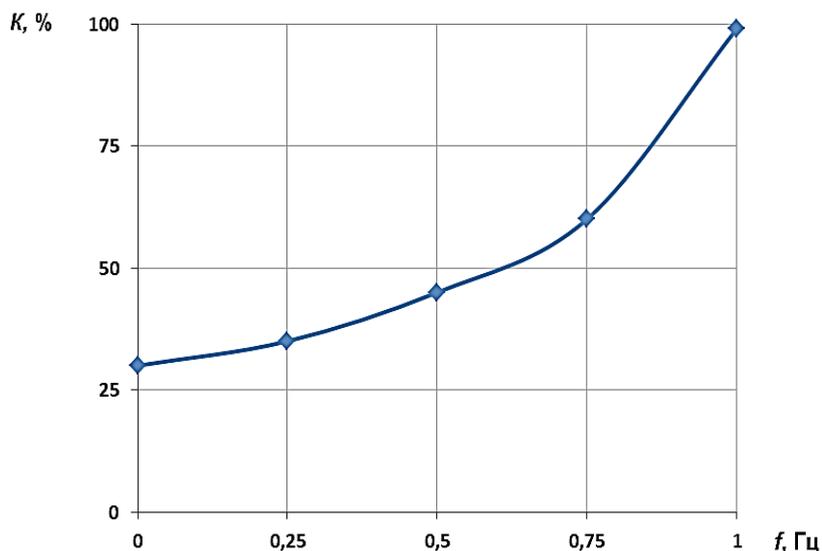


Рис. 3. Качество очистки в зависимости от частоты колебаний контейнера с деталями

Fig. 3. Cleaning quality depending on the vibration frequency of the container with parts

Выводы

1. Для интенсификации процесса очистки загрязненных деталей целесообразно применять турбулентный поток моющей жидкости, вызываемый колебаниями давления.

2. Экспериментально подтверждена зависимость эффективности очистки от скорости потока моющей жидкости: с увеличением частоты колебания давления от 0,25 до 1,0 Гц скорость потока жидкости возрастает в 3 раза; при увеличении частоты от 0 до 1,0 Гц эффективность очистки повышается в 2,5 раза.

Список источников

1. Петрик Д.Ю., Корнеев В.М., Петрик В.Ю. Интенсификация процесса очистки деталей в погружных моечных машинах // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 5. С. 73-77. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-5-73-77>
2. Петрик Д.Ю., Корнеев В.М., Петрик В.Ю. Определение оптимальных технологических параметров процесса очистки деталей в погружных моечных машинах // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 81-84. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-81-84>
3. Петрик Д.Ю., Корнеев В.М., Петрик В.Ю. Факторы интенсификации процессов очистки деталей в погружных моечных машинах (на примере ультразвукового метода очистки) // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 1 (127). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.24>
4. Корнеев В.М., Петрик Д.Ю. Исследование факторов интенсификации процессов очистки деталей в погружных моечных машинах // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: Материалы XII Международной научно-практической конференции, Владикавказ, 8-10 декабря 2022 г. Владикавказ: «Веста», 2022. С. 24-28. EDN: IYMXGZ
5. Фадеев И.В., Степанова Е.И., Воронов В.П., Полищук С.Д. Анализ способов очистки и мойки поверхностей деталей в процессе ремонта агрегатов автотракторной техники // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2022. Т. 14, № 2. С. 183-192. <https://doi.org/10.36508/RSATU.2022.54.2.022>
6. Кравченко И.Н., Сливов А.Ф., Корнеев В.М., Катаев Ю.В. Очистка поверхностей деталей при их восстановлении // Сельский механизатор. 2019. № 8. С. 38-40. EDN: UTRAGQ
7. Дорохов А.С., Корнеев В.М., Катаев Ю.В. Теоретическая оценка механизма микроударного воздействия воды на нагароотложения в двигателях // Технический сервис машин. 2019. № 2. С. 67-74. EDN: MKXIAI
8. Шемякин А.В., Фадеев И.В., Юхин И.А., Степанова Е.И., Зюба В.В. Влияние активации раствора колебанием корзины с деталями в моечной установке на степень очистки деталей // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2023. Т. 15, № 1. С. 175-181. EDN: KWAMHU

Информация об авторах

- Виктор Михайлович Корнеев**^{1✉}, канд. техн. наук, доцент; tsmo@rgau-msha.ru[✉]
- Дмитрий Иванович Петровский**², канд. техн. наук, доцент; petrovsky@rgau-msha.ru
- Николай Викторович Корнеев**³, аспирант; swy16@mail.ru
- ^{1,2} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49
- ³ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, пр-д 1-й Институтский, 5

Вклад авторов

В.М. Корнеев – научное руководство, формулирование основных направлений исследований, формулировка общих выводов
 Д.И. Петровский – формулировка общих выводов, анализ литературы, обработка результатов исследований
 Н.В. Корнеев – обработка результатов исследований, подготовка рукописи

Конфликт интересов

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

Статья поступила в редакцию 11.04.2024; поступила после рецензирования и доработки 28.05.2024; принята к публикации 03.06.2024.

References

1. Petrik D.Yu., Korneev V.M., Petrik V.Yu. Intensifying the process of cleaning parts in submersible washing machines. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(5):73-77. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-5-73-77>
2. Petrik D.Yu., Korneev V.M., Petrik V.Yu. Determining the optimum technological parameters of cleaning parts in submersible washing machines. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(4):81-84. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-81-84>
3. Petrik D.Yu., Korneev V.M., Petrik V.Yu. The factors of intensification of parts cleaning processes in submerged washing machines (on the example of ultrasonic cleaning method). *International Research Journal*. 2023;1(127). (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.24>
4. Korneev V.M., Petrik D.Yu. Investigation of intensification factors of cleaning processes of parts in submersible washing machines. *Molodye Uchenye v Reshenii Aktualnykh Problem Nauki: Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference, Vladikavkaz, December 8-10, 2022 Vladikavkaz: 'Vesta', 2022. Pp. 24-28. (In Russ.)*
5. Fadeev I.V., Stepanova E.I., Voronov V.P., Polishchuk S.D. Analysis of environmental cleaning and washing of affected parts in the process of repairing units of automotive and tractor equipment. *Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev*. 2022;14;2:183-192. (In Russ.). <https://doi.org/10.36508/RSATU.2022.54.2.022>
6. Kravchenko I.N., Slivov A.F., Korneev V.M., Kataev Yu.V. Cleaning surfaces of parts during their restoration, *Selskiy Mekhanizator*. 2019;8:38-40. (In Russ.)
7. Dorokhov A.S., Korneev V.M., Kataev Yu.V. Theoretical evaluation of the mechanism of microwave effects of water on cooling in engines. *Technical service of cars*. 2019;2:67-74. (In Russ.)
8. Shemyakin A.V., Fadeev I.V., Yukhin I.A., Stepanova E.I., Zyuba V.V. Influence of solution activation by oscillation of the basket with parts in the washing plant for the degree of cleaning of parts. *Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev*. 2023;15;1:175-181. (In Russ.)

Author Information

- Viktor M. Korneev**^{1✉}, CSc (Eng), Associate Professor; tsmo@rgau-msha.ru[✉]
- Dmitry I. Petrovskiy**², CSc (Eng), Associate Professor; petrovsky@rgau-msha.ru
- Nikolay V. Korneev**³, postgraduate student; swy16@mail.ru
- ^{1,2} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, 49, Timiryazevskaya Str.
- ³ Federal Scientific Agroengineering Centre VIM; 109428, Russian Federation, Moscow, 5^{1st} Institutskiy Proezd Str.

Author Contribution

V.M. Korneev – research supervision, conceptualization, formulation of general conclusions.
 D.I. Petrovskiy – formulation of general conclusions, literature review, data curation, processing of research results
 N.V. Korneev – processing of research results, writing – original draft preparation

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interest and are responsible for plagiarism

Received 11.04.2024; Revised 28.05.2024; Accepted 03.06.2024.

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.313

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-53-58>

Выбор задаваемых параметров для оценки соответствия восстановленных погружных электродвигателей требованиям на капитальный ремонт

В.А. Буторин¹, Л.А. Саплин², Р.Т. Гусейнов³

^{1,2,3} Южно-Уральский государственный аграрный университет; г. Троицк, Россия

¹ butorin_chgau@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5180-8742>

² lsaplin49@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-2045-2059>

³ ruslan-ural8@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-4784-4249>

Аннотация. Надежность является основной характеристикой работоспособности погружных электродвигателей после капитального ремонта. Для оценки соответствия показателей надежности восстановленных погружных электродвигателей техническим требованиям на капитальный ремонт наиболее приемлем метод стендовых контрольных испытаний на основе последовательного анализа отказов исследуемых электродвигателей. Для его реализации необходим выбор задаваемых параметров, что и являлось целью исследований. В работе, на основе использования технических требований на изготовление и ремонт погружных электродвигателей, были установлены задаваемые средние наработки на отказ новых электродвигателей до первого капитального ремонта и после него. В результате проведения стендовых испытаний изучалось две партии погружных электродвигателей: прошедших и капитальный ремонт и не бывших в капитальном ремонте. В каждой партии исследовалось по 20 электродвигателей. В результате эксперимента среднее квадратическое отклонение наработки на отказ новых электродвигателей составило 3,54 тыс. ч, после капитального ремонта – 2,37 тыс. ч. Коэффициенты вариации составляли 0,3 и 0,34 соответственно. Обоснованы значения задаваемых параметров математической модели, обеспечивающих возможность использования метода последовательного анализа отказов: задаваемая средняя наработка на отказ до первого капитального ремонта – 16 тыс. ч; задаваемая средняя наработка на отказ после капитального ремонта – 12,8 тыс. ч; риски производителя и заказчика ремонта – 0,05; задаваемое среднее квадратическое отклонение наработки на отказ электродвигателей до первого капитального ремонта – 4,8 тыс. ч; задаваемое среднее квадратическое отклонение наработки на отказ после капитального ремонта электродвигателей – 4,35 тыс. ч. Установленные параметры могут быть использованы при испытаниях на надежность широкого круга типоразмеров погружных электродвигателей.

Ключевые слова: надежность, контрольные испытания, метод последовательного анализа, задаваемые параметры, выбор задаваемых параметров, ремонт погружных электродвигателей, отказ после капитального ремонта

Для цитирования: Буторин В.А., Саплин Л.А., Гусейнов Р.Т. Выбор задаваемых параметров для оценки соответствия восстановленных погружных электродвигателей требованиям на капитальный ремонт // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26, № 5. С. 53-58. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-53-58>

ORIGINAL ARTICLE

Selection of preset parameters to assess the compliance of restored submersible electric motors with the overhaul requirements

V.A. Butorin¹, L.A. Saplin², R.T. Guseynov³

^{1,2,3} South Ural State Agrarian University, Troitsk, Russia

¹ butorin_chgau@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5180-8742>

² lsaplin49@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-2045-2059>

³ ruslan-ural8@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-4784-4249>

Abstract. The main characteristic of the performance of submersible electric motors after overhauls is their reliability. To assess the compliance of reliability indicators of restored submersible electric motors with

technical requirements for overhauls, various types of tests are used. The most acceptable of them is the bench test method based on a sequential failure analysis of the studied electric motors. To implement it, the specified parameters should be set. In this study, based on the use of technical requirements for the manufacture and repair of submersible electric motors, the authors determined the specified average operating times for failure of new electric motors (before the first overhaul) and after it. Bench tests were carried out for two batches of submersible electric motors: overhauled and non-overhauled. In each batch, 20 electric motors were studied. The experiment determined the standard deviation of the mean time between failures (MTBF) of new electric motors, which amounted to 3.54 thousand hours, after the overhaul – 2.37 thousand hours. The coefficients of variation were 0.3 and 0.34, respectively. The study results determined the values of the set parameters of the mathematical model, enabling the use of the method of successive failure analysis. The values included the set average MTBF before the first overhaul – 16 thousand hours; the set average MTBF after the overhaul – 12.8 thousand hours; the risks of the repair provider and the customer – 0.05; the set mean square deviation of the MTBF of electric motors before the first overhaul – 4.8 thousand hours; the set mean square deviation of the MTBF after the first overhaul – 4.8 thousand hours; the set mean square deviation of the MTBF after the overhaul – 2.37 thousand hours.

Keywords: reliability, control tests, sequential analysis method, set parameters, selection of set parameters, repair of submersible electric motors, failure after an overhaul

For citation: Butorin V.A., Saplin L.A., Guseynov R.T. Selection of preset parameters to assess the compliance of restored submersible electric motors with the overhaul requirements. *Agricultural Engineering (Moscow)*. (In Russ.). 2024;26(5):53-58. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-53-58>

Введение

Надежностью погружных электродвигателей в сельском хозяйстве в разные периоды занимались научные школы ФНАЦ ВИМ, ЮУрГАУ, КубГАУ, АЧИИ ДонГАУ и др. В одной из последних публикаций указывается, что средний срок службы погружных электродвигателей составляет 2,25 года¹. Исследования, проведенные в ФНАЦ ВИМ (ВИЭСХ), показывают, что срок службы электродвигателей после капитального ремонта в среднем в два раза меньше, чем у новых электродвигателей^{2,3}.

Основным показателем в соблюдении норм проведения капитального ремонта погружных электродвигателей является их надежность. Сведения о надежности можно получить на основании аналитических расчетов или экспериментальным путем [1, 2]. Аналитические расчеты показателей надежности применяются к отдельным узлам электродвигателей – например, к обмоткам, подшипниковым узлам, контактно-щеточным узлам, коллекторным узлам и т.д. Как показывает опыт, определение показателей надежности электродвигателей с использованием расчетных

методов приводит к большему разбросу полученных результатов вследствие применения множества допущений и экстраполяции. По этой причине данный метод для оценки соответствия требованиям на капитальный ремонт рассматриваться не будет.

Экспериментальные исследования широко используются при проведении определительных и контрольных испытаний надежности электродвигателей. Определительные и контрольные испытания могут быть эксплуатационными или стендовыми. Эксплуатационные испытания являются наиболее достоверными, однако значительный период их проведения может привести к ненужности полученных результатов. Стендовые испытания позволяют сократить сроки получения информации о надежности, поэтому они находят все большее применение для оценки работоспособности электродвигателей⁴ [2].

Определительные испытания применяют для оценки фактических показателей надежности. Обычно они проводятся при разработке новых объектов электрооборудования или после их коренной модернизации. По результатам таких испытаний находят законы распределения отказов, которые несут исчерпывающую оценку надежности объекта. Результаты этих испытаний могут служить также для оценки соответствия требованиям на капитальный ремонт рассматриваемого объекта.

Контрольные испытания служат для сравнительной оценки полученных данных о надежности объектов

¹ Кроневальд А.Ф., Оськин С.В. Особенности работы фильтровой защиты от обрыва фазы погружных электродвигателей в сельском хозяйстве: Монография. Краснодар: Издательство КубГАУ, 2010. 110 с.

² Система планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания электрооборудования с.-х. предприятий / Госагропром СССР. М.: ВО Агропромиздат, 1987. 191 с.

³ Сырых Н.Н., Кабдин Н.Е. Теоретические основы эксплуатации электрооборудования: учебное пособие. М.: Агробизнесцентр, 2007. 514 с.

⁴ Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 432 с.

электрооборудования с требованиями отраслевого стандарта, технического задания или технического условия. Результаты контрольных испытаний не предназначены для оценки закона распределения отказов исследуемых объектов. Объем контрольных испытаний, включая число исследуемых объектов и проведенных опытов, будет значительно меньшим по сравнению с определяющими испытаниями на надежность. Вследствие этого для оценки соответствия отремонтированных погружных электродвигателей требованиям на капитальный ремонт были выбраны контрольные испытания.

Цель исследований: обоснование задаваемых параметров теоретической модели проведения контрольных испытаний на соответствие надежности отремонтированных погружных электродвигателей техническим требованиям на капитальный ремонт.

Материалы и методы

Применены теория эксплуатации электронасосного оборудования, метод математической статистики и теории вероятностей, методы последовательного анализа и испытаний на надежность.

Оценка соответствия надежности объектов установленным нормативно-техническим требованиям проводилась с использованием контрольных испытаний с применением метода последовательного анализа⁵, который доказал свою эффективность при испытаниях на надежность погружных электродвигателей⁶ [3]. При использовании данного метода число опытов (отказов) не выбирается. После проведения некоторого числа испытаний отремонтированных электродвигателей делается один из трех возможных выводов: отремонтированные электродвигатели соответствуют требованиям на капитальный ремонт, не соответствуют, испытания следует продолжать.

На основе предложенного Вальдом метода последовательного анализа решение принимается на основе критерия отношения правдоподобия L ⁷ [4].

При несоответствии отремонтированных погружных электродвигателей техническим требованиям

$$L \geq \ln \frac{1-\beta}{\alpha}, \quad (1)$$

при соответствии –

$$L \leq \ln \frac{\beta}{1-\alpha}. \quad (2)$$

⁵ Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 432 с

⁶ Вальд А. Последовательный анализ. М.: Физматлит, 1960. 256 с.

⁷ Там же.

Испытания должны быть продолжены, если

$$\ln \frac{\beta}{1-\alpha} < L < \ln \frac{1-\beta}{\alpha}, \quad (3)$$

где L – критерий отношения правдоподобия; β – риск заказчика ремонта; α – риск производителя ремонта; $1 - \alpha$ – вероятность выпуска после капитального ремонта партии электродвигателей, соответствующих требованиям на этот ремонт; $1 - \beta$ – вероятность отбраковки партии отремонтированных электродвигателей, не соответствующей требованиям на капитальный ремонт⁸.

Изучалось две партии погружных электродвигателей: прошедших капитальный ремонт и не бывших в капитальном ремонте. В каждой партии было по 20 электродвигателей.

Результаты и их обсуждение

Согласно требованиям на капитальный ремонт погружных электродвигателей качество их восстановления оценивается надежностью, показателем которой является наработка на отказ. Это наработка должна составлять не ниже 80% наработки нового погружного электродвигателя⁹. Нарботка на отказ зависит от многих факторов, вследствие чего предполагается выполнение предельной теоремы А.М. Ляпунова. Для стареющих объектов принимается нормальный закон распределения отказов¹⁰ [5]. В наших исследованиях подтвердим правильность выбора этого закона.

После соответствующих преобразований значение L находится из выражения [3, 4]:

$$L = n \cdot \ln \frac{\sigma_{\alpha}}{\sigma_{\beta}} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{(T_i - T_{\alpha})^2}{\sigma_{\alpha}^2} - \frac{(T_i - T_{\beta})^2}{\sigma_{\beta}^2} \right), \quad (4)$$

где n – число испытаний (опытов), необходимых для принятия вывода о соответствии или несоответствии отремонтированных электродвигателей требованиям на капитальный ремонт; σ_{α} – задаваемое среднее квадратическое отклонение наработки на отказ электродвигателей до первого капитального ремонта; σ_{β} – задаваемое среднее квадратическое отклонение наработки на отказ электродвигателей после капитального ремонта; T_i – наработка до отказа i -го испытываемого электродвигателя; T_{α} – задаваемая средняя наработка на отказ до первого капитального ремонта; T_{β} – задаваемая средняя наработка на отказ после капитального ремонта.

⁸ ГОСТ 30195-94. Электродвигатели асинхронные погружные. Общие технические условия. М.: Издательство стандартов, 1996.

⁹ ТК 70.0009.001-84. Электродвигатели трехфазные асинхронные короткозамкнутые водозаполненные погружные. Технические требования на капитальный ремонт. М.: ГосНИТИ, 1985. 80 с.

¹⁰ Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник для ВТУЗ. М.: Высшая школа, 2001. 575 с.

Значение средней наработки на отказ $T_a = 16$ тыс. ч для партии новых (до первого капитального ремонта) испытываемых погружных электродвигателей ПЭДВ 1,1-95 установлено заводом-изготовителем¹¹. Значение средней наработки на отказ погружных электродвигателей после капитального ремонта $T_b = 12,8$ тыс. ч было взято из нормативно-технической документации¹². Назначенные значения риска заказчика $\alpha = 0,05$ и исполнителя ремонта $\beta = 0,05$ были взяты исходя из накопленного опыта решения подобных задач [1]. Данные значения риска являются достаточными и не приводящими к чрезмерным издержкам на испытания¹³.

Назначенные средние квадратические отклонения σ_a и σ_b от назначенных средних наработок на отказ T_a и T_b для погружных электродвигателей в литературе отсутствуют. Значения σ_a и σ_b были установлены на основании данных об отказах двух партий погружных электродвигателей. Для этих партий определялись также коэффициенты вариации v_n и v_p наработки на отказ. Рассматриваемые партии погружных электродвигателей ПЭДВ 1,1-95 электронасоса ЭЦВ 4-1,5, служащих для водоснабжения животноводческих ферм малых фермерских хозяйств, эксплуатировались на территории Красноармейского района Челябинской области. Состав воды по данному району представлен территориальным фондом геологической информации по Уральскому федеральному округу. Данный состав приведен в работе [6] (табл.).

Данные об отказах обеих партий электродвигателей были взяты на основе проведения ремонтных работ сервисной организации по обслуживанию водонасосного электрооборудования.

При выборе закона распределения отказов в качестве меры согласованности между теоретическим и статистическим распределением служил критерий χ^2 Пирсона¹⁴. Для этого на основе экспериментальных данных рассчитывалось значение $\chi^2_{наб}$. Исходя из табличных значений для выбранного уровня значимости (обычно для подобных задач равный 0,05) и числа степеней свободы выбирают

критическое значение $\chi^2_{таб}$. В случае $\chi^2_{наб} < \chi^2_{таб}$ различие экспериментального и теоретического распределения является незначимым.

Установлено, что наработка на отказ не бывавших ранее в капитальном ремонте электродвигателей распределена по нормальному закону:

$$f(t) = 0,112e^{-\frac{(t-11,8)^2}{25,18}} \quad (5)$$

Статистические характеристики представленного распределения и значения χ^2 Пирсона следующие:

$$T_{cp} = 11,8 \text{ тыс. ч; } \sigma_T = 3,54 \text{ тыс. ч;}$$

$$v_n = 3,54 / 11,8 = 0,3; \chi^2_{таб}(0,05; 2) = 5,99; \chi^2_{наб} = 1,309.$$

Гистограмма и плотность теоретического распределения наработки на отказ впервые прибывших в капитальный ремонт погружных электродвигателей приведены на рисунке 1.

Плотность распределения наработки на отказ бывших ранее в капитальном ремонте погружных электродвигателей также распределена по нормальному закону:

$$f(t) = 0,168e^{-\frac{(t-6,8)^2}{11,28}} \quad (6)$$

Статистические характеристики представленного распределения и значения χ^2 Пирсона:

$$T_{cp} = 6,8 \text{ тыс.ч; } \sigma_T = 2,37 \text{ тыс.ч;}$$

$$v_n = 2,37 / 6,8 = 0,34. \chi^2_{таб} = 7,8; \chi^2_{наб} = 0,5.$$

Гистограмма и плотность теоретического распределения наработки на отказ бывших ранее в капитальном ремонте погружных электродвигателей приведены на рисунке 2.

Таблица
Средние значения параметров состава скважинной воды
Красноармейского района Челябинской области

Average values of the parameters of the wellbore
water composition in the Krasnoarmeyskiy district
of the Chelyabinsk region

Table

| Показатель скважинной воды <i>Factors in borehole water</i> | Среднее значение <i>Mean value</i> |
|--|---------------------------------------|
| Содержание песка, мг/дм ³ <i>Sand content, mg/dm³</i> | 67,7 |
| Жесткость, мг-экв/дм ³ <i>Hardness, mg-eq/dm³</i> | 3,42 |
| Окисляемость, мг/дм ³ <i>Oxidizability, mg/dm³</i> | 3,03 |
| Наличие ионов хлора, мг/дм ³ <i>Presence of chlorine ions, mg/dm³</i> | 248,5 |

¹¹ ГОСТ 30195-94. Электродвигатели асинхронные погружные. Общие технические условия. М.: Издательство стандартов, 1996.

¹² ТК 70.0009.001-84. Электродвигатели трехфазные асинхронные короткозамкнутые водозаполненные погружные. Технические требования на капитальный ремонт. М.: ГосНИТИ, 1985. 80 с.

¹³ Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 432 с.

¹⁴ Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник для ВТУЗ. М.: Высшая школа, 2001. 575 с.

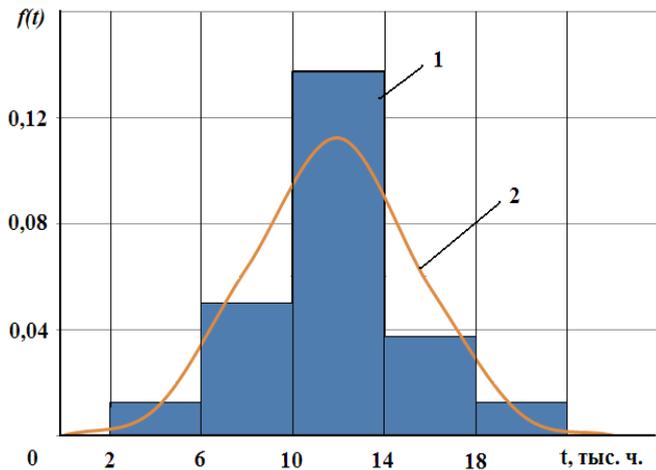


Рис. 1. Гистограмма наработки на отказ (1) впервые направленных на капитальный ремонт погружных электродвигателей и теоретическое распределение (2)

Fig. 1. MTBF histogram (1) of submersible electric motors subject to an overhaul for the first time and theoretical distribution (2)

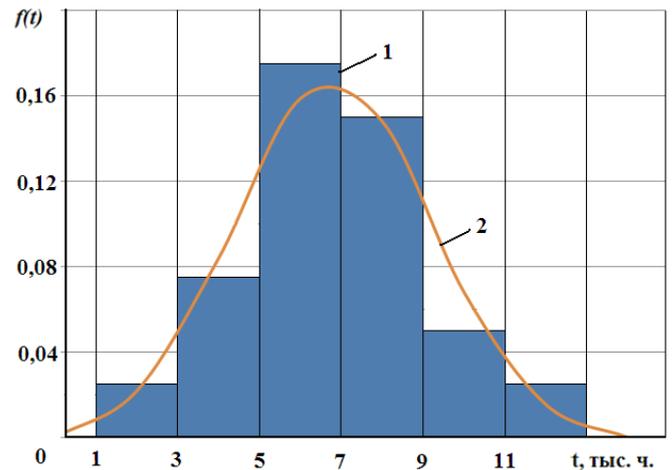


Рис. 2. Теоретическое распределение (1) и гистограмма наработки на отказ бывших ранее в капитальном ремонте погружных электродвигателей (2)

Fig. 2. Theoretical distribution (1) and an MTBF histogram of previously overhauled submersible electric motors (2)

Полученные гистограммы и теоретические распределения позволили установить задаваемые значения среднего квадратического отклонения наработки на отказ σ_α и σ_β :

$$\sigma_\alpha = v_n T_\alpha = 4,8 \text{ тыс. ч.};$$

$$\sigma_\beta = v_k T_\beta = 4,35 \text{ тыс. ч.}$$

Проведенные исследования позволили установить задаваемые параметры, открывающие возможность реализации метода оценки соответствия отремонтированных погружных электродвигателей установленным нормам на капитальный ремонт.

Установленные в исследованиях задаваемые параметры позволили реализовать математическую модель оценки качества ремонта погружных электродвигателей ПЭДВ 1,1-95 на предприятии ООО НПП «Гидромашсервис» г. Челябинска. При этом качество ремонта было установлено путем ускоренных испытаний последовательно, друг за другом, 6 погружных электродвигателей [7].

Выводы

1. Для оценки соответствия надежности восстановленных погружных электродвигателей техническим требованиям на капитальный ремонт

целесообразно использовать стендовые контрольные испытания на основе предложенного Вальдом метода последовательного анализа отказов испытываемых электродвигателей.

2. На основе нормативно-технической документации, накопленного опыта, и экспериментальных исследований обоснованы значения задаваемых параметров математической модели, обеспечивающих возможность использования предложенного метода последовательного анализа отказов для оценки соответствия надежности отремонтированных погружных электродвигателей требованиям на капитальный ремонт: задаваемая средняя наработка на отказ до первого капитального ремонта – 16 тыс. ч; задаваемая средняя наработка на отказ после капитального ремонта – 12,8 тыс. ч; риск производителя ремонта – 0,05; риск заказчика ремонта – 0,05; задаваемое среднее квадратическое отклонение наработки на отказ электродвигателей до первого капитального ремонта – 4,8 тыс. ч; задаваемое среднее квадратическое отклонение наработки на отказ электродвигателей после капитального ремонта – 4,35 тыс. ч.

Установленные параметры могут быть использованы для испытания на надежность широкого круга типоразмеров погружных электродвигателей.

Список источников

1. Кузнецов Н.Л., Котеленец Н.Ф. Надежность электрических машин и планирование эксперимента // *Электричество*. 2007. № 10. С. 42-44. EDN: KUZYZV
2. Буторин В.А., Молчан А.М. Системный подход к проблеме надежности восстановления погружных электродвигателей // *Вестник Курганской ГСХА*. 2020. № 2 (34). С. 53-57. EDN: AXVCSF
3. Саплин Л.А., Буторин В.А., Молчан А.М. Модель долговечности обмоток погружных электродвигателей // *АПК России*. 2022. Т. 29, № 1. С. 66-69. EDN: YFRQLY
4. Буторин В.А., Саплин Л.А., Молчан А.М. Математическая модель контрольных испытаний на надежность отремонтированных погружных электродвигателей // *АПК России*. 2021. Т. 28, № 2. С. 193-199. EDN: CLPRLW
5. Фефелова С.В., Туктаров М.Ф. Ускоренные испытания на надежность зерноочистительной машины // *Уральский научный вестник*. 2022. Т. 8, № 4. С. 100-106. EDN: OYATLK
6. Буторин В.А., Гусейнов Р.Т. Основные факторы, влияющие на ресурс подшипниковых узлов погружных электродвигателей // *Достижение науки – агропромышленному производству: Материалы ЛП Международной научно-технической конференции*. Челябинск: Челябинская государственная агроинженерная академия, 2014. Ч. 3. С. 241-246. EDN: SWSYXJ
7. Молчан А.М. Результаты контрольных испытаний на надежность капитально отремонтированных погружных электродвигателей // *Наука и инновации – современные концепции: Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума*. Уфа: Инфинити, 2021. С. 142-146. EDN: THUNMX

Информация об авторах

Владимир Андреевич Буторин¹, д-р техн. наук, профессор; butorin_chgau@list.ru²; <https://orcid.org/0000-0002-5180-8742>
Леонид Алексеевич Саплин², д-р техн. наук, профессор; lsaplin49@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-2045-2059>
Руслан Тофикович Гусейнов³, канд. техн. наук, доцент; ruslan-ural8@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-4784-4249>
^{1,2,3} Южно-Уральский государственный аграрный университет; 457103, Челябинская область, г. Троицк, ул. им. Ю.А. Гагарина, 13

Вклад авторов

В.А. Буторин – научное руководство и постановка цели исследований;
 Л.А. Саплин – руководство теоретическими исследованиями и обработка экспериментальных данных;
 Р.Т. Гусейнов – сбор статистического материала о надежности погружных электродвигателей.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила в редакцию 25.03.2024; поступила после рецензирования и доработки 30.05.2024; принята к публикации 03.06.2024

References

1. Kuznetsov N.L., Kotelenets N.F. Reliability of electric machines and experiment planning. *Elektrichestvo*. 2007;10:42-44. (In Russ.)
2. Butorin V.A., Molchan A.M. Systematic approach to the reliability problem of submersible electric motor rehabilitation. *Vestnik Kurganskoy GSKhA*. 2020;2(34):53-57. (In Russ.)
3. Saplin L.A., Butorin V.A., Molchan A.M. Winding durability model for submersible motors. *APK Rossii*. 2022;29;1:66-69. (In Russ.)
4. Butorin V.A., Saplin L.A., Molchan A.M. The mathematical model of control tests for the reliability of repaired submersible electric motors. *APK Rossii*. 2021;28;2:193-199. (In Russ.)
5. Fefelova S.V., Tuktarov M.F. Accelerated reliability tests of a grain cleaning machine. *Ural'skiy Nauchniy Vestnik*. 2022;8;4:100-106. (In Russ.)
6. Butorin V.A., Guseynov R.T. Main factors affecting the life of bearing assemblies of submersible electric motors. *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Dostizhenie Nauki – Agropromyshlennimu Proizvodstvu"*, Chelyabinsk, 2014;3:241-246. (In Russ.)
7. Molchan A.M. Results of control tests for reliability of overhauled submersible electric motors. In: *Nauka i Innovatsii – Sovremennyye Kontseptsii. Proceedings of the International Scientific Forum*. Moscow, 2021. (In Russ.)

Author Information

Vladimir A. Butorin¹, DSc (Eng), Professor; butorin_chgau@list.ru²; <https://orcid.org/0000-0002-5180-8742>
Leonid A. Saplin², DSc (Eng), Professor; lsaplin49@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-2045-2059>
Ruslan T. Guseynov³, CSc (Eng), Associate Professor; ruslan-ural8@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-4784-4249>
^{1,2,3} South-Ural State Agrarian University, 457103, Chelyabinsk Region, Troitsk, ul. Yu.A. Gagarina, 13

Author Contributions

V.A. Butorin – research supervision, conceptualization;
 L.A. Saplin – theoretical research supervision, experimental data curation;
 R.T. Guseynov – statistics curation.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests and are responsible for plagiarism

Received 25.03.2024; Revised 30.05.2024; Accepted 03.06.2024.

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 681.518

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-59-65>

Применение ультрафиолета для предпосевной обработкой семян

Н.П. Кондратьева^{1✉}, *В.Ф. Сторчевой*², *Р.Г. Большин*³¹ Удмуртский государственный аграрный университет; г. Ижевск, Россия² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); г. Москва, Россия³ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ aep_isha@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1784-3560>² v.storchevoy@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>³ bolshin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5268-0464>

Аннотация. Современные методы предпосевной обработки семян позволяют обеззараживать семена, повышать урожайность и устойчивость растений к неблагоприятным факторам внешней среды, стимулировать иммунитет растений. Среди методов электромагнитного воздействия на биообъекты облучение семян ультрафиолетом отличается простотой, энергетическим и экономическим преимуществом и экологической безопасностью. Целью исследований является изучение воздействия ультрафиолетового излучения для предпосевной обработки семян туи и эмпирическое определение эффективной дозы УФ-облучения. Для поддержания необходимой дозы УФ-облучения нами разработана цифровая система управления на микроконтроллере ATMEGA128A (ATMEL). Рабочая площадь УФ-матрицы 12 × 12, состоящей из 200 УФ-светодиодов, составила 144 см². Расстояние от УФ-светодиодов до облучаемых семян составляет около 2 см. Контроль дозы УФ-излучения матрицы осуществляется путем контроля падения напряжения на фоторезисторах NSL-19M51. Излучение светодиодов в зоне УФ-А (UV-A) соответствовало 98%. В каждой серии облучалось 100 семян туи западной, повторность опытов – четырехкратная. Исследовались дозы УФ-облучения 2, 3 и 4 кДж/м². В качестве контроля использовались семена туи западной без УФ-облучения. Эмпирически определена эффективная доза УФ-облучения семян. Установленная доза УФ-облучения 2 кДж/м² способна повысить энергию прорастания семян на 12,8% по сравнению с контролем. Статистическая обработка эмпирических данных показала удовлетворительную точность проведенных экспериментов. Показатель точности опыта составил $P = 1,76\% \pm 0,65\%$, для контроля (без УФ-облучения) – $P = 1,33 \pm 0,47\%$.

Ключевые слова: обработка семян, ультрафиолет, облучение семян ультрафиолетом, семена туи западной, система управления, эффективная доза УФ-облучения

Для цитирования: Кондратьева Н.П., Сторчевой В.Ф., Большин Р.Г. Применение ультрафиолета для предпосевной обработкой семян // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26, № 5. С. 59-65. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-59-65>

ORIGINAL ARTICLE

Use of ultraviolet for pre-sowing seed treatment

N.P. Kondrateva^{1✉}, *V.F. Storchevoy*², *R.G. Bolshin*³¹ Udmurt State Agrarian University; Izhevsk, Russia² Moscow Aviation Institute (National Research University); Moscow, Russia³ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ aep_isha@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1784-3560>² v.storchevoy@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>³ bolshin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5268-0464>

Abstract. Modern methods of pre-sowing seed treatment disinfect seeds, increase yield and plant resistance to adverse environmental factors, and stimulate plant immunity. Among the methods of electromagnetic impact on bioobjects, irradiation of seeds with ultraviolet light is simple, energy-efficient, economically beneficial and environmentally safe. The research aimed to study the effect of UV irradiation for pre-sowing treatment of thuja seeds and empirically determine the effective dose of UV irradiation. To maintain the required UV irradiation dose, the authors developed a digital control system on ATMEGA128A microcontroller (ATMEL). The working area of a 12 × 12 UV matrix consisting of 200 UV LEDs was 144 cm². The distance from the UV LEDs to the irradiated seeds was about 2 cm. The UV dose of the matrix was controlled by monitoring the voltage drop on the NSL-19M51 photoresistors.

The irradiance of the LEDs in the UV-A (UV-A) zone corresponded to 98%. In each series, 100 seeds of *Thuja occidentalis* were irradiated; the experiments were repeated four times. The authors studied UV irradiation doses of 2 kJ/m², 3 kJ/m², and 4 kJ/m². Seeds of *Thuja occidentalis* without UV irradiation treatment were used as a control. The effective dose of UV-irradiation of seeds was determined empirically. The determined UV irradiation dose of 2 kJ/m² is able to increase seed germination energy by 12.8% as compared to the control. Statistical processing of empirical data showed satisfactory accuracy of the conducted experiments. The accuracy index of the experiment amounted to $P=1.76\pm 0.65\%$, for the control (without UV irradiation) – $P=1.33\pm 0.47\%$.

Keywords: seed treatment, ultraviolet, UV irradiation of seeds, seeds of *Thuja occidentalis*, control system, effective dose of UV irradiation

For citation: Kondrateva N.P., Storchevoy V.F., Bolshin R.G. Use of ultraviolet for pre-sowing seed treatment. *Agricultural Engineering (Moscow)*. (In Russ.). 2024;26(5): 59-65. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-59-65>.

Введение

Реализация высокопродуктивного и устойчивого к изменениям природной среды сельского хозяйства является приоритетным направлением научно-технологического развития страны [1-4]. Поэтому значительное внимание уделяется современным методам предпосевной обработки семян, которые обеззараживают их, повышают урожайность, иммунитет и устойчивость растений к неблагоприятным факторам внешней среды [5, 6]. Метод предпосевной обработки семян должен быть простым, экологически безопасным и экономически обоснованным [7, 8]. На прорастание семян влияет вид предпосевной обработки. Условно операции предпосевной стимуляции семян подразделяются на физические [9], биологические [10-12] и химические [13].

Физические операции включают в себя ряд методов: физико-механические (барботирование, ультразвуковая обработка семян в воде, скарификация); термические (стратификация, обработка семян паром и воздействие переменными температурами); радиационные (ионизирующее излучение); электрофизические (обработка семян постоянным электрическим током, полем коронного разряда, электромагнитными полями низких, средних и высоких частот, электромагнитной энергией инфракрасного и ультрафиолетового спектров, электромагнитными полями сверхвысокой частоты^{1,2} [14]); фотоэнергетические (обработка семян концентрированным светом, импульсным концентрированным солнечным светом, импульсным высокочастотным электрическим светом и лазером [15-17]); магнитные (обработка постоянным магнитным полем [18, 19]).

Академик Л.Г. Прищеп, проанализировав существующие методы электромагнитного воздействия на биологические объекты, предложил из всех перечисленных

методов использовать облучение семян ультрафиолетом ввиду простоты, энергоэкономичности, экономической выгоды и экологической безопасности способа³.

Аналогичные результаты получены другими учеными, которые отмечают, что обработка семян сельскохозяйственных растений ультрафиолетовым излучением (УФИ) увеличивает энергию прорастания и всхожесть, повышает урожайность, сокращает расход семян и поэтому является перспективным методом обработки семян перед посевом [21].

Излучение в диапазоне 315...380 нм (УФ-А) стимулирует фотохимические процессы в семенах, не вызывая мутационных изменений [22-24], а также синтезирует активные формы кислорода⁴ [20, 25].

Излучение зоны УФ-А повышает всхожесть только у семян пониженного класса качества, дающих в основном проростки с морфологическими дефектами. Под влиянием эффективных доз ультрафиолета возрастает количество стимулированных семян⁵.

Проведенные исследования показали, что операция предпосевной стимуляции семян ультрафиолетом – это экологически чистый и энергоэффективный метод перевода семян из низкого третьего класса качества в более высокий – второй [23, 24, 26].

Предпосевная стимуляция семян хвойных культур ультрафиолетом является актуальной в связи с высокой потребностью в этих растениях. Хвойные культуры задерживают пыль в 30 раз больше, чем осина, в 12 раз больше, чем береза, и выделяют фитонциды в 2 раза больше, чем лиственные породы [8]. Вечнозеленая туя является одним из самых зимостойких и неприхотливых деревьев и обладает высокой дымо- и газоустойчивостью [15, 20, 23]. Она размножается мелкими семенами (рис. 1).

¹Бывальцев А.В., Кондратьева Н.П., Украинцев В.С. Влияние УФ-облучения на повышение посевных качеств семян. Методика и технология: Монография. Сабрюкен, 2012, 60 с.; Дубров А.П. Действие ультрафиолетовой радиации на растения: Учебник. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 124 с.

²Прищеп Л.Г. Эффективная электрификация защищенного грунта. М.: Колос, 1980. 208 с.

³Там же.

⁴Бывальцев А.В., Кондратьева Н.П., Украинцев В.С. Влияние УФ-облучения на повышение посевных качеств семян. Методика и технология: Монография. Сабрюкен, 2012. 60 с.

⁵Прищеп Л.Г. Эффективная электрификация защищенного грунта. М.: Колос, 1980. 208 с.



Рис. 1. Зеленые кусты туи западной ранней весной (а), молодые шишки (б) и семена туи западной (в)
Fig. 1. Green bushes of thuja occidentalis in early spring (a), young cones (b) and seeds of thuja occidentalis (c)

Для получения дружных всходов семян хвойных культур необходимо определить эффективную дозу их УФ-облучения и обеспечить ее автоматическую поддержку посредством цифровой системы управления.

Цель исследований: изучить воздействие ультрафиолетового излучения для предпосевной обработки семян туи и эмпирически определить эффективную дозу УФ-облучения.

Материалы и методы

Ультрафиолетовая светодиодная (УФ LED) облучательная установка имеет рабочую площадь

$12 \times 12 = 144 \text{ см}^2$. Расстояние от УФ-светодиодов до облучаемых семян составляет 2 см. Количество УФ-светодиодов – 200 (рис. 2а). Мощность УФ-излучения по зонам УФ-А, УФ-В, УФ-С измерялась прибором ТКА «Радиометр» (рис. 2б). Излучение светодиодов в зоне УФ-А (UV-A) составляет примерно 98% (табл.).

Исследовалось влияние ультрафиолета на семена туи западной дозой 2, 3 и 4 кДж/м². В качестве контроля использовались семена без УФ-облучения.

Статистическая обработка полученного эмпирического материала произведена по методике биометрических расчетов профессора Г.Н. Зайцева⁶.

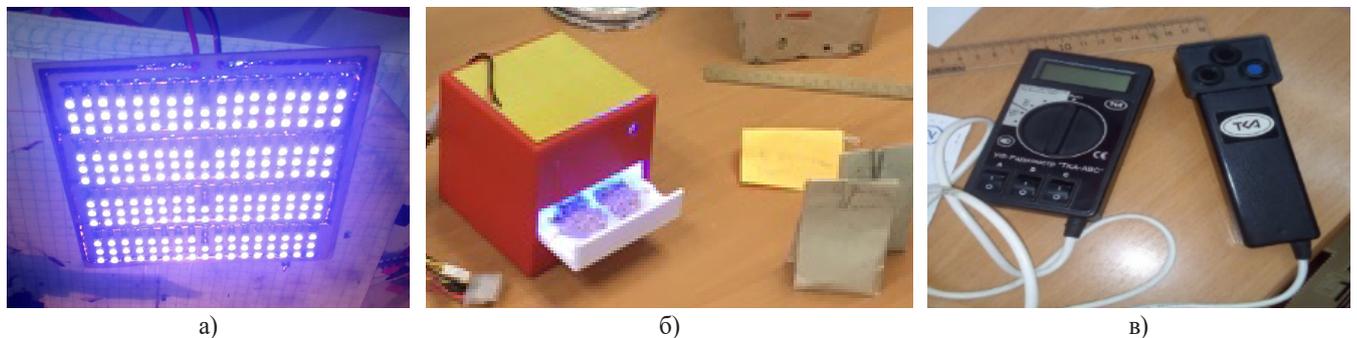


Рис. 2. УФ-светодиодная матрица (а), стационарная компактная УФ-облучательная установка (б) и прибор ТКА «Радиометр» для измерения УФ-излучения в зонах UV-A, UV-B, UV-C (в)
Fig. 2. Photo of a UV LED matrix (a) of a stationary compact UV irradiation installation (b) and a TKA “Radiometer” device for measuring UV irradiation in the UV-A, UV-B, UV-C zones (c)

Мощность излучения по зонам

Таблица

Irradiation power by zone

Table

| УФ-излучение <i>UV irradiation</i> | Спектральный диапазон, нм <i>Spectral range, nm</i> | Мощность излучения / <i>Irradiation power</i> | |
|---------------------------------------|--|---|--------|
| | | Вт/м ² | % |
| УФ-А / <i>UV-A</i> | 315...400 | 3,5 | 97,57 |
| УФ-В / <i>UV-B</i> | 280...315 | 0,0875 | 2,43 |
| УФ-С / <i>UV-C</i> | 200...280 | 0,013 | 0,0036 |

⁶Зайцев Г.Н. Методика биометрических расчетов. М., 1993. 255 с.

Результаты и их обсуждение

Для применения и изучения воздействия ультрафиолета при обработке семян перед посевом нами была разработана установка. Доза УФ-облучения поддерживалась цифровой системой управления на микроконтроллере ATMEGA128A фирмы ATMEL, который имеет в своем составе аналого-цифровой преобразователь (АЦП), что позволяет преобразовывать сигналы непосредственно в микросхеме, тем самым упрощая электрическую схему и сокращая энергопотребление устройства в целом. В микроконтроллере присутствуют оперативная память, энергонезависимая память, центральный процессор и порты для ввода и вывода логической информации. Для синхронизации и стабильной работы применяется SMD-кварц фирмы JAUCH на 8.192 МГц. Для ликвидации рисков сбоя программы при кратковременном отсутствии напряжения питания используется супервизор, в котором применяется микросхема MAX6916 фирмы MAXIM. Эта микросхема контролирует уровень напряжения. При напряжении меньше 2,7 В подается команда на сброс цифрового микроконтроллера. Для отсчета интервалов времени в микросхеме реализованы часы реального времени, которые синхронизированы с часовым кварцем с частотой 32,768 кГц. При помощи микросхемы – высокоскоростного приемопередатчика RS-232 ADM202 фирмы ANALOG DEVICES – происходит обмен информацией. Цифровая часть устройства запитывается от постоянного напряжения +5 В, которое подается от конвертера P6AU-1205 фирмы PEAK

ELECTRONICS. Контроль дозы УФ-излучения осуществляется косвенным способом – путем контроля падения напряжения на фоторезисторах NSL-19M51 фирмы ADVANCED PHOTONIX, включенных в резистивный делитель.

Разработанная установка для предпосевной обработки семян ультрафиолетом позволяет реализовать простую, энергоэкономичную, экологически чистую, электробезопасную и перспективную операцию предпосевной стимуляции семян ультрафиолетовым излучением [21].

Эксперименты проводились на семенах туи западной. В каждом опыте облучалось по 100 семян. Облучение семян ультрафиолетом осуществлялось при дозах 2, 3 и 4 кДж/м². Повторность опытов – четырехкратная. Получение первичной информации о всхожести и энергии роста осуществлялось в соответствии с ГОСТ 13056.6-97 «Семена деревьев и кустарников. Метод определения всхожести». Эмпирические данные по всхожести семян туи западной после УФ-облучения разными дозами приведены на рисунке 3.

Из данных рисунка 3 следует, что энергия прорастания у семян туи западной после обработки УФ-излучением дозой 2 кДж/м² выше по сравнению с контролем на 12,8%. Это способствует более быстрому прорастанию семян, получению из них более ранних и полноценных всходов.

Показатель точности опыта при дозе УФ-облучения 2 кДж/м² составил $P = 1,76\%$ при ошибке $m_p = 0,65\%$, для контроля, то есть режима без УФ-облучения семян, $P = 1,33 \pm 0,47\%$ соответственно, что говорит об удовлетворительной точности опытов.

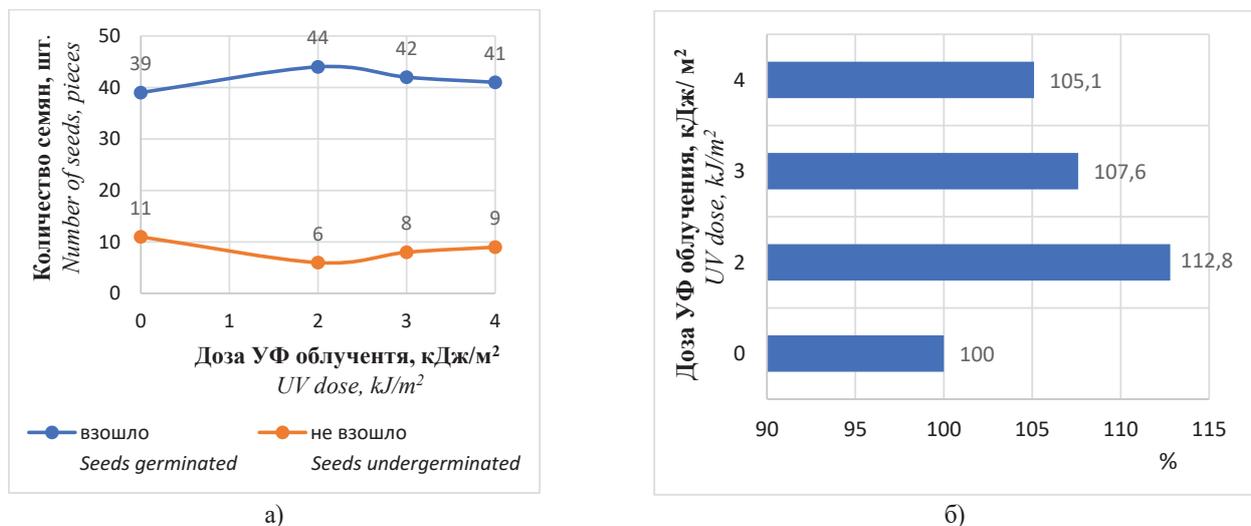


Рис. 3. Эмпирические данные всхожести семян туи западной от дозы УФ-облучения (а) и превышение всхожести относительно контроля (б)

Fig. 3. Empirical data on the germination of thuja occidentalis seeds depending on the dose of UV irradiation (a) and excess germination relative to control (b)

Выводы

1. Для применения и изучения воздействия ультрафиолета при обработке семян перед посевом нами была разработана установка. Для поддержания необходимой дозы УФ-облучения разработана цифровая система управления на микроконтроллере ATMEGA128A фирмы ATMEL. Контроль дозы, осуществляемый фоторезисторами NSL-19M51 фирмы ADVANCED PHOTONIX, включенными в резистивный делитель, позволяет косвенным способом по контролю падения напряжения на фоторезисторе определять поток излучения УФ-матрицы.

Список источников

1. Старцева А.В., Акманаев Э.Д. Урожайность озимой тритикале сорта Цекад 90 при использовании биопрепаратов в Среднем Предуралье // Агротехнологии XXI века: стратегия развития, технологии и инновации: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной десятилетию науки и технологий в Российской Федерации. Пермь, 2023. С. 29-33. EDN: SCDDXX
2. Русских Ю.В. Урожайность зерна яровой пшеницы Йолдыз при предпосевной обработке семян хелатными микроудобрениями // Научные труды студентов Ижевской ГСХА: Сборник статей. Ижевск, 2023. Т. 1. С. 99-103. EDN: ROCAKI
3. Серебrenникова Ю.О. Влияние совместного применения гербицидов и биопрепаратов на продуктивность среднеспелых сортов сои // Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Благовещенск, 2023. Т. 1. С. 127-132. EDN: LMGWGE
4. Singh B.N., Kapoor C.P., Choudhari R.S. Growth studies in relation to ultraviolet radiation. *Botanical Gazette*. 1936;97(3):649-665. <http://www.jstor.org/stable/2471714>.
5. Колесникова В.Г., Меньшикова Л.Н. Предпосевная обработка семян овса Яков биопрепаратами // Инновационные решения стратегических задач агропромышленного комплекса: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию Удмуртского ГАУ. Ижевск: Удмуртский государственный аграрный университет, 2023. Т. 1. С. 71-75. EDN: OEPDSC
6. Верховцева Н.В., Кубарев Е.Н., Балашов Г.Р., Роберт А.Э. Влияние предпосевной обработки семян яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) органическими кислотами природного происхождения в разреженной среде на рост и развитие растений // Агрехимия. 2023. № 4. С. 51-61. <https://doi.org/10.31857/S0002188123040142>
7. Игнатенко А.А., Батова Ю.В., Холопцева Е.С., Казнина Н.М. Влияние предпосевной обработки семян салициловой кислотой на рост и фотосинтетический аппарат ячменя при разном содержании цинка в субстрате // Физиология растений. 2023. Т. 70, № 3. С. 251-258. <https://doi.org/10.31857/S001533032370001X>
8. Кондратьева Н.П., Шогенов Ю.Х., Зиганшин Б.Г., Ахатов Р.З. Использование цифровых технологий для эффективного управления электро-технологическими облучательными установками // Техника и оборудование для села. 2022. № 4 (298). С. 40-43. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-4-40-43>
9. Björn L.O., Janet F. Proceeding of the International Workshop on the «Effects ultraviolet radiation on Plant», organized

2. Эмпирические данные показали, что энергия прорастания семян туй западной после обработки УФ излучением дозой 2 кДж/м² выше на 12,8%, чем в контроле. Это способствует более быстрому прорастанию семян и получению из них ранних и полноценных всходов.

3. Статистическая обработка эмпирических данных показала удовлетворительную точность проведенных экспериментов. Показатель точности опыта полученных экспериментальных данных при дозе УФ-облучения 2 кДж/м² составил $P = 1,76\%$ при ошибке $m_p = 0,65\%$, для контроля (УФ-облучения семян) $P = 1,33 \pm 0,47\%$.

References

1. Startseva A.V., Akmanaev E.D. Productivity of winter triticale variety Tsekad 90 using biological products in the Middle Urals. *Agricultural technologies of the 21st century: development strategy, technologies and innovations. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the Decade of Science and Technology in the Russian Federation*. Perm, 2023. pp. 29-33. (In Russ.)
2. Russkikh Yu.V. Grain yield of spring wheat during pre-sowing treatment of seeds with chelated microfertilizers. *Nauchnye trudy studentov Izhevskoy GSKHA = Scientific works of students of the Izhevsk State Agricultural Academy. Digest of articles*. Izhevsk. 2023;1:99-103. (In Russ.)
3. Serebrennikova Yu.O. The effect of the combined use of herbicides and biological products on the productivity of medium-ripened soybean varieties. *Agropromyshlenniy Kompleks: Problemy i Perspektivy Razvitiya. Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference*. Blagoveshchensk. 2023;1:127-132. (In Russ.)
4. Singh B.N., Kapoor C.P., Choudhari R.S. Growth studies in relation to ultraviolet radiation. *Botanical Gazette*. 1936;97(3):649-665. <http://www.jstor.org/stable/2471714>
5. Kolesnikova V.G., Menshikova L.N. Pre-sowing treatment of Yakov oat seeds with biological preparations. *Innovatsionnyye resheniya strategicheskikh zadach agropromyshlennogo kompleksa. Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 80th anniversary of the Udmurt State Agrarian University. In 3 volumes*. Izhevsk, 2023;1:71-75. (In Russ.)
6. Verkhovtseva N.V., Kubarev E.N., Balashov G.R., Robert A.E. Effect of pre-sowing treatment of spring wheat seeds (*triticum aestivum* l.) with organic acids of natural origin in a rarefied environment on plant growth and development. *Agrochemistry*. 2023;4:51-61. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0002188123040142>
7. Ignatenko A.A., Batova Yu.V., Kholoptseva E.S., Kaznina N.M. Effect of pre-sowing seed treatment with salicylic acid on the growth and photosynthetic apparatus of barley at different zinc content in the substrate. *Plant Physiology*. 2023;70(3):251-258 (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S001533032370001X>
8. Kondrateva N.P., Shogenov Yu.Kh., Ziganshin B.G., Akhatov R.Z. The use of digital technologies for the effective management of electrotechnological irradiators. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022;4:40-43. (In Russ.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-4-40-43>
9. Björn L.O., Janet F. Proceeding of the International Workshop on “Effects ultraviolet radiation on Plant”, organized by Association Internationale de Photobiologie and Indian Photobiology

by Association Internationale de Photobiologie and Indian Photobiology Society 1-5 November, 1982 Delhi, India. *Physiology Plantarum*. 1983;58:349-450.

10. Разживин В.В., Потапова Г.Н. Влияние системных фунгицидов на полевую всхожесть и перезимовку растений озимой ржи сорта Янтарная // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2023. № 12 (230). С. 15-20. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2023-230-12-15-20>

11. Sisson W.B. Photosynthesis, Growth and ultraviolet Irradiance Absorbance of Cucurbita pepo L. Leaves Exposed to Ultraviolet-B Radiation (280-315 nm). *Plant Physiol*. 1981;67(1):120-124. <https://doi.org/10.1104/pp.67.1.120>

12. Teramura A.H. Effects of ultraviolet-B irradiances on soybean. I. Importance of photosynthetically active radiation in evaluating ultraviolet-B irradiance effect on soybean and wheat growth. *Physiol. Plant*. 1980;48:333-339. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1980.tb03264.x>

13. Острошенко В.Ю., Острошенко Л.Ю. Влияние стимуляторов на всхожесть семян и рост сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2023. № 4 (394). С. 93-104. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-93-104>

14. Рябова Т.Н., Ястребова А.В., Коконев С.И., Мильчакова А.В. Кормовая продуктивность люпина узколистного в зависимости от предпосевной обработки семян и нормы высева // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 3 (75). С. 4-9. https://doi.org/10.48012/1817-5457_2023_3_4-9

15. Украинцев В.С., Корепанов Д.А., Кондратьева Н.П., Бывальцев А.В. Влияние ультрафиолетового облучения на повышение посевных качеств семян хвойных пород // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». 2011. № 1. С. 132-137. EDN: NDXRUD

16. Исупов А.Н., Киселев М.М., Крылов О.Н. Влияние предпосевной лазерной обработки семян на урожайность озимой ржи // Актуальные вопросы агрономии: Материалы Национальной научно-практической конференции, посвященной 70-летию доктора сельскохозяйственных наук, почетного работника высшего профессионального образования, заслуженного деятеля науки Удмуртской Республики профессора Ильдуса Шамилевича Фатыхова. Ижевск, 2023. С. 152-155. EDN: NKHTGH

17. Ренёв Е.А., Громов О.В. Влияние магнитного поля при предпосевной обработке семян на урожайность ярового ячменя в Среднем Предуралье // Вековое растениеводство: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию кафедры растениеводства. Пермь, 2023. С. 138-144. EDN: MBBKON

18. Бахчевников О.Н., Брагинец А.В. Применение микроволнового излучения для предпосевной обработки семян (обзор) // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 3 (71). С. 509-526. EDN: XGJUCG

19. Башарина О.В., Артюхов В.Г., Савостина И.Е. Влияние УФ-света на синтез некоторых белков лимфоцитами // Иммунология. 2009. Т. 30, № 3. С. 152-153. EDN: KUYSMF

20. Кондратьева Н.П., Корепанов Д.А., Бывальцев А.В., Перевозчиков Е.А. Ультрафиолетовое облучение семян туи западной и ели колочей // Известия Международной академии аграрного образования. 2011. № 12. С. 13-15. EDN: OBTJMT

21. Рыбкина С.В., Беляков М.В. Применение оптического излучения для стимулирования прорастания семян ели европейской // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2007. № 4. С. 14-19. EDN: IISSWZ

Society 1-5 November, 1982 Delhi, India. *Physiology Plantarum*. 1983;58:349-450.

10. Razzhivin V.V., Potapova G.N. Effect of systemic fungicides on field germination and overwintering of winter rye variety Yantarnaya. *Vestnik Altayskogo sluzhashchego agrarnogo universiteta = Bulletin of Altai State Agrucultural University*. 2023;12:15-20 (In Russ.) <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2023-230-12-15-20>

11. Sisson W.B. Photosynthesis, Growth and ultraviolet Irradiance Absorbance of Cucurbita pepo L. Leaves Exposed to Ultraviolet-B Radiation (280-315 nm). *Plant Physiol*. 1981;67(1):120-124. <https://doi.org/10.1104/pp.67.1.120>

12. Teramura A.H. Effects of ultraviolet-B irradiances on soybean. I. Importance of photosynthetically active radiation in evaluating ultraviolet-B irradiance effect on soybean and wheat growth. *Physiol. Plant*. 1980;48:333-339. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1980.tb03264.x>

13. Ostroshenko V.Yu., Ostroshenko L.Yu. Influence of growth stimulants on seed germination and seedlings growth of scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Russian Forestry Journal*. 2023;4:93-104 (In Russ.) <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-93-104>

14. Ryabova T.N., Yastrebowa A.V., Kokonov S.I., Milchakova A.V. Feeding productivity of narrow-leaved lupine depending on pre-sowing seed treatment and seeding rate. *The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2023;3(75):4-9. (In Russ.) https://doi.org/10.48012/1817-5457_2023_3_4-9

15. Ukraintsev V.S., Korepanov D.A., Kondratyeva N.P., Byvaltsev A.V. Influence of ultraviolet irradiation on increase sowing qualities of coniferous breeds. *Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle = Bulletin of the Udmurt University. Series 6: Biology. Geosciences*. 2011;1:132-137 (In Russ.)

16. Isupov A.N., Kiselev M.M., Krylov O.N. Influence of pre-sowing laser seed treatment on the yield of winter rye. *Aktualnye Voprosy Agronomii: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference dedicated to the 70th anniversary of Doctor of Agricultural Sciences, Honorary Worker of Higher Professional Education, Honored Scientist of the Udmurt Republic, Professor Ildus Sh. Fatykhov*. Izhevsk, 2023. pp. 152-155 (In Russ.)

17. RENEV E.A., Gromov O.V. The influence of the magnetic field during pre-sowing seed treatment on the yield of spring barley in the Middle Urals. *Vekovoe Rastenievodstvo. Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 100th anniversary of the Department of Plant Science*. Perm, 2023. pp. 138-144. (In Russ.)

18. Bakhchevnikov O.N., Braginetz A.V. Application of microwave radiation for seed pre-sowing treatment (review). *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education*. 2023;3:509-526. (In Russ.)

19. Basharina O.V., Artyukhov V.G., Savostina I.E. The influence of UV light on the synthesis of certain proteins by lymphocytes. *Immunologiya*. 2009;30(3):152-153. (In Russ.)

20. Kondrateva N.P., Korepanov D.A., Byvaltsev A.V., Perevozchikov E.A. Ultraviolet irradiation of seeds of thuja occidentalis and blue spruce (*Picea pungens*). *Izvestiya Mezhdunarodnoy Akademii Agrarnogo Obrazovaniya*. 2011;12:13-15. (In Russ.)

21. Rybkina S.V., Belyakov M.V. Application of optical radiation to stimulate germination of Norway spruce seeds. *Russian Forestry Journal*. 2007;4:14-19. (In Russ.)

22. Kentbaeva B.A., Besshchetnova N.N., Besshchetnov V.P., Kentbaev E.Zh. Soil germination of seeds of some representatives of the genus *Crataegus* L. *Vestnik of the Nizhny Novgorod State Agrotechnological University*. 2023;4:45-51. (In Russ.)

23. Kondrateva N.P., Akhatov R.Z., Bolshin R.G., Krasnolutskaya M.G., Selunskiy V.V. Digital automation of energy-efficient in vitro irradiation of orchard plum micro cuttings. *Light & Engineering*. 2023;31(6):57-64. <https://doi.org/10.33383/2023-019>

22. Кентбаева Б.А., Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Кентбаев Е.Ж. Грунтовая всхожесть семян некоторых представителей рода CRATAEGUS L // Вестник Нижегородского государственного агротехнологического университета. 2023. № 4 (40). С. 45-51. EDN: XBMQYF

23. Kondrateva N.P., Akhatov R.Z., Bolshin R.G., Krasnolutska-ya M.G., Selunskiy V.V. Digital automation of energy-efficient in vitro irradiation of orchard plum micro cuttings // Light & Engineering. 2023. Т. 31, № 6. С. 57-64. <https://doi.org/10.33383/2023-019>

24. Кондратьева Н.П., Ахатов Р.З., Большин Р.Г., Краснолуцкая М.Г., Духтанова Н.В., Селунский В.В., Нетёсов С.В. Эффект синергизма для управления посевными качествами семян люцерны изменчивой с элементами нейросети для контроля дозы УФО // АгроЭкоИнфо. 2023. № 5 (59). EDN: OUUCDZ

25. Кондратьева Н.П., Большин Р.Г., Ахатов Р.З., Краснолуцкая М.Г. Компактная энергоэффективная УФ-облучательная установка для семян с настраиваемым светодиодным цифровым драйвером // Реинжиниринг и цифровая трансформация эксплуатации транспортно-технологических машин и робото-технических комплексов: Сборник статей Московской Международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2023. С. 323-329. EDN: JDBOVP

26. Ovchukova S.A., Kondrateva N.P., Kovalenko O.Y. Energy saving in lighting technologies of agricultural production. Light & Engineering. 2021;29(2):21-25. <https://doi.org/10.33383/2020-039>

Информация об авторах

Надежда Петровна Кондратьева¹, д-р техн. наук, профессор; aep_isha@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1784-3560>

Владимир Федорович Сторчевой², д-р техн. наук, профессор; v.storchevoy@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>

Роман Геннадьевич Большин³, канд. техн. наук, доцент; bolshin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5268-0464>

¹ Удмуртский государственный аграрный университет; 426069, Российская Федерация, г. Ижевск, ул. Студенческая, 11

^{2,3} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

Н.П. Кондратьева – научное руководство, формулирование направлений исследования, формирование общих выводов
В.Ф. Сторчевой – научное руководство, формулирование направлений исследования, формирование общих выводов
Р.Г. Большин – анализ литературы, обработка результатов исследований, подготовка рукописи

Конфликт интересов

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

Статья поступила в редакцию 21.06.2024; поступила после рецензирования и доработки 23.08.2024; принята к публикации 02.09.2024

24. Kondrateva N.P., Bolshin R.G., Akhatov R.Z., Krasnolutska-ya M.G., Dukhtanova N.V., Selunsky V.V., Netosov S.V. The synergistic effect for managing the sowing qualities of alfalfa seeds with elements of a neural network to control the dose of UFOs. *AgroEcoInfo*. 2023;5(59). (In Russ.)

25. Kondrateva N.P., Bolshin R.G., Akhatov R.Z., Krasnolutska-ya M.G. Compact energy-efficient UV irradiation unit for seeds with a customizable LED digital driver. *Reinzhiniring i tsifrovaya transformatsiya. Retsept ekspluatatsii transportno-tekhnicheskikh mashin i roboto-tekhnicheskikh kompleksov. Proceedings of the Moscow International Interuniversity Scientific and Technical Conference of students, undergraduates, graduate students and young scientists*. Moscow, 2023. pp. 323-329. (In Russ.)

26. Ovchukova S.A., Kondrateva N.P., Kovalenko O.Y. Energy saving in lighting technologies of agricultural production. *Light & Engineering*. 2021;29(2):21-25. <https://doi.org/10.33383/2020-039>

Author Information

Nadezhda P. Kondrateva¹, DSc (Eng), Professor; aep_isha@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1784-3560>

Vladimir F. Storchevoy², DSc (Eng), Professor; v.storchevoy@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>

Roman G. Bolshin³, CSc (Eng), Associate Professor; bolshin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5268-0464>

¹ Udmurt State Agrarian University; 426069, Russian Federation, Izhevsk, Studencheskaya Str., 11

^{2,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow 127434, Russian Federation

Author Contribution

N.P. Kondrateva – research supervision, conceptualization, formulation of general conclusions

V.F. Storchevoy – research supervision, conceptualization, formulation of general conclusions

R.G. Bolshin – literature review, processing of research results, writing – original draft preparation

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests and are responsible for plagiarism

Received 21.06.2024; Revised 23.08.2024; Accepted 02.09.2024.

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 001.891.5:621.384.52:631.22

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-66-73>

Электрический озонатор-излучатель воздуха для сельскохозяйственных помещений: результаты исследований автономного модуля

*В.Ф. Сторчевой¹, Ю.А. Судник², А.Н. Мануйленко³*¹ Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет); г. Москва, Россия² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия³ Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина; Белгородская обл., Россия¹ v_storchevoy@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>² sudnik@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3725-9860>³ manuylenko_an@bsaa.edu.ru; <https://orcid.org/0009-0001-9138-9562>

Аннотация. Воздушная среда животноводческих помещений нуждается в обеззараживании и улучшении газового состава. Наиболее эффективным способом является озонирование. С целью оздоровления воздуха внутри животноводческих помещений авторами разработан электрический озонатор-излучатель, модуль излучателя которого состоит из двух керамических оснований с разнотенциальными электродами из вольфрама: на одном основании электрод в виде сотовой ячейки, на другом – в виде стержня. Производительность по озону регулируется изменением разрядного промежутка между электродами излучателя и проводящей плоскостью. Теоретически установлено, что образование озона в коронном разряде зависит от напряженности электрического поля между разнотенциальными электродами и температуры их нагрева. При этом максимальная напряженность достигается при разрядном промежутке от 25 до 35 мм и электродах радиусом не более 2 мм. Изучение влияния температуры нагрева электродов на озонобразование проводилось на разработанной конструкции озонатора-излучателя в лаборатории объемом 180 м³ при температуре воздуха плюс 25°C. Значение воздушного зазора между электродами составляло 30 мм, напряжение на излучателе варьировалось от 10 до 30 кВ, продолжительность работы озонатора-излучателя составляло 0-80 мин, скорость воздушного потока, создаваемого электровентилятором, – 0,3 м/с. Экспериментально установлено, что стабильная работа озонатора-излучателя наблюдается, когда температура электродов не превышает 30°C. В дальнейшем планируется внедрить озонатор-излучатель воздуха для сельскохозяйственных помещений в систему вентиляции и кондиционирования.

Ключевые слова: озонатор-излучатель, озонатор-излучатель воздуха для сельскохозяйственных помещений, электроозонатор, воздух, разряд, температура электродов, радиус электрода

Для цитирования: Сторчевой В.Ф., Судник Ю.А., Мануйленко А.Н. Электрический озонатор-излучатель воздуха для сельскохозяйственных помещений: результаты исследований автономного модуля // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 5. С. 66-73. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-66-73>

ORIGINAL ARTICLE

Electric ozonizer-air emitter for agricultural buildings: study results for an autonomous module

*V.F. Storchevoy¹, Yu.A. Sudnik², A.N. Manuylenko³*¹ Moscow Aviation Institute (National Research University); Moscow, Russia² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia³ Belgorod State Agrarian University named after V. Ya. Gorin; Belgorod region, Russia¹ v_storchevoy@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>² sudnik@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3725-9860>³ manuylenko_an@bsaa.edu.ru; <https://orcid.org/0009-0001-9138-9562>

Abstract. The air environment of livestock buildings requires disinfection and improvement of the gas composition. The most effective method is ozonation. In order to improve the air inside livestock buildings, the authors have developed an electric ozonizer-emitter. Its emitter module consists of two ceramic bases with different-potential

tungsten electrodes, one base having an electrode in the form of a honeycomb cell, and the other – in the form of a rod. The ozone productivity is regulated by changing the discharge gap between the emitter electrodes and the conducting plane. It has been theoretically established that ozone formation in a corona discharge depends on the electric field strength between the different-potential electrodes and their heating temperature. In this case, the maximum strength is achieved with a discharge gap from 25 to 35 mm and electrodes with a radius of no more than 2 mm. The effect of electrode heating temperature on ozone formation was studied on the developed design of the ozonizer-emitter in a laboratory of 180 m³ at an air temperature of 25°C above zero. The air gap between the electrodes was 30 mm, the voltage on the emitter varied from 10 to 30 kV, the duration of the ozonizer-emitter operation ranged between 0 and 80 min, the airflow rate induced by the electric fan was 0.3 m/s. It was experimentally established that stable operation of the ozonizer-emitter is observed when the electrode temperature does not exceed 30°C. In the future, the authors plan to introduce the ozonizer-air emitter into the ventilation and air conditioning system of agricultural buildings.

Keywords: ozonizer-emitter, ozonizer-air emitter for agricultural buildings, electric ozonizer, air, discharge, electrode temperature, electrode radius

For citation: Storchevoy V.F., Sudnik Y.A., Manuylenko A.N. Electric ozonizer-air emitter for agricultural buildings: study results for an autonomous module. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(5):66-73. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-66-73>

Введение

Для развития животноводства (птицеводства) необходимо создать определенные условия содержания животных и птицы, способствующие росту показателей их продуктивности (увеличение живой массы, лактационная продуктивность, яйценоскость и т.д.). Одним из решений данной задачи является содержание животных (птицы) в закрытых помещениях с поддержанием эффективных параметров микроклимата для конкретного вида сельскохозяйственного животного и птицы (температурно-влажностный режим, освещенность, перемещение воздушных масс, охлаждающая способность воздуха). Помимо параметров микроклимата в сельскохозяйственных помещениях, необходимо обеспечить качество воздушной среды по уровню ионизации $100 \cdot 10^3 \dots 480 \cdot 10^3$ ион/см², содержанию взвешенных пылевых частиц не более 0,4...1,5 мг/м³, количеству колоний патогенной микрофлоры до 100000 КОЕ/м³ и концентрациям вредных газов.

Разработка новых технологических устройств регулирования параметров воздуха в животноводческих и птицеводческих помещениях по газовому составу и патогенной микрофлоре является важной проблемой для агропромышленного комплекса и научного сообщества [1-3].

Отопительно-вентиляционные системы, используемые для нормирования микроклимата, не всегда позволяют добиться оптимальных параметров воздушной среды по обсемененности патогенной микрофлоры и газовому составу. Регулирование показателей качества воздуха в производственных помещениях решается путем применения химических и физических средств, а также их комбинации (активное

вентилирование, орошение, мойка, газация и т.п.) [3]. Несмотря на свою распространенность, такие средства имеют ряд недостатков: повышенный расход электрической энергии и водных ресурсов, а также финансовые затраты, направленные на закупку, доставку и хранение химических активных веществ для обработки помещений и их воздушной среды. Анализ научных работ [3-8] позволил выделить основные виды физических методов контроля параметров воздуха в животноводческих и птицеводческих помещениях по газовому составу и патогенной микрофлоре (рис. 1).

Наиболее эффективным методом является озонирование. При воздействии высокого напряжения на молекулу кислорода происходит ее диссоциация и синтез газообразного озона. Озонированием воздушной среды можно добиться свежести воздуха, дезинсекции, дератизации, снижения концентрации вредных микроорганизмов и газов (NH₃, H₂S, CO₂). При этом энергетические затраты, направленные на мероприятия по снижению бактериальной обсемененности и концентрации вредных производственных газов с помощью газообразного озона, относительно невелики по сравнению с прочими физическими методами [3-7].

Наряду с достоинствами использования газообразного озона для обработки и обеззараживания воздушной среды и поверхностей сельскохозяйственных помещений существуют недостатки. При концентрациях выше предельно допустимой (0,1 мг/м³) и длительном воздействии газообразный озон выступает как отравляющее вещество для животных и персонала и способствует более быстрому коррозионному разрушению необработанных металлических

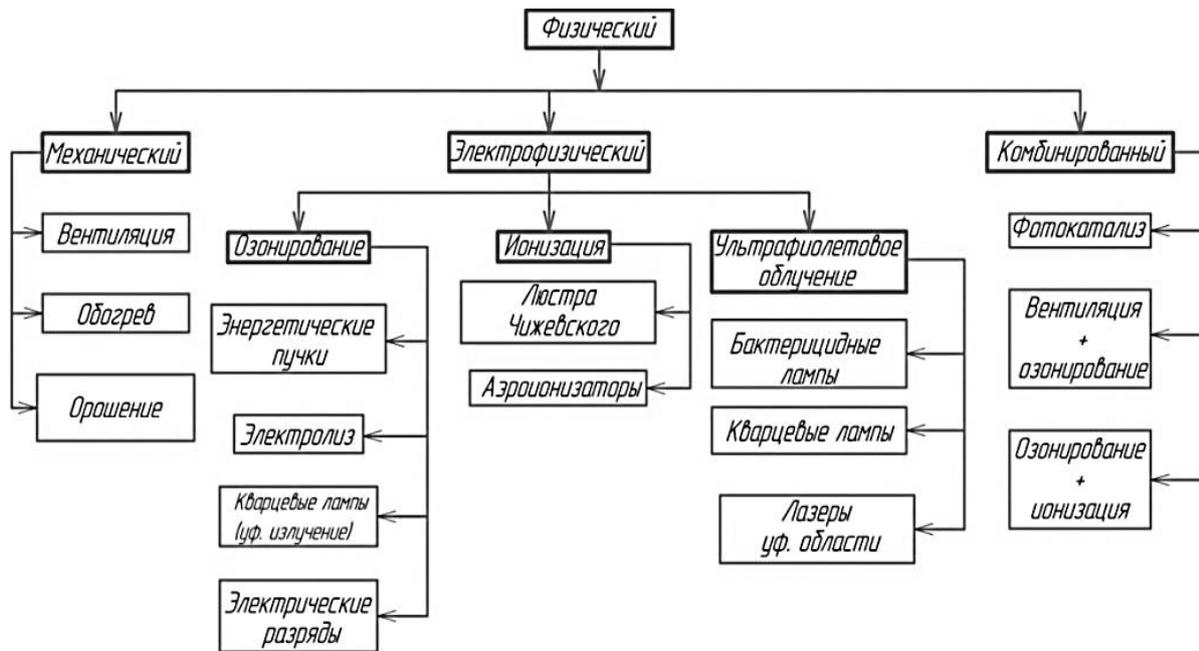


Рис. 1. Виды физических методов контроля параметров воздуха в животноводческих и птицеводческих помещениях по газовому составу и патогенной микрофлоре
Fig. 1. Types of physical methods for monitoring air parameters in livestock and poultry buildings for gas composition and pathogenic microflora

конструкций. При длительной работе электроозонаторы на коронном разряде могут работать нестабильно и не обеспечивать оптимальную равномерную концентрацию по объему помещения. Это может быть связано с неправильной установкой устройства и неподходящим температурно-влажностным режимом, плохим охлаждением электродов, загрязнением внутренних компонентов озонаторной установки пылью, техническими особенностями устройства. Для устранения данных недостатков необходимо контролировать генерируемую концентрацию озона при помощи датчиков озона, обеспечивать качественное охлаждение излучателя, поддерживать эффективные параметры работы установки на коронном разряде в зоне озонобразования.

Цель исследований: разработка конструкции электрического озонатора-излучателя для животноводческих помещений в целях оздоровления воздуха и профилактики распространения заразных болезней.

Материалы и методы

Проведен анализ научной литературы по вопросам электрического синтеза газообразного озона, изучена специфика воздействия озона на угнетение патогенной микрофлоры и изменение газового состава воздушной среды, осуществлен патентный поиск технических устройств на коронном разряде для озонирования воздуха. Рассмотрены теория процесса электрического озонирования и способы повышения эффективности процесса.

Экспериментальное обоснование технологических параметров и благоприятных режимов озонирования воздушной среды в животноводческом помещении с применением автономного модуля электрического озонатора было проведено с использованием теории планирования эксперимента и регрессионного анализа¹.

Для измерения режимов работы установки и параметров воздушной среды использовались мультиметр DT 9205A, киловольтметр С197, миллиамперметр АПТ-1а, анемометр Smart Sensor AR816+, анализатор озона WELUOT DM509-O3 и Элан O₃, штангенциркуль Inforce 06-11-39, пирометр Kraftool TRM-1000, гигрометр AIRQS3-1.

Наиболее эффективные значения параметров установки и условия ее эксплуатации определены на основе статистической обработки экспериментальных данных с использованием пакета прикладных программ Microsoft Excel 2010 и КОМПАС-3D v20.1.

Результаты и их обсуждение

Эффективность работы электроозонаторных установок на коронном разряде обусловлена: напряжением, определяющим интенсивность коронного разряда и скорость образования газообразного озона; разрядным промежутком между стержневым электродом и проводящей плоскостью, влияющим

¹ Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: Учебное пособие. М.: Высшая школа, 2003. 405 с.

на напряженность электрического поля и интенсивность разряда; расходом озона, определяющим время пребывания молекул кислорода в зоне разряда и влияющим на степень конверсии кислорода в озон; температурой и влажностью воздушной среды, определяющими стабильность разряда и выход озона².

Для повышения эффективности и стабильности работы разрабатываемой конструкции автономного модуля электроозонатора проведены дополнительные экспериментальные исследования, целью которых было установление того, как меняется температура на электродах в зависимости от напряжения и длительности работы.

Для осуществления процесса образования озона из воздуха посредством коронного разряда и диссоциации молекулы кислорода используются различные конструкторские решения электроозонаторов на коронном разряде. Их основными технологическими узлами остаются генератор высокого напряжения, стержневые электроды и проводящая пластина разных потенциалов (модуль излучателя), а также электрический вентилятор [6-8].

Ранними научными исследованиями³ установлена зависимость озонаобразования от напряженности электрического поля в воздушном зазоре. Для системы стержневых электродов (рис. 2) были проведены теоретические исследования и получены аналитические выражения для определения напряженности электрического поля (E_{max}), учитывающие конструктивные параметры электродной системы.

Определено, что для одиночного электрода максимальная напряженность на его конце при $\Theta = 0$ и $r = R_0$ составит:

$$E_{max} = E(0, R_0) = \varphi_1 \left(\frac{1}{h} + \frac{1}{R_0} \right), \quad (1)$$

где φ_1 – потенциал, В; h – воздушный зазор, м; R_0 – радиус электрода, м.

Зависимость электрической напряженности от радиуса электрода и воздушного зазора представлена на рисунке 3.

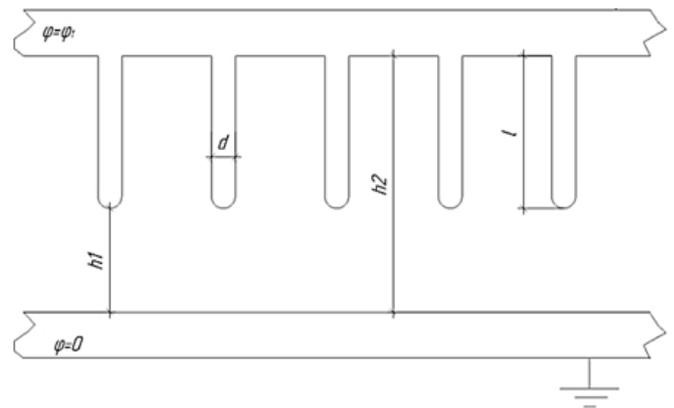


Рис. 2. Физическая модель системы² игольчатых электродов озонатора-излучателя:

h1 – воздушный зазор; h2 – расстояние между биполярными проводящими пластинами; d – диаметр электрода; l – длина электрода

Fig. 2. Physical model² of the needle electrode system of the ozonizer-emitter:

h1 – air gap; h2 – distance between bipolar conducting plates; d – electrode diameter; l – electrode length

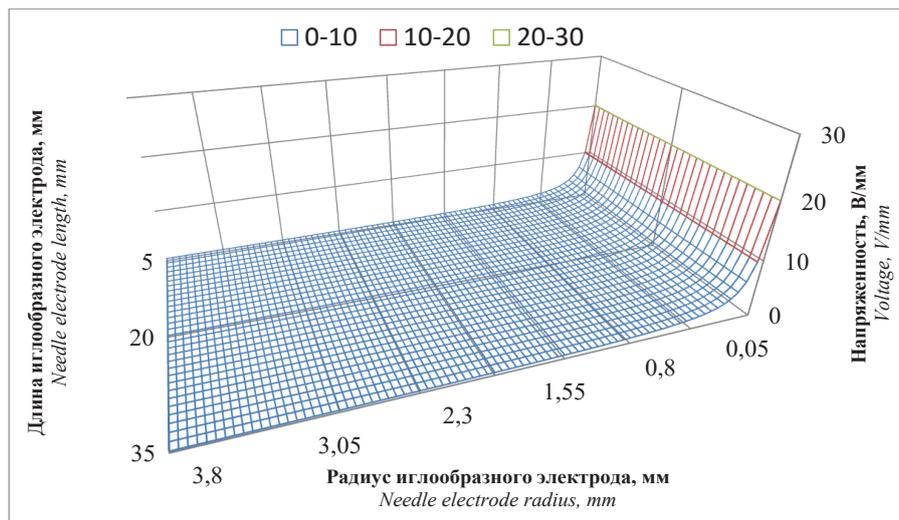


Рис. 3. Зависимость напряженности электрического поля от радиуса электрода и воздушного зазора³

Fig. 3. Dependence of the electric field strength in the ozone formation zone on the electrode radius and the air gap³

² Мануйленко А.Н. Разработка и исследование озонатора-излучателя воздуха на электродах с керамическим основанием для животноводческих помещений: Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2024. 23 с.

³ Мануйленко А.Н. Разработка и исследование озонатора-излучателя воздуха на электродах с керамическим основанием для животноводческих помещений: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2024. 23 с.

Полученные данные (рис. 3) позволяют сделать вывод о том, что радиус стержневого электрода (до 2 мм) является важным фактором, влияющим на показатель напряженности (до 20 В/мм) в активной зоне озонобразования.

На основе обзора научной литературы, патентного поиска и проведенных теоретических исследований [9-11] разработаны конструкция автономного модуля электрического озонатора-излучателя на коронном разряде (рис. 4) и конструкция узла электродов (рис. 5). Техническая новизна разработанного устройства подтверждена патентами на изобретение и полезными моделями⁴ [12-14].

Новая конструкция узла электродов позволяет увеличить надежность разнопотенциальных

электродов и повысить производительность устройства по выходу озона. Узел электродов включает в себя два керамических основания с закрепленными на них вольфрамовыми разнопотенциальными электродами. На одном основании электрод в виде сотовой ячейки, на другом – в виде иглы с острием. В устройствах, работающих на высоких напряжениях, образуется коронный разряд, при котором происходит ионизация воздуха вокруг проводника. Коронный разряд приводит к образованию озона, но при отсутствии диэлектрических барьеров и систем защиты коронный разряд может сорваться в неуправляемый разряд (дугу) на корпус устройства, что может привести к выходу из строя и снижению общей безопасности эксплуатируемой электроустановки. Использование электротехнической керамики в качестве диэлектрической прослойки препятствует срыву разряда на корпус, способствует эффективному отводу тепла от разнопотенциальных электродов, продлевая срок их службы.

В разработанной конструкции узла излучателя предусмотрена регулировка воздушного зазора между острием электрода и проводящей плоскостью, благодаря чему обеспечивается регулировка производительности озонатора-излучателя по генерации газообразного озона на одном источнике высокого напряжения, а также возможность установления конкретного параметра режима работы [15].

Анализ работ по применению озонирования показывает^{5,6,7} [5-7], что стабильность процесса генерации озона из воздушной среды под воздействием коронного разряда зависит от температуры электродов. Из этого следует, что температура нагрева электродов является важным фактором для обеспечения непрерывности процесса озонобразования.

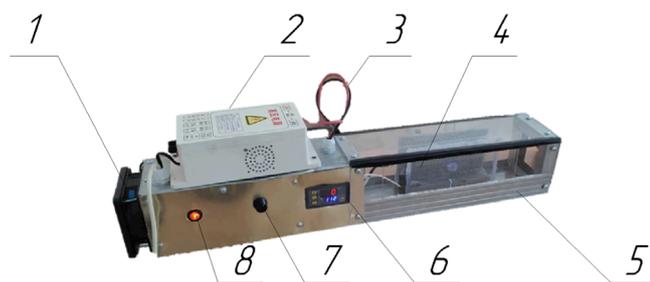


Рис. 4. Экспериментальный озонатор-излучатель воздуха:

- 1 – вентилятор; 2 – генератор высокого напряжения;
- 3 – экранированные провода; 4 – модуль излучателя;
- 5 – корпус электроозонатора;
- 6 – программируемое реле времени;
- 7 – регулятор скорости вращения вентилятора;
- 8 – тумблер включения/выключения питания от сети

Fig. 4. Experimental ozonizer-air emitter:

- 1 – fan; 2 – high voltage generator; 3 – shielded wires;
- 4 – emitter module; 5 – electric resonator housing;
- 6 – programmable time relay; 7 – fan speed control;
- 8 – power supply on/off switch toggle

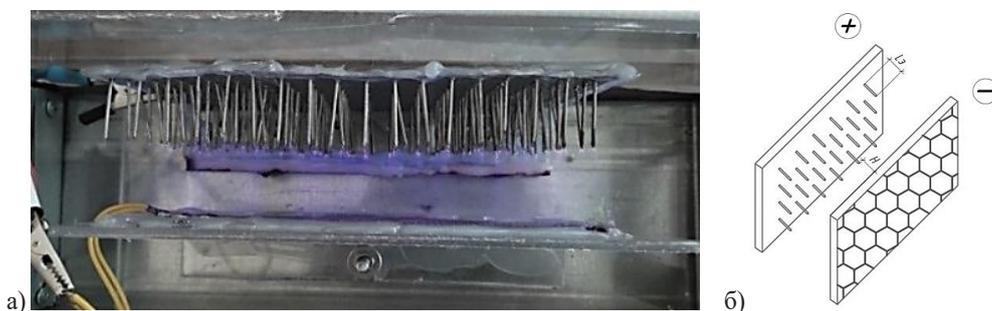


Рис. 5. Внешний вид (а) и структурная схема (б) узла электродов

Fig. 5. Appearance (a) and block diagram (b) of the electrode assembly

⁴ГОСТ 31829-2012. Оборудование озонаторное. Требования безопасности: введ. 1 января 2014 г. М.: Стандартинформ, 2019. 11 с.

⁵Баженов В.И., Стрельченко А.Н. Основы планирования и моделирования в теории инженерного эксперимента: учебное пособие. М.: МАИ, 1983. 59 с.

⁶Вавилова Г.В. Математическая обработка результатов измерения: Учебное пособие. Томск: Томский политехнический университет, 2013. 167 с.

⁷Ксенз Н.В. Электроозонирование воздушной среды животноводческих помещений: Методические рекомендации. Зерноград: ВНИПТИМЭСХ, 1991. 171 с.

С использованием разработанного озонатора-излучателя воздуха (рис. 5) были проведены экспериментальные исследования по выявлению зависимости изменения температуры на электродах (z) от продолжительности работы (y_1) и напряжения (y_2). Проведенные исследования соответствовали плану второго порядка Коно для двухфакторных экспериментов.

Эксперимент проведен в лаборатории, объемом 180 м^3 , температура в помещении составляла плюс 25°C , значение воздушного зазора – 30 мм , показатель высокого напряжения на излучателе варьировался от 10 до 30 кВ , при продолжительности работы экспериментального озонатора-излучателя $0-80$ мин и скорости воздушного потока $0,3 \text{ м/с}$, создаваемого электроventилиатором. По полученным экспериментальным данным составлена регрессионная модель, характеризующая зависимость температуры электродов от времени работы и напряжения:

$$z = 30,2 + 1,2y_1 + 3,8y_2 + 0,67y_1y_2 - 0,3y_1^2 - 0,4y_2^2, \quad (2)$$

где z – температура на разнопотенциальных электродах, $^\circ\text{C}$; y_1 – время работы озонатора-излучателя, мин; y_2 – напряжение, выдаваемое генератором высокого напряжения, кВ.

Адекватность полученной модели должна отвечать F -критерию достоверности по Фишеру:

$$F_{\text{рас}} \leq F_{\text{табл}}, \quad (3)$$

где $F_{\text{рас}}$ – расчетный критерий адекватности модели, $F_{\text{рас}} = 2,57$; $F_{\text{табл}}$ – табличный критерий адекватности модели, $F_{\text{табл}} = 2,96$.

$$2,57 \leq 2,96.$$

Проверочное условие выполняется, поэтому полученные коэффициенты регрессии можно считать значимыми. По уравнению (2) построена расчетная поверхность (рис. 6), которая характеризует зависимость изменения температуры узла электродов разработанного озонатора-излучателя от подаваемого высокого напряжения и продолжительности работы.

Отметим, что температура электродов возрастает с увеличением напряжения и времени работы озонатора-излучателя (рис. 6). Стабильная работа озонаторного устройства на коронном разряде обеспечивается при температуре электродов не более 30°C , что достигается регулированием напряжения или временем работы установки.

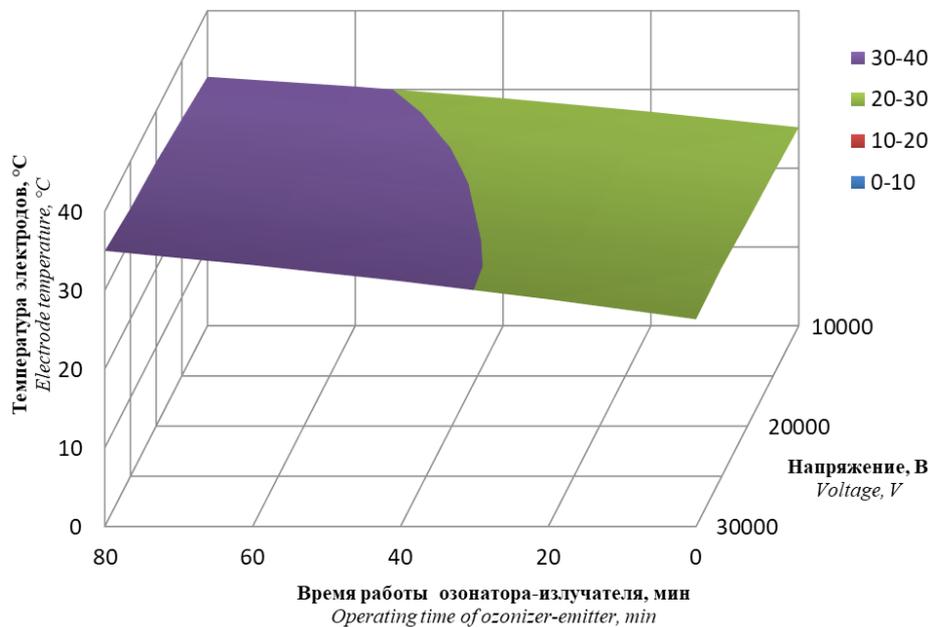


Рис. 6. Температура электродов озонатора-излучателя в зависимости от напряжения и продолжительности работы установки

Fig. 6. Temperature of the electrodes of the ozonizer-emitter depending on the voltage and operation time of the installation

Выводы

1. Озонообразование зависит от напряженности электрического поля между разнопотенциальными электродами. Увеличение напряженности происходит с уменьшением радиуса электродов. Максимальное значение напряженности при разрядном промежутке 25...35 мм достигается при радиусе электрода менее 2 мм.

Список источников

1. Маневич Б.В., Кузина Ж.И., Харитонов Е.Б., Косьяненко Т.В. Санитарная обработка: баланс безопасности и эффективности. Обеззараживание воздуха в производственных помещениях // Молочная промышленность. 2019. № 6. С. 52-55. EDN: ZKEUYX
2. Сторчевой В.Ф., Сучугов С.В., Компаниец А.Е. Создание озонно-ионной воздушной среды в закрытых помещениях для содержания животных и птицы // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2019. № 3 (91). С. 35-39. <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-3-35-39>
3. Троцкая Т.П., Голубец И.Е., Генселевич А.Р., Мионов А.М., Грищук В.М. Санитарная обработка технологического оборудования и производственных помещений на предприятиях молочной промышленности методом озонирования // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: Материалы Международной научно-практической конференции, г. Минск, 21-22 октября 2009 г. Минск: Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2009. Т. 2. С. 14-20. EDN: XPXYXR
4. Афанасьев М.А., Копылова О.С., Ивашина А.В., Антоненко А.И., Константинова Е.Е. Технологии очистки озоном // Методы и технические средства повышения эффективности использования электрооборудования в промышленности и сельском хозяйстве: 80-я научно-практическая конференция, Ставрополь, 9 марта – 29 мая 2015 г. Ставрополь: АГРУС, 2015. Т. 1. С. 32-37. EDN: UWKRUZ
5. Сторчевой В.Ф., Компаниец А.Е. Применение озонатора-ионизатора на молочных фермах // Доклады ТСХА. 2019. Т. 291. Ч. 2. С. 294-296. EDN: ZFBZVB
6. Бородин И.Ф., Самарин Г.Н. Энергосберегающая система микроклимата ферм с обеззараживателем воздуха // Труды Международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве». 2008. Т. 3. С. 289-291. EDN: PHGYIJ
7. Самарин Г.Н., Соловьев М.С., Степанов П.В. Энергосберегающая рециркуляционная система микроклимата животноводческих ферм с обеззараживателем воздуха // Труды Международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве». 2012. Т. 3. С. 256-261. EDN: PEYEBV
8. Першин А.Ф. Устранение озоном дурно пахнущих выбросов птицеводческих предприятий // Птицеводство. 2013. № 12. С. 38-40. EDN: RTHKXJ
9. Озонатор: Патент RU2523805 C1, МПК C01B13/11. № 2013105279/05 / Д.В. Лебедев, П.С. Кузьменко, М.О. Якименко, И.Д. Лебедев; заявл. 07.02.2013; опубл. 27.07.2014. EDN: YPZZRQ
10. Юфев Л.Ю., Селезнева Д.М. Испытания комбинированной электроустановки для обеспыливания и обеззараживания

2. Стабильность процесса озонообразования зависит от температуры электродов. Эффективная работа озонатора-излучателя достигается при достижении температуры электродов не более +30°C. Это условие можно обеспечить, управляя напряжением на излучателе или продолжительностью работы озонатора.

3. В дальнейшем планируется внедрить разработанный электроозонатор в систему вентиляции и кондиционирования в помещении с животными.

References

1. Manevich B.V., Kuzina J.I., Haritonova E.B., Kosiyanenko T.V. Sanitary treatment: balance of safety and efficiency. *Dairy industry*. 2019;6:52-55. (In Russ.)
2. Storchevov V.F., Suchugov S.V., Kompaniets A.Ye. Providing ozone-ion air indoor environment for keeping livestock and poultry. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2019;3:35-39. (In Russ.). <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-3-35-39>
3. Trotskaya T.P., Holubets I.E., Genselevich A.R., Mironov A.M., Grischuk V.M. Desinfection of the technological equipment and production premises on enterprise of milk industry by ozone method. *Proceedings of International scientific-and-practical conference "Nauchno-tehnicheskij progress v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve"*. Minsk, Nauchno-prakticheskiy tsentr natsionalnoy akademii nauk Belarusi po mekhanizatsii sel'skogo khozyaystva, 2009. Pp. 14-20. (In Russ.)
4. Afanasev M.A., Kopylova O.S., Ivashina A.V., Antonenko A.I., Konstantinova E.E. Ozone cleaning technology. *Proceedings of 80th Scientific-and-practical conference "Metody i tekhnicheskie sredstva povysheniya effektivnosti ispolzovaniya elektrooborudovaniya v promyshlennosti i sel'skom khozyaystve"*. Stavropol, Stavropol State Agrarian University, 2015. Pp. 32-37. (In Russ.)
5. Storchevov V.F., Kompaniets A.E. Use of an ozonizer-ionizer on dairy farms. *Doklady TSKHA*. 2019;291(II):294-296. (In Russ.)
6. Borodin I.F., Samarin G.N. Energy-saving farm indoor climate system with air disinfection. *Proceedings of International scientific technical conference "Energoobespechenie i energosberezhenie v sel'skom khozyaystve"*. 2008;3:289-291. (In Russ.)
7. Samarin G.N., Soloviev M.S., Stepanov P.V. Energy-saving recirculating indoor climate system for livestock farms with air disinfection. *Proceedings of International scientific technical conference "Energoobespechenie i energosberezhenie v sel'skom khozyaystve"*. 2012;3:256-261. (In Russ.)
8. Pershin A.F. Use of ozone to eliminate smelling emissions from poultry enterprises. *Ptitsevodstvo*. 2013;12:38-40. (In Russ.)
9. Lebedev D.V., Kuzmenko P.S., Yakimenko M.O. et al. Ozonizer: patent No. RU2523805 C1, 2014.
10. Yuferev L.Yu., Selezneva D.M. Testing a combined electrical installation for dust deparation and air disinfection in a poultry house. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(3):45-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-45-50>
11. Shevchenko A.A., Fedorov I.I. The analysis of designs of electroozonizers for preseeding processing of seeds. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2016;116:720-735. (In Russ.)
12. Manuylenko A.N., Vendin S.V. Electric air ozonator: patent No. RU205379 C1, 2021.
13. Manuylenko A.N., Vendin S.V. Electric air ozonator: patent No. RU204184 C1, 2021.

вания воздуха в птичнике // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24, № 3. С. 45-50. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-45-50>

11. Шевченко А.А., Федоров И.И. Анализ конструкций электроозонаторов для предпосевной обработки семян // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета* 2016. № 116. С. 720-735. EDN: VQUVQF

12. Электрический озонатор воздуха: Патент RU205379 U1, МПК C01B13/11. № 2020141915 / А.Н. Мануйленко, С.В. Вендин; заявл. 23.03.2020; опубл. 13.07.2021. EDN: PWBBYU

13. Электрический озонатор воздуха: Патент RU204184 U1, МПК C01B13/11, F24F 3/16, B01J 7/00. № 2020142852 / А.Н. Мануйленко, С.В. Вендин; заявл. 23.12.2020; опубл. 13.05.2021. EDN: APGYTM

14. Электроозонатор: Патент RU2787881 C1, МПК C01B13/11 / А.Н. Мануйленко, С.В. Вендин; № 2021138949; заявл. 24.12.2021; опубл. 13.01.2023. EDN: XVVZKY

15. Мануйленко А.Н., Вендин С.В. Конструкция электрического озонатора для обеззараживания воздушных масс в животноводческом помещении // *Инновации в АПК: проблемы и перспективы*. 2022. № 3 (35). С. 64-71. EDN: APOYPI

Информация об авторах

Владимир Федорович Сторчевой¹, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Теоретическая электротехника», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); 125993, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4; <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>; V_Storchevoy@mail.ru

Юрий Александрович Судник², д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; <https://orcid.org/0000-0003-3725-9860>; sudnik@rgau-msha.ru

Александр Николаевич Мануйленко³, преподаватель кафедры электрооборудования и электротехнологий в АПК; Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина; 308503, Российская Федерация, Белгородская обл., Белгородский район, п. Майский, ул. Вавилова, 1; <https://orcid.org/0009-0001-9138-9562>; manuylenko_an@bsaa.edu.ru

Вклад авторов

В.Ф. Сторчевой – анализ и доработка текста, научное руководство;

Ю.А. Судник – анализ и доработка текста, научное руководство; А.Н. Мануйленко – постановка проблемы, разработка концепции статьи, анализ литературы и сбор статистических данных, описание результатов и формирование выводов исследования.

Конфликт интересов

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

Статья поступила в редакцию 27.03.2024; поступила после рецензирования и доработки 09.09.2024; принята к публикации 11.09.2024

14. Manuylenko A.N., Vendin S.V. Electric ozonator; patent No. RU2787881 C1, 2023.

15. Manuylenko A.N., Vendin S.V. Design of electric ozonizer for disinfecting air masses in livestock house. *Innovations in Agricultural Complex: Problems and Perspectives*. 2022;3(35):64-71. (In Russ.)

Author Information

Vladimir F. Storchevoy¹, DSc(Eng), Professor, Professor of the Department of Theoretical Electrical Engineering; Moscow Aviation Institute (National Research University); Volokolamskoe Road, 4, Moscow, 125993, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>; V_Storchevoy@mail.ru

Yury A. Sudnik², DSc(Eng), Professor, Professor of the Department of Automation and Robotization of Technological Processes named after Academician I.F. Borodin; Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-3725-9860>; sudnik@rgau-msha.ru

Aleksandr N. Manuylenko³, Lecturer, the Department of Electrical Equipment and Electrical Technologies in the Agricultural Industry; Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin; Vavilova Str., 1, Maysky, Belgorod district, Belgorod region, 308503, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0001-9138-9562>; manuylenko_an@bsaa.edu.ru

Author Contribution

V.F. Storchevoy – writing – revising and editing of the manuscript, research supervision;

Y.A. Sudnik – writing – revising and editing of the manuscript, research supervision;

A.N. Manuylenko – problem statement, conceptualization, literature review, statistical data collection and curation, summarizing the results; making conclusions.

Conflict of interests

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

Received 27.03.2024; Revised 09.09.2024; Accepted 11.09.2024.

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 628.3:546.214:51-74

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-74-82>**Электроозонная технология очистки навозных стоков:
реализация математической модели***Д.А. Нормов¹, А.А. Азарян², А.А. Цедяков³, Д.С. Карлаков⁴*^{1,3,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия² Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина; г. Краснодар, Россия¹ danormov@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-3255-4334>² sashiko.az@yandex.ru³ andrey.tsedyakov@mail.ru⁴ koomarskij@gmail.com

Аннотация. Утилизации продуктов жизнедеятельности животных является особенно актуальной на крупных животноводческих комплексах. С целью совершенствования технологии переработки навозных стоков животноводства разработан эффективный метод их очистки и создана экспериментальная установка – станция очистки навозных стоков, включающая в себя электроозонирующий блок. Очистка осуществляется в два этапа: на первом этапе навозные стоки подвергаются сепарации и флотации для удаления крупнодисперсных примесей, на втором этапе жидкая фракция обрабатывается озоном. Технический результат достигается при тонкодисперсном распылении навозных стоков с диаметром капель от 1,0 до 10,0 мкм в озоновооздушной смеси при концентрации озона 450...500 мг/м³. Расчеты, выполненные на основании разработанной математической модели, показали, что тонкодисперсное распыление навозных стоков в камере с озоновооздушной смесью в сравнении с барботированием озона в жидкость в 360 раз увеличивает градиент концентрации озона и передачу массы озона через границу раздела фаз. Это дает возможность значительно повысить скорость потребления озона в химических реакциях, повысить коэффициент полезного действия, снизить энергозатраты на обработку навозных стоков. Эксперимент проводился на свиноводческом комплексе ООО «Новые аграрные технологии» хутора «Бейсужек второй» Выселковского района Краснодарского края. Результаты химических, органолептических и микробиологических анализов подтверждают высокую эффективность разработанного метода и оборудования для очистки сточных вод свинокомплекса. Разработанная электроозонная технология очистки навозных стоков позволяет улучшить экологическую обстановку в животноводческих хозяйствах, исключаются вредные выбросы экологически токсичных летучих соединений в атмосферу.

Ключевые слова: электроозонная технология очистки навозных стоков, утилизация продуктов жизнедеятельности животных, навозные стоки, станция очистки навозных стоков, озон, электроозонирующий блок, тонкодисперсное распыление навозных стоков

Благодарности: Авторы благодарят коллектив Приморо-Ахтарского завода агропромышленного оборудования в лице генерального директора, канд. техн. наук Сергея Александровича Перегудова за создание экспериментальной установки очистки и переработки животноводческих стоков.

Для цитирования: Нормов Д.А., Азарян А.А., Цедяков А.А., Карлаков Д.С. Электроозонная технология очистки навозных стоков: реализация математической модели // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 5. С. 74-82. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-74-82>

ORIGINAL ARTICLE

**Electro-ozonization technology of manure effluent treatment:
mathematical model implementation***D.A. Normov¹, A.A. Azaryan², A.A. Tsedyakov³, D.S. Karlakov⁴*^{1,3,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev agricultural Academy, Moscow, Russia² Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin; Krasnodar, Russia¹ danormov@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-3255-4334>² sashiko.az@yandex.ru³ andrey.tsedyakov@mail.ru⁴ koomarskij@gmail.com

Abstract. The disposal of animal waste products is especially urgent at large livestock facilities. In order to develop an effective technology of processing animal manure effluents, the authors have developed an effective method of their

treatment and designed an experimental installation – a manure effluent treatment station including an electro-ozonizer. Cleaning is carried out in two stages: at the first stage, manure effluent is subjected to separation and flotation to remove large dispersed impurities, at the second stage, liquid fraction is treated with ozone. The technical result is achieved by fine atomization of manure effluents with a droplet diameter from 1.0 to 10.0 microns in the ozone-air mixture at an ozone concentration of 450 to 500 mg/m³. Calculations based on the developed mathematical model have shown that fine atomization of manure effluents in a chamber with the ozone-air mixture increases the ozone concentration gradient and ozone mass transfer through the interface in 360 times as compared with barbotization of ozone into liquid. This makes it possible to increase significantly the rate of ozone consumption in chemical reactions, increase the efficiency factor, and reduce energy consumption for manure effluent treatment. The experiment was conducted at the pig-breeding farm of LLC “Novye Agrarnye Tekhnologii”, Beysuzhek Vtoroy, the Vyselki district, the Krasnodar region. The results of chemical, organoleptic and microbiological analyses confirm the high efficiency of the developed method and equipment for wastewater treatment of pig farms. The developed electro-ozonization technology and equipment improve the ecological situation on livestock farms by preventing the discharge of harmful emissions of ecologically toxic volatile compounds into the atmosphere.

Keywords: electro-ozonization technology of manure effluent treatment disposal of animal waste products, manure effluents, manure effluent treatment station, ozone, electro-ozonizer, fine atomization of manure effluents

Acknowledgements. The authors would like to thank the team of Primoro-Akhtarsk Agroindustrial Equipment Plant represented by Sergey Peregodov, General Director, CSc (Eng), for the development of an experimental unit for treatment and processing of livestock effluents.

For citation: Normov D.A., Azaryan A.A., Tsedyakov A.A., Karlakov D.S. Electro-ozonization technology of manure effluent treatment: mathematical model implementation. *Agricultural Engineering (Moscow)*. (In Russ.). 2024;26(5):74-82. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-74-82>

Введение

Производство животноводческой продукции на промышленной основе обуславливает интенсификацию отрасли и ввод в эксплуатацию крупных комплексов, одной из проблем которых является активное загрязнение окружающей среды в виде навоза, мочи, технической воды и дезинфицирующих средств, используемых во время ветеринарно-санитарных мероприятий, а также скотомогильников¹.

Жидкие навозные стоки представляют собой смесь экскрементов и остатков корма, сильно разбавленную водой. В стоках при наличии аммиака и хлоридов подавляется развитие термофильных микроорганизмов, соответственно тормозятся биотермические процессы, препятствуя естественному обеззараживанию [1].

Содержащиеся в навозных стоках микроорганизмы являются причиной вспышек инфекционных заболеваний населения и сельскохозяйственных животных [2]. Животноводческие стоки оказывают отрицательное воздействие и на качество атмосферного воздуха. Они являются источниками вредных газов и запахов, обуславливают попадание в воздушную среду микроорганизмов, отрицательно влияют на микроклимат животноводческих помещений и окружающих территорий [3].

¹ Загинайлов В.И. Электрофизические методы и средства контроля и управления сельскохозяйственными технологиями: Дис. ... д-ра техн. наук. М.: Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина, 2007.

Для обеззараживания навозных стоков условно применяются следующие способы: химические (с помощью различных соединений хлора, озона, перекиси водорода и др.); физические (термические с использованием различных излучений, электрические, электромагнитные); физико-химические (флотация, коагуляция, электрофильтрация, сорбция); биологические (в условиях искусственных и естественных биоценозов); комбинированные (флотация, электрофильтрация, применение различных соединений хлора, озона, перекиси водорода и др.) [4, 5].

Механическая очистка стоков применяется для удаления нерастворимых грубодисперсных и частично находящихся в коллоидном состоянии примесей.

Биологическая очистка подразумевает минерализацию органических веществ, находящихся в коллоидном и растворенном состоянии, которые не удается извлечь из сточных вод механическим путем [6].

Химическая очистка проводится в контактных отстойниках методами осаждения и поглощения с использованием хлора, хлорида железа, глинозема, сульфата железа и др. Технология хлорирования отличается относительной простотой, достаточно высокой бактерицидной эффективностью и невысокими эксплуатационными расходами. Однако несмотря на высокую эффективность обеззараживания, хлорирование (при дозе остаточного хлора 1,5 мг/дм³) не обеспечивает необходимую санитарно-эпидемиологическую безопасность относительно присутствующих в сточных

водах вирусов, цист простейших, лямблий и устойчивых к действию хлора форм микроорганизмов, что приводит к микробиологическому загрязнению систем водоотведения [7]. Отрицательным свойством хлорирования также является образование опасных хлорорганических соединений, различных диоксидов, образующихся при взаимодействии хлорированной воды с фенольными соединениями, находящимися в сточных водах. Эти хлорорганические соединения обладают высокой токсичностью, мутагенностью и канцерогенностью. Они устойчивы к биологическому окислению и не поддаются удалению при биологической очистке на очистных сооружениях [8].

Утилизация продуктов жизнедеятельности животных посредством обеззараживания и очистки навозных стоков требует разработки более совершенной технологии.

Цель исследований: предложить эффективную технологию переработки навозных стоков животноводства.

Материалы и методы

Для решения задачи очистки и обеззараживания навозных стоков нами совместно с коллективом Приморо-Ахтарского завода агропромышленного оборудования разработана электроозонная технология, включающая в себя два этапа. На первом этапе (механической очистки) навозные стоки подвергаются сепарации и флотации с целью удаления нерастворимых грубодисперсных и частично находящихся в коллоидном состоянии примесей (рис. 1).

После удаления твердой фракции навозные стоки обрабатываются озоном (химическая очистка). Технический результат достигается при тонкодисперсном распылении навозных стоков с диаметром капель от 1,0 до 10,0 мкм в озоновооздушной смеси при концентрации озона 50...500 мг/м³. Обладая высокой реактогенной способностью, озон активно вступает в реакции с различными биологическими объектами, в том числе со структурами клетки [7]. В силу плотной упаковки липидов и белков в биомембранах в роли основной мишени биологического действия озона на клетку выступают плазматические мембраны [9, 10].

Разработанная электроозонная технология очистки навозных стоков осуществляется с помощью установки (рис. 2), состоящей из насоса 1, соединенного с форсунками 2, распыляющими навозные стоки и установленными в камере обработки 3, в которой предварительно создается высокая концентрация озона. Вентилятор 4, подающий озон в камеру обработки 3, соединен с генератором озона 5. Из камеры обработки 3 жидкость попадает в камеру очищенных стоков 6. Для создания озоновой среды внутри камеры обработки используется генератор озона барьерного типа 5.

Эффективность технологического решения заключается в том, что процесс смешивания озона с жидкостью производится не барботированием, а используется тонкодисперсное распыление жидкой фракции стоков в озоновой среде, позволяя значительно увеличить градиент концентрации озона и передачу массы озона через границу раздела фаз и соответственно повысить скорость потребления озона при химических реакциях в навозных стоках [5].



Рис. 1. Вещества, выделенные из навозных стоков после сепарации

Fig. 1. Substances isolated from manure effluents after separation

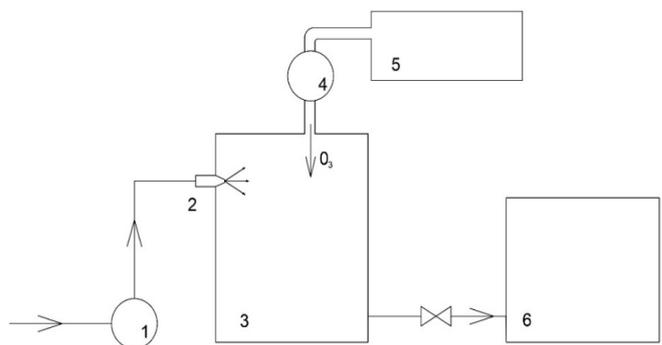


Рис. 2. Технологическая схема озонирования навозных стоков:

- 1 – насос; 2 – форсунка; 3 – камера обработки озоном;
 - 4 – вентилятор; 5 – электроозонатор;
 - 6 – камера очищенных стоков
- Fig. 2. Process scheme of manure effluent ozonization:**
 1 – pump; 2 – nozzle; 3 – ozone treatment chamber; 4 – fan;
 5 – electro-ozonizer; 6 – treated effluent chamber

Эффективность способа достигается за счет увеличения площади границы раздела фаз озон/жидкость. Абсорбция озона в жидкую среду может регулироваться изменением площади поверхности раздела фаз на единицу объема жидкости:

$$\frac{dC}{dt} = K_L \cdot a \cdot (C^* - C) - Q_{O_3}, \quad (1)$$

где K_L – константа, зависящая от коэффициента диффузии и толщины стационарной жидкой пленки, м/с; a – площадь поверхности раздела фаз на единицу объема жидкости, m^{-1} ; C^* – концентрация озона в жидкой фазе, равновесная с газовой фазой, г/л; C – реальная концентрация растворенного озона в жидкости, г/л; Q_{O_3} – скорость потребления озона при химических реакциях в сточных водах, г/л·с.

Скорость абсорбции озона можно определить выражением:

$$Q_{O_3} = K_L \cdot a \cdot C^* = K_L \cdot a \cdot H \cdot \rho_{O_3}, \quad (2)$$

где H – константа Генри, зависящая от свойств обрабатываемой жидкости, г/(л·Па); ρ_{O_3} – парциальное давление озона в газовой среде, Па.

Если обозначить площадь поверхности раздела фаз на единицу объема жидкости при барботировании a_1 , а площадь поверхности раздела фаз – на единицу объема жидкости при распылении a_2 , то значение градиента концентрации озона при адсорбции в жидкость изменится пропорционально соотношению a_2/a_1 . Введем коэффициент G , определяющий данное соотношение.

Определить влияние увеличения поверхности межфазового взаимодействия на эффективность процесса озонирования стоков можно с помощью системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} grad Co_3 = f\left(G; \frac{a_2}{a_1}; \frac{S_{обш.1}}{S_{обш.2}}\right) \\ V_1 = \frac{4}{3} \pi R_1^3; S_1 = \pi d_1^2; n_1 = \frac{1}{V_1} \\ V_2 = \frac{4}{3} \pi R_2^3; S_2 = \pi d_2^2; n_2 = \frac{1}{V_2} \\ S_{обш.1} = S_1 \cdot n_1; S_{обш.2} = S_2 \cdot n_2; G = \frac{S_{обш.2}}{S_{обш.1}} \end{array} \right. \quad (3)$$

где V_1 – объем пузырька, m^3 ; V_2 – объем капли, m^3 ; S_1 – площадь поверхности одного пузырька, m^2 ; S_2 – площадь поверхности одной капли, m^2 ; n_1 – количество пузырьков в $1 m^3$; n_2 – количество капель в $1 m^3$; $S_{обш.1}$ – общая площадь поверхности пузырьков, m^2 ; $S_{обш.2}$ – общая площадь поверхности капель, m^2 ; G – отношение общей площади поверхности капель к общей площади поверхности пузырьков в $1 m^3$.

С целью численного определения коэффициента G производят расчет площади поверхности раздела фаз на единицу объема жидкости при барботировании и при распылении.

При барботационной подаче озоновоздушной смеси в жидкость размеры диаметра пузырьков газа колеблются от 1,0 до 3,0 мм. Условно примем средний диаметр $d_1 = 2,0$ мм ($R_1 = 1,0$ мм), при распылении жидкости в камере обработки тонкодисперсными механическими форсунками диаметр капли имеет размеры от 1,0 до 10,0 мкм. Условно примем средний диаметр $d_2 = 5,5$ мкм ($R_2 = 2,75$ мкм). Средняя плотность сточных вод животноводческих ферм составляет $1,014...1,016$ г/см³, что незначительно отличается от плотности воды.

Экспериментальные исследования проводились с помощью разработанной станции очистки навозных стоков. Ее производительность по очищенным стокам в непрерывном автоматическом режиме составляла $4 m^3/ч$, общая эксплуатационная электрическая нагрузка – 6 кВт.

Забор проб производился в контрольной емкости в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51592-2000 «Вода. Общие требования к отбору проб» и ГОСТ Р 51593-2000 «Вода питьевая. Отбор проб».

Санитарно-микробиологический анализ сточных вод осуществляли по показателям СанПиН 2.1.5.980-00 «Гигиенические требования к охране поверхностных вод»: общие и термотолерантные колиформные бактерии, колифаги, возбудители кишечных инфекций (сальмонеллы, энтеровирусы) и т.д.

Биохимический и микробиологический анализ проб проводились в соответствии с общегосударственными требованиями. Качество обработки сточных вод определялось по микробиологической обсемененности среды и органолептическим показателям.

Результаты и их обсуждение

Расчеты, выполненные на основании разработанной математической модели, показали эффективность тонкодисперсного распыления навозных стоков в камере с озоном по сравнению с барботированием озона в жидкость. Тонкодисперсное распыление навозных стоков в камере с озоном по сравнению с барботированием озона в жидкость позволяет в 360 раз увеличить границу раздела фаз озон/жидкость и значение градиента концентрации озона при адсорбции в жидкость, что повышает эффективность обработки жидкости без повышения энергозатрат.

Для проведения эксперимента на базе Приоро-Ахтарского завода агропромышленного

оборудования была сконструирована установка «Станция очистки навозных стоков» (рис. 3). Экспериментальные исследования по влиянию озонозудушной обработки на микробиологическую и биологическую зараженность и органолептические свойства проводились в течение 2021–2023 гг. на свиноводческом комплексе ООО «Новые аграрные технологии» хутора «Бейсужек второй».

Навоз из корпусов свиного комплекса сливался в навозоприемник и в дальнейшем подвергался разделению шнековым сепаратором с размером ячейки сита 0,5 мм на две фракции: жидкую, содержащую 1,46% сухих веществ (рис. 1), и твердую, включающую в себя взвешенные вещества и органические загрязнения с остаточной связанной влагой (порядка 70%).

Твердая фракция перевозилась на специальные площадки компостирования для обеззараживания, дегельминтизации и удаления запаха. Жидкая фракция сливалась в бетонный бункер-накопитель. На бетонном перекрытии бункера-накопителя была установлена станция очистки навозных стоков.

Из бункера-накопителя жидкость с помощью погружного насоса подавалась по гибкому трубопроводу через быстроразъемные соединения в приемный трубопровод станции очистки. Производительность насоса составляла 8 м³ (рис. 4).

В камерах экспериментальной установки жидкая фракция очищалась пятикратно флотационным способом очистки сточных вод. Выделенные из навозных стоков механические включения и коллоидные составляющие возвращались в навозоприемник и впоследствии сепарировались в составе твердой фракции.

Результаты проведенных исследований (табл.) показали снижение содержания взвешенных и коллоидных частиц, по большей части, вероятно, состоящих из органических веществ. Механическая обработка снижает нагрузку на реакцию окисления с озоном, но не приводит к снижению бактерицидной и прочей обсемененности сточных вод. При этом на первом этапе очистки в навозоприемнике и бункере-накопителе отжатой жидкости создавалась специфическая поверхностная пена, которая препятствовала



Рис. 3. Станция очистки навозных стоков:
1 – электроозонирующий блок; 2 – камера обработки навоза

Fig. 3. Station of manure effluent treatment:
1 – electro-ozonizer; 2 – manure treatment chamber



Рис. 4. Погружной насос и подключение подачи и слива
Fig. 4. Submersible pump and its supply and drain cross-connection

выделению аммиака и других летучих веществ в атмосферу, существенно снижая специфический запах навоза на всем участке накопления и разделения навоза (рис. 1).

После второго этапа (озонирования) жидкая фракция сливались в накопитель очищенных стоков или в контрольную емкость (рис. 5).

Станция очистки навозных стоков позволяет в непрерывном режиме без дополнительного внесения химических препаратов, вредных сбросов и сменных фильтров в течение проточной обработки (10-15 мин) получить результат, аналогичный 6-12-месячному процессу отстаивания в соответствующих накопительных сооружениях.



Рис. 5. Бетонный накопитель стоков и контрольная емкость (2,14 м³)

Fig. 5. Concrete effluent accumulator and control tank (2.14 m³)

Характеристики навозных стоков

Таблица

Characteristics of manure effluents

Table

| Критерий оценки | Навоз натуральный | | Навозные стоки после сепаратора | Навозные стоки после станции | Норма очистки | | Нормативные документы на метод измерений |
|---------------------------|----------------------|-------------|---------------------------------|------------------------------|---------------|-----------------------|--|
| | среднестатистический | фактический | | | НТП 17-99 | СанПиН 2.1.7.573-1996 | |
| 1 | 2 | | 3 | 4 | 5 | | 6 |
| Вода | 90,1 | | 98,6 | | | | ПНД Ф 14.1:2.110-97 |
| Взвешенные вещества | 9,9 | 3,68 | 1,4 | 0,40(0,10) | 0,12 | | ПНД Ф 14.1:2.110-97 |
| Коллоидные вещества | 1,8 | | 0,3 | | | | |
| 2. Химический состав | | | | | | | |
| pH | | 7,70 | | 7,90 | | | ФР.1.31.2007.03794 (ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97) |
| Азот | | | | | | | |
| - общий | 0,67 | 1,380 | | 0,20(0,10) | 0,12 | | |
| NH_4 – азот аммонийный | | 1,742 | | | 0,08 | | ФР.1.31.2010.07603 |
| NO_3 – азот нитратный | | 0,010 | | | 0,02 | | ФР.1.31.2005.01724 |
| NO_2 – азот нитритный | | 0,011 | | | 0,02 | | ПНД Ф 14.1:2:4.3-95 |
| Фосфор общий (P_2O_5) | 0,44 | 0,582 | 0,34 | 0,02 | 0,09 | | ПНД Ф 14.1:2.106-97 |
| Фосфат-ион | | 0,172 | | | | | ПНД Ф 14.1:2:4.112-97 |
| Калий (K_2O) | 0,54 | 1,940 | | 0,03 | 0,21 | | ПНД Ф 14.1:2:4.167-2000 |

Окончание табл.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--|
| 3. Органолептические показатели | | | | | |
| Запах | | | | | |
| Классификация, условное обозначение | Навозный, <i>Dp</i> | Навозный, <i>Dp</i> | Навозный, <i>Dp</i> | Навозный, <i>Dp</i> | |
| Интенсивность, балл | Очень сильный, 5 | Очень сильный, 5 | Очень сильный, 5 | Слабый, 2 | |
| Мутность | Сильная | Сильная | Сильная | Мутная | |
| Цветность | Высока | Высока | Высока | Средняя | |
| Прозрачность | Сильно мутная | Сильно мутная | Сильно мутная | Мутная | |
| 4. Микробиологические показатели, тыс. КоЕ/г | | | | | |
| Аэробные бактерии | 7,5 × 10 | | 7,5 × 10 | нет | Недопустимы |
| Анаэробные бактерии | 2 × 10 | | 2 × 10 | нет | Недопустимы |
| Колиформы | 3,8 × 10 | | 3,8 × 10 | нет | Недопустимы |
| Энтерококки | 1,2 × 10 | | 1,2 × 10 | нет | Недопустимы |
| Стафилококки | 0,5 × 10 | | 0,5 × 10 | нет | Недопустимы |
| Лактобациллы | 2,4 × 10 | | 2,4 × 10 | нет | Недопустимы |
| Аэробные споры | 4,9 × 10 | | 4,9 × 10 | нет | Недопустимы |
| Клостридии | 1,8 × 10 | | 1,8 × 10 | нет | Недопустимы |
| Сальмонеллы | 4,0 × 10 | | 4,0 × 10 | нет | Недопустимы |
| Грибы | 3,1 × 10 | | 3,1 × 10 | нет | Недопустимы |
| 5. Ветеринарные требования | | | | | |
| Наличие патогенных и болезнетворных микроорганизмов, кл/г, в том числе энтеробактерий (патогенных серовариантов кишечной палочки, протеи, сальмонелл), энтерококков (стафилококков, бацилл, клостридий, энтеровирусов) | да | да | Да | нет | Недопустимы |
| Наличие жизнеспособных яиц и личинок гельминтов, экз/кг, в том числе трематод, цестод | да | да | Да | нет | Недопустимы |
| Цисты кишечных патогенных простейших, экз/100 г | да | да | Да | нет | Недопустимы |
| Наличие личинок и куколок синантропных мух, экз/кг | да | да | Да | нет | Недопустимы |
| 6. Потребность кислорода, мг/л | | | | | |
| Биохимическая потребность кислорода, полная | 99792 | 35521 | | | 75 |
| Биохимическая потребность кислорода, 5 сут. | | 24840 | | | |
| Химическое потребление кислорода к массе органического вещества | 118800 | 40800 | | | 300 |
| | | | | | Пр. МПР № 87 от 13.04.2009 г. |
| | | | | | ФР.1.31.2007.03796 (ПНД Ф 14.1:2:3:4.123-97) |
| | | | | | ПНД Ф 14.1:2:4.190-03 |

Выводы

1. Расчеты, выполненные на основании разработанной математической модели, показали эффективность тонкодисперсного распыления навозных стоков в камере с озоном по сравнению сбарботированием озона в жидкость. Граница раздела фаз озон/жидкость и значение градиента концентрации озона при адсорбции в жидкость увеличились в 360 раз, что позволяет повысить эффективность обработки жидкости без повышения энергозатрат.

2. Проведенный химический, органолептический и микробиологический анализ показал высокую эффективность разработанного метода и оборудования для очистки сточных вод свиноводческого комплекса.

3. Проточное озонирование сточных вод в течение 10-15 мин позволяет получить результат, аналогичный 6-12-месячному отстаиванию стоков в накопительных сооружениях.

4. Использование станции очистки позволило сократить расстояние распространения навозного запаха от зоны накопления до 50 м, при традиционной технологии запах ощущается при дальности от 1 км и более. Отпадает необходимость поверхностного закрытия накопителей или пленочных лагун дорогостоящими приспособлениями.

5. Утилизация продуктов жизнедеятельности животных снимает экологические проблемы эксплуатации животноводческих комплексов в непосредственной близости (до 300 м) с населенными пунктами, а также при ограниченных площадях сельскохозяйственных полей орошения или их отсутствии, при близком расположении естественных водоемов или высоких грунтовых водах.

6. Разработанная электроозонная технология очистки навозных стоков позволяет улучшить экологическую обстановку на животноводческих хозяйствах.

Список источников

1. Селюков А.В., Семенов М.Ю. Доочистка биологически очищенных городских сточных вод озонированием // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 2. С. 41-45. <https://doi.org/10.35776/VST.2022.02.06>
2. Lim S., Shi J.L., Gunten U., McCurry D.L. Ozonation of organic compounds in water and wastewater: A critical review. *Water Research*. 2022;213:118053. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118053>
3. Mireia M.E. Ozonation of municipal wastewater for water reuse. Programa de doctorat de ciènciatecnologiadel materials. Published Universitat de Barcelona, 2017. 219 p. URL: <http://hdl.handle.net/10803/402548>
4. Нормов Д.А., Шевченко А.А., Федоренко Е.А. Озон против микотоксикозов фуражного зерна // Сельский механизатор. 2009. № 4. С. 24-25. EDN: JXWTD
5. Способ очистки навозных стоков: Патент RU2688610 C1, МПК C02F 9/08, C02F 1/24, C02F 1/38. № 2018124118 / А.А. Азарян, Д.А. Нормов, М.Д. Нормова и др.; заявл. 02.07.2018; опубл. 21.05.2019. EDN: HYRANM
6. Lazarova V., Liechti P. – A., Savoye P., Hausler R. Ozone disinfection: main parameters for process design in wastewater treatment and reuse. *Journal of Water Reuse and Desalination*. December 2013;3(4):337-345. <https://doi.org/10.2166/wrd.2013.007>
7. Ozone and related oxidants for water treatment. Programme and Book of Abstracts. International ozone association. Published Tongji University. Shanghai, China, December 2-3, 2013. URL: <https://www.ioa-ea3g.org/fileadmin/documents/IOA-Conference-Shanghai-2013-Book-of-abstracts.pdf>
8. Wang J., Chen H. Catalytic ozonation for water and wastewater treatment: Recent advances and perspective. *Science of The Total Environment*. 2020;704:135249. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135249>
9. Нормов Д.А., Курзин Н.Н., Шевченко А.А. Влияние воздействия озонозодушной смеси на содержание вредоносной микрофлоры в кормах // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 47. С. 168-171. EDN: TGTVOF
10. Способ обеззараживания животноводческих помещений от возбудителей стафилококкоза: Патент RU2554743 C1, МПК A61L 9/015. № 2014108333/15 / В.И. Терехов, Д.А. Нормов, И.В. Сердюченко и др.; заявл. 04.03.2014; опубл. 27.06.2015. EDN: ZFINMD

References

1. Seliukov A., Semenov M. Tertiary treatment by ozonation of municipal wastewater after biological treatment. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2022;2:41-45. (In Russ.) <https://doi.org/10.35776/VST.2022.02.06>
2. Lim S., Shi J.L., Gunten U., McCurry D.L. Ozonation of organic compounds in water and wastewater: A critical review. *Water Research*. 2022;213:118053. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118053>
3. Mireia M.E. Ozonation of municipal wastewater for water reuse. Programa de doctorat de ciènciatecnologiadel materials. Published Universitat de Barcelona, 2017. 219 p. URL: <http://hdl.handle.net/10803/402548>
4. Normov D.A., Shevchenko A.A., Fedorenko E.A. Ozone against microtoxoses of feed grain. *Selskiy Mekhanizator*. 2009;4:24-25. (In Russ.)
5. Azaryan A.A., Normov D.A., Normova M.D., Normova N.D., Pozhidaev D.V. Method for cleaning manure drains: patent RU2688610 C1, МПК C02F 9/08, C02F 1/24, C02F 1/38, 2019. (In Russ.)
6. Lazarova V., Liechti P. – A., Savoye P., Hausler R. Ozone disinfection: main parameters for process design in wastewater treatment and reuse. *Journal of Water Reuse and Desalination*. December 2013;3(4):337-345. <https://doi.org/10.2166/wrd.2013.007>
7. Ozone and related oxidants for water treatment. Programme and Book of Abstracts. International ozone association. Published Tongji University. Shanghai, China, December 2-3, 2013. URL: <https://www.ioa-ea3g.org/fileadmin/documents/IOA-Conference-Shanghai-2013-Book-of-abstracts.pdf>
8. Wang J., Chen H. Catalytic ozonation for water and wastewater treatment: Recent advances and perspective. *Science of The Total Environment*. 2020;704:135249. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135249>
9. Normov D.A., Kurzin N.N., Shevchenko A.A. Impact of the ozone-air mixture on the content of pathogenic microflora in feed. *Trudy Kubanskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2014;47:168-171. (In Russ.)
10. Terekhov V.I., Normov D.A., Serdjuchenko I.V., Bojko V.S., Abaui M.M. Method for livestock houses disinfection from staphylococcosis agents: patent RU2554743 C1, МПК A61L 9/015. No.2014108333/15, 2015. (In Russ.)

Информация об авторах

Дмитрий Александрович Нормов¹, д-р техн. наук, профессор; danormov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3255-4334>
Александр Ашотович Азарян², аспирант, ассистент; sashiko.az@yandex.ru
Андрей Александрович Цедяков³, канд. техн. наук, доцент; andrey.tsedyakov@mail.ru
Дмитрий Сергеевич Карлаков⁴, аспирант, ассистент; koomarskij@gmail.com
^{1,3,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49
² Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина; 350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, 13

Вклад авторов

Д.А. Нормов – формулирование основной концепции исследования;
А.А. Азарян – описание результатов и формирование выводов исследования, подготовка начального варианта текста;
А.А. Цедяков – разработка методологии исследования
Д.С. Карлаков – представление результатов, подготовка графических материалов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 27.08.2024, после рецензирования и доработки 11.09.2024; принята к публикации 16.09.2024

Author Information

Dmitry A. Normov¹, DSc (Eng), Professor; danormov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3255-4334>
Aleksandr A. Azaryan², postgraduate student, Assistant Professor; sashiko.az@yandex.ru
Andrey A. Tsedyakov³, CSc (Eng), Associate Professor; andrey.tsedyakov@mail.ru
Dmitry S. Karlakov⁴, postgraduate student, Assistant Professor; koomarskij@gmail.com
^{1,3,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, 49, Timiryazevskaya Str.
² Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin; 350044, Russian Federation, Krasnodar, 13, Kalinina Str.

Author Contribution

D.A. Normov – conceptualization;
A.A. Azaryan – writing – results and discussion, conclusions, original draft preparation;
A.A. Tsedyakov – research methodology;
D.S. Karlakov – presentation of results, visualization

Conflict of interests

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

Received 27.08.2024, Revised 11.09.2024; Accepted 16.09.2024

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 378.14:004

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-83-89>

Педагогические условия организации смешанного обучения в вузе с применением систем управления обучением

Л.И. Назарова^{1✉}, *Я.С. Чистова*², *Е.П. Январева*³^{1,2,3} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ nazarova@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-5698-6284>² energo-chistova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3713-8965>³ ka.yanvareva@inbox.ru; <http://orcid.org/0009-0008-9928-8433>

Аннотация. В высшем образовании получила распространение технология смешанного обучения, сочетающая в себе электронное обучение и аудиторную работу. Смешанное обучение способствует внедрению вариативных форм и способов взаимодействия студентов с преподавателем, взаимодействию участников образовательного процесса с контентом, расширению инструментария педагога при работе со студентами. С целью выявления и обоснования педагогических условий эффективной организации смешанного обучения в вузе рассмотрены сущность и основные компоненты технологии смешанного обучения, показаны возможности ее реализации с использованием систем управления обучением (LMS). Системы управления обучением классифицируются по типам лицензирования, набору функциональных возможностей, модульному критерию, по критерию «Требования заказчика», физическому расположению. Представлены особенности и возможности одной из наиболее распространенных систем управления обучением – LMS MOODLE. Обоснованы педагогические условия реализации технологии смешанного обучения в вузе: проработка учебных планов и программ обучения, соотнесение возможностей их реализации с применением технологии смешанного обучения; грамотная организация курса, его структурирование и активное обновление контента курсов LMS для обеспечения их качества и актуальности; обеспечение своевременной поддержки преподавателем коммуникации и обратной связи с обучающимися; разработка и применение специальных методов контроля и оценки образовательных результатов для осуществления надежной и валидной диагностики учебных достижений студентов, на основании которой реализуется оперативная обратная связь; разработка качественного методического обеспечения для педагогов по организации и осуществлению образовательного процесса в новых условиях и методических материалов для студентов; обеспечение высокой степени готовности обучающихся и педагогов к реализации обучения в новом формате, их обучение и поддержка, развитие цифровых компетенций.

Ключевые слова: смешанное обучение, модели смешанного обучения, модель «Перевернутый класс», педагогические условия, система управления обучением, LMS MOODLE

Для цитирования: Назарова Л.И., Чистова Я.С., Январева Е.П. Педагогические условия организации смешанного обучения в вузе с применением систем управления обучением // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26, № 5. С. 83-89. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-83-89>

ORIGINAL ARTICLE

Pedagogical conditions for organizing blended learning at a university using learning management systems

L.I. Nazarova^{1✉}, *Ya.S. Chistova*², *E.P. Yanvareva*³^{1,2,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ nazarova@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-5698-6284>² energo-chistova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3713-8965>³ ka.yanvareva@inbox.ru; <http://orcid.org/0009-0008-9928-8433>

Abstract. In higher education, blended learning technology combining e-learning and classroom activities has become widespread. Blended learning contributes to the introduction of variable forms and ways of interaction

between students and teachers, interaction of study process participants with content, and the expansion of the teacher's toolkit when working with students. In order to identify and justify the pedagogical conditions of effective organization of blended learning in universities, the authors have described the essence and main components of blended learning technology, and the options of its implementation using learning management systems (LMS). LMS can be classified as to types of licensing, a set of functionality, the module-based criterion, the "customer requirement" criterion, and physical location. The article presents and identifies features and capabilities of one of the most common learning management systems – LMS MOODLE. The authors reveal pedagogical conditions for the successful implementation of blended learning technology at a university: development of a syllabus and training curricula, correlation of the possibilities of their implementation with the use of blended learning technology; competent course design and implementation, as well as active updating of the content of LMS courses to ensure their quality and relevance; providing timely teacher support for communication and feedback with students; development and application of special methods for monitoring and assessing educational results to carry out reliable and valid diagnostics of learning outcomes and provide prompt feedback; development of high-quality methodological support for teachers on the organization and implementation of the educational process in new conditions and produce methodological materials for students; ensuring a high degree of readiness of students and teachers to implement training in a new format, organize their training and support end contribute to the development of digital competences.

Keywords: blended learning, blended learning models, Flipped Classroom model, digital transformation of education, learning management system, LMS MOODLE

For citation: Nazarova L.I., Chistova Ya.S., Yanvareva E.P. Pedagogical conditions for organizing blended learning at a university using learning management systems. *Agricultural Engineering (Moscow)*. (In Russ.). 2024;26(5):83-89. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-83-89>

Введение

Цифровая трансформация образования сопровождается стремительным развитием информационных и коммуникационных технологий. В работе образовательных организаций на всех уровнях образования получают все более широкое распространение электронное обучение и дистанционные образовательные технологии¹ [1].

Необходимость быстрой переориентации на дистанционный формат ускорила процесс цифровой трансформации образования [2-4]. Преподавателям пришлось оперативно совершенствовать свои цифровые компетенции, а некоторым – формировать цифровую грамотность [5]. Новые компетенции оказались весьма полезными преподавателям и в процессе традиционного очного формата обучения.

В новой цифровой реальности профессионального образования особенно актуальной педагогической технологией стало смешанное обучение, сочетающее в себе электронное обучение и аудиторную работу [6-8]. Такой формат обучения позволяет вовлекать студентов в учебную деятельность, повышать их мотивацию, выстраивать обучение в соответствии с индивидуальными образовательными потребностями и возможностями обучающихся. Смешанное

обучение способствует внедрению вариативных форм и способов взаимодействия студентов с преподавателем, взаимодействию участников образовательного процесса и контента, расширению инструментария педагога при работе со студентами.

Цель исследований: выявление и обоснование педагогических условий эффективной организации смешанного обучения в вузе.

Материалы и методы

Проведен анализ научно-педагогической литературы по проблемам цифровой трансформации образования, технологии смешанного обучения, системам управления обучением. Проанализирован опыт применения смешанного обучения в вузах. В исследованиях использованы такие методы, как наблюдение, анкетирование, обобщение и интерпретация данных. Основными методологическими подходами в исследованиях являются системный, личностно ориентированный и компетентностный подходы.

Результаты и их обсуждение

В образовательном процессе высших учебных заведений осуществляются апробация и изучение различных вариаций интеграции элементов электронного и аудиторного взаимодействия. Реализация полноценной модели смешанного обучения сочетает традиционные занятия и работу студентов в электронном учебном курсе. В качестве источника дополнительного материала и ресурсов могут

¹ Роберт И.В., Мухаметзянов И.Ш., Лопанова Е.В. Цифровая трансформация образования: теория и практика: Монография. Омск: Омская гуманитарная академия, 2022. 180 с. EDN: QQRJXW.

использоваться электронные курсы. Может осуществляться замена учебной дисциплины электронным курсом, разработанным на базе сторонней образовательной организации [9-11].

Исследователи выделяют множество вариантов реализации смешанного обучения – моделей. Наиболее популярными считаются ротационная модель (Rotation Model), гибкая модель (Flex Model), жесткая модель (Face-to-Face Driver), модель «Смешай сам» (Self-Blend Model), онлайн-лаборатория (Online Lab), обобщающая виртуальная модель (Online Driver Model) и др. [10, 12].

Согласно сложившимся представлениям технология смешанного обучения предполагает использование трех основных компонентов:

1) традиционное личное взаимодействие участников образовательного процесса, реализующееся в очном формате в процессе аудиторных занятий, консультирования, непосредственной проверки знаний и умений;

2) интерактивное взаимодействие, опосредованное возможностями различных информационных и коммуникационных технологий (обращение обучающихся к разнообразному образовательному контенту и осуществление личного опосредованного взаимодействия);

3) самообразование – компонент, отвечающий за возможность обучающихся самостоятельно и инициативно расширять образовательный контент, осуществлять взаимодействие и пр. [9, 13].

Основной технологической базой, позволяющей использовать технологию смешанного обучения в образовательной практике, являются современные системы управления обучением Learning Management Systems (LMS), реализующие дистанционные формы обучения² [11]. Существует ряд таких систем, например: WebCT, ePathLearning, Desire2Learn, BlackBoard, ILLIAS, Top-Class, e-University, Claroline, MOODLE и др. Среди отечественных программных продуктов известны «Прометей», «ИнтраЗнание», «Батисфера» и др. [14].

Информационные системы классифицируются по различным признакам. Например, по типу лицензирования можно выделить свободно распространяемые бесплатные информационные системы обучения, платные системы и частично платные. В зависимости от набора функциональных возможностей информационные системы можно подразделить

на обеспечивающие поддержку всего образовательного процесса (проведение аудиторных занятий, создание учебных групп, выполнение проектов, выполнение тестирования и практических заданий и т.д.) и информационные системы, предоставляющие лишь образовательный контент и возможность тестирования. Согласно модульному критерию LMS можно подразделить на автономные, представляющие собой отдельное самостоятельное приложение с полным набором необходимых функций и инструментов, и модульные, состоящие из отдельных независимых модулей или подсистем. По критерию «Требования заказчика» LMS подразделяются на типовые (готовые) или разработанные под конкретное учреждение. По физическому расположению информационные системы бывают локальными, серверными и облачными³ [14].

Выбором многих образовательных организаций России стала LMS MOODLE (Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment). Ее главными преимуществами являются отсутствие лицензионных требований, бесплатное обновление и доступ к программам, наличие открытого программного кода, позволяющего образовательным организациям вносить изменения, совершенствовать систему и управлять всем образовательным процессом, органично встраивая данную систему в электронную информационно-образовательную среду [15].

Для реализации смешанного обучения LMS MOODLE располагает рядом таких возможностей, как:

1. Создание и управление курсами (определение их структуры, содержания и цели, организация взаимодействия между преподавателями и студентами).

2. Обеспечение доступа к материалам различного формата (предоставление инструментов для размещения учебных материалов – текстов, видео- и аудио-файлов, презентаций и других ресурсов).

3. Организация взаимодействия (поддержание взаимосвязи преподавателей и студентов через чаты, блоги и вики, которые позволяют студентам задавать вопросы, получать обратную связь от преподавателей и обсуждать материалы курса).

4. Мониторинг успеваемости (отслеживание прогресса студентов включая тесты, задания, опросы и оценку активности студентов в курсе).

5. Гибкость и адаптивность (возможность настройки в соответствии с потребностями и предпочтениями преподавателей и студентов).

² Королева Н.Ю. Технология разработки учебного курса в системе управления обучением (LMS MOODLE). Ч.1. Основы разработки для начинающих: Учебное пособие. Мурманск: Мурманский арктический государственный университет, 2020. 103 с. EDN: BMDSNT.

³ Королева Н.Ю. Технология разработки учебного курса в системе управления обучением (LMS MOODLE). Ч.1. Основы разработки для начинающих: Учебное пособие. Мурманск: Мурманский арктический государственный университет, 2020. 103 с. EDN: BMDSNT.

Смешанное обучение с использованием LMS не будет результативным в случаях: если информационно-образовательная среда вузов не готова к поддержке целостного процесса обучения в смешанном формате; при недостаточном обеспечении смешанного обучения учебно-методическими материалами; при неготовности участников образовательного процесса к обеспечению смешанного формата обучения, в отсутствие осознания его перспективности и необходимости использования; при отсутствии достаточного количества высококвалифицированных специалистов для решения многофакторных задач цифровой трансформации университета [9].

При наличии даже некоторых из этих негативных факторов эффективность обучения катастрофически снизится несмотря на все возможности и достоинства технологии смешанного обучения и ее реализации с помощью LMS.

Для успешной реализации смешанного обучения с использованием систем управления обучением необходимо выполнить ряд условий.

Первым условием является тщательная проработка учебных планов и программ обучения, соотношение возможностей их реализации с применением технологии смешанного обучения.

Проектирование учебного процесса в смешанном формате обучения осуществляется в соответствии с разными моделями. Большую популярность получила модель «Перевернутый класс», при использовании которой планирование занятий происходит по схеме «Преаудиторная работа – Аудиторное занятие – Постаудиторная работа».

Преаудиторная работа предполагает предварительную подготовку обучающихся к аудиторным занятиям включая работу с рекомендованными источниками и самостоятельный поиск информации. Аудиторное занятие – это, как правило, практическое занятие, которое проводится в аудитории «офлайн» и направлено на углубление и расширение знаний, полученных самостоятельно, и на формирование базовых навыков применения этих знаний. Также на занятии может происходить обсуждение полученных результатов с другими обучающимися. Постаудиторная работа включает в себя закрепление учебного материала, в том числе по индивидуальным образовательным маршрутам, обмен опытом, расширение полученных знаний и самооценку достигнутых результатов (рис.).

Вторым условием является грамотная организация курса, его структурирование, а также активное обновление контента курсов LMS для обеспечения их качества и актуальности. От наполнения и структурной организации курса во многом зависят успешность освоения дисциплины, усвоение информации обучающимися. Электронная поддержка смешанного обучения позволяет обучающимся обращаться к разным источникам, знакомиться с различными точками зрения и интерпретациями, сравнивать их. Поэтому контент электронных курсов, использующих технологию смешанного обучения, должен быть не просто качественным и актуальным, но «самодополняющимся» и «саморазвивающимся».

Третье условие заключается в обеспечении своевременной поддержки коммуникации и обратной связи преподавателя с обучающимися. Использование

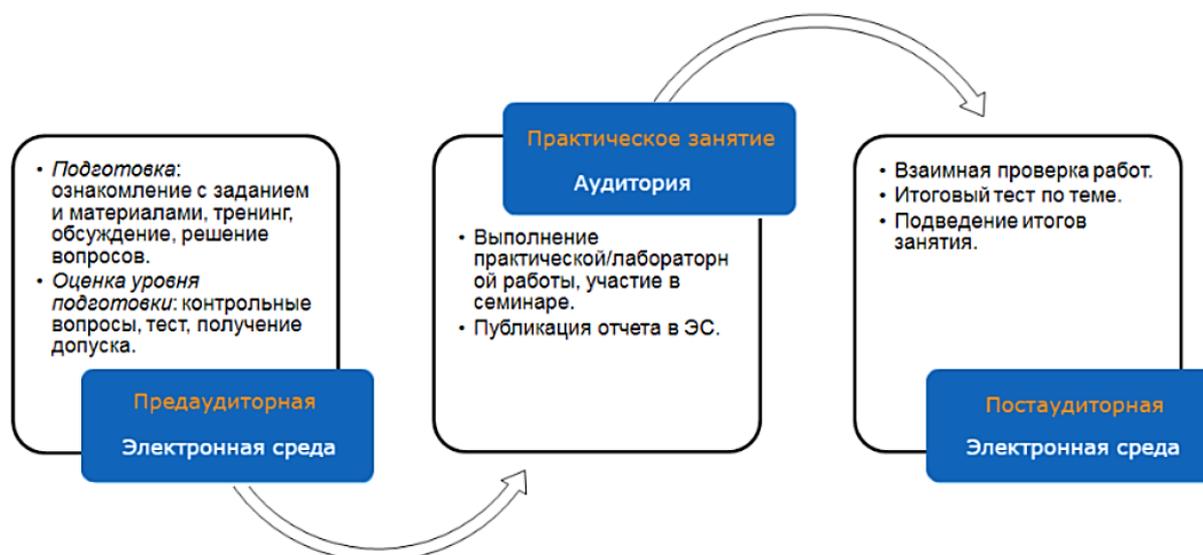


Рис. Организация учебно-познавательной деятельности по технологии смешанного обучения (модель «Перевернутый класс»)
Fig. Organization of learning-and-cognitive activity using the blended learning technology (the 'Flipped Classroom' model)

чатова, форумов и видеоконференций позволит обучающимся оперативно получать необходимую консультацию преподавателя и связываться с другими обучающимися несмотря на географическую удаленность и другие трудности.

Четвертым условием являются разработка и применение специальных методов контроля и оценки образовательных результатов для осуществления надежной и валидной диагностики учебных достижений студентов, на основании которой реализуется оперативная обратная связь [8, 16]. В смешанном формате значительная часть времени отводится на дистанционное обучение, что снижает возможности преподавателя контролировать образовательный процесс и проводить индивидуальные консультации.

Также необходимы качественное методическое обеспечение педагогов по организации и осуществлению образовательного процесса в новых условиях и методические материалы для студентов, которые помогут им разобраться в особенностях организации обучения и работе с электронными курсами [13].

Следующими важными условиями являются высокая степень готовности обучающихся и педагогов к реализации смешанного обучения, их обучение и поддержка, развитие цифровых компетенций. Это требование обусловлено трудностями, связанными с самостоятельным планированием и распределением учебной нагрузки обучающимися. На обучающихся возлагается большая ответственность за собственные результаты обучения.

В свою очередь, педагоги тоже сталкиваются с трудностями. Им предстоит принять новую роль (роль «ментора» сменить на «тьютора, консультанта, фасилитатора»), освоить новые формы взаимодействия со студентами в электронно-образовательной среде вуза. Педагог должен уметь создавать электронные образовательные ресурсы на учебно-методическом портале, грамотно интегрировать их в образовательный процесс [4, 5, 17].

Опрос преподавателей РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева (от 70 до 220 респондентов), проводившийся ежегодно в 2019-2023 гг., показал, что общее отношение преподавателей к работе с LMS MOODLE улучшилось (по 10-балльной шкале средняя оценка выросла с 5,3 до 8,5); свою цифровую компетентность педагоги тоже стали оценивать выше (средняя оценка выросла с 4,8 до 7,7, на что значительно повлиял переход обучения в дистанционный формат в период пандемии ковида-19).

Для организации качественного обучения в условиях цифровой трансформации образовательным организациям не обойтись без высококвалифицированных специалистов, способных решать задачи

функционирования и развития электронной информационно-образовательной среды университета. На них возложены обязанности по проверке, наладке и развитию электронной информационной-образовательной среды вуза, разработке качественных электронных курсов в LMS. Чаще всего ведущие преподаватели самостоятельно разрабатывают электронные образовательные ресурсы по своим дисциплинам, и эта задача включена как один из нормативных показателей в эффективный контракт преподавателя вуза. Это позволяет педагогам лучше ориентироваться в курсе, настраивать его «под себя». Однако этот аспект можно рассматривать не только как возможность, но и как проблему. Организация и представление контента курса, разработка заданий, настройка параметров различных элементов курса реализуются, как правило, на минимально необходимом уровне. Очевидно, что в таком случае невозможно полностью раскрыть потенциал электронного курса. Поэтому разработанные педагогами материалы целесообразно предоставлять специалистам для доработки и представления их в электронном контенте курса – например, с помощью LMS MOODLE.

При создании электронных учебных курсов оптимальной представляется организация командной работы в соответствии с Agile-подходом – гибким подходом к управлению проектами, часто применяемым в небольших командах [18]). Работа команды организована короткими итерациями по две-три недели. Внутри каждой итерации собрана серия задач: анализ, проектирование, непосредственно работа и тестирование. После каждой итерации команда анализирует результаты и меняет приоритеты для следующего цикла [19].

Еще одним важнейшим условием обеспечения высокого качества образовательного процесса, реализуемого с помощью технологии смешанного обучения, является применение качественного современного оборудования и программного обеспечения. Материально-техническая база должна постоянно совершенствоваться. Руководству образовательной организации необходимо создать максимально комфортные условия работы в электронно-образовательной среде студентов, преподавателей, административных работников.

Выводы

В условиях цифровой трансформации образования особенно актуальной становится технология смешанного обучения, совмещающая онлайн-обучение и очное (традиционное) обучение. Основной технологической базой, позволяющей использовать эту технологию в образовательной практике,

может являться система управления обучением LMS MOODLE. Она обладает широким спектром возможностей и инструментов, позволяющих качественно организовать образовательный процесс.

Список источников

1. Сараев А.И., Тимирязева А.В., Кривчанский И.Ф. Актуальные вопросы информатизации профессионального образования // День местного самоуправления: Сборник статей научно-практической конференции. М.: Перо, 2021. С. 208-212. EDN: KGBSDC
2. Вайндорф-Сысоева М.Е., Панькина Е.В. Специфика учебно-педагогического взаимодействия в цифровой образовательной среде // Профессиональное образование в России и за рубежом. 2021. № 2 (42). С. 92-100. EDN: JMEQDZ
3. Занфирова Л.В., Коваленок Т.П., Сергеева Н.А., Чистова Я.С. Онлайн-образование: мотивация и отношение к учению студентов разных курсов // Образовательное пространство в информационную эпоху: Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Москва, 8 июня 2021 г. М.: ФГБНУ «Институт стратегии развития образования РАО», 2021. С. 192-199. EDN: DWWGTD
4. Кубрушко П.Ф., Еприкян Д.О. Подготовка педагогов профессионального обучения к работе в электронной информационно-образовательной среде // Муниципальное образование: инновации и эксперимент. 2022. № 4 (85). С. 20-25. https://doi.org/10.51904/2306-8329_2022_85_4_20
5. Шингарева М.В., Атапина Ю.А. Подготовка будущих педагогов к профессиональной деятельности в условиях цифровой образовательной среды // Инновации в профессиональном и профессионально-педагогическом образовании: Материалы 26-й Международной научно-практической конференции, г. Екатеринбург, 20-21 апреля 2021 г. Екатеринбург: Российский государственный профессионально-педагогический университет, 2021. Т. 1. С. 123-126. EDN: IFDNGZ
6. Афзалова А.Н. Смешанное обучение в вузе // Проблемы современного педагогического образования. 2021. № 73-1. С. 32-34. EDN: JYJCM L
7. Назарова Л.И., Чистова Я.С., Гриценко Н.С. Смешанное обучение как механизм цифровой трансформации профессионального образования // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 76-79. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-76-79>
8. Alipichev A., Nazarova L., Shingareva M., Siman A. Improving the credibility of pedagogical diagnostics in E-Learning. CEUR Workshop Proceedings. 2020;2861:203-209. EDN: LGLVAA
9. Логинова А.В. Смешанное обучение: преимущества, ограничения и опасения // Молодой ученый. 2015. № 7 (87). С. 809-811. EDN: TPPOAV
10. Плетяго Т.Ю., Остапенко А.С., Антонова С.Н. Педагогические модели смешанного обучения в вузе: обобщение опыта российской и зарубежной практики // Образование и наука. 2019. Т. 21, № 5. С. 112-129. <https://doi.org/10.17853/1994-5639-2019-5-113-130>
11. Шкунова А.А., Прохорова М.П., Лабазова А.В., Белоусова К.В., Булганина А.Е. Реализация технологии смешанного обучения средствами LMS MOODLE // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. 2019. № 2 (36). С. 108-115. EDN: RBNAMG
12. Блинов В.И., Есенина Е.Ю., Сергеев И.С. Модели смешанного обучения: организационно-дидактическая типология // Высшее образование в России. 2021. Т. 30, № 5. С. 44-64. <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2021-30-5-44-64>
13. Козлов О.А., Новикова И.В., Мацуй Н.В., Положенцева И.В. Развитие смешанного обучения в образовательных

При введении смешанного формата вузы сталкиваются с трудностями, однако рассмотренные факторы и условия гарантируют успешное применение данной технологии в учебном процессе.

References

1. Saraev A.I., Timiryazeva A.V., Krivchansky I.F. Current issues of informatization of vocational education. *Local Government Day: proceedings of the scientific and practical conference*. Moscow, 2021:208-212. (In Russ.)
2. Weindorf-Sysoeva M.E., Pankina E.V. The specifics of educational and pedagogical interaction in the digital educational environment. *Professional Education in Russia and Abroad*, 2021;2(42):92-100. (In Russ.)
3. Zanfirova L.V., Kovalenok T.P., Sergeeva N.A., Chistova Ya.S. Online education: motivation and attitude to learning of students of different courses. *Obrazovatelnoe Prostranstvo v Informatsionnyu Epokhu = Educational space in the information era: Proceedings of the International scientific and practical conference*. Moscow, 2021:192-199. (In Russ.)
4. Kubrushko P.F., Eprikyan D.O. Preparation of teachers of vocational training to work in an electronic information and educational environment. *Municipal Education: Innovation and Experiment*, 2022;4(85):20-25. (In Russ.)
5. Shingareva M.V., Atapina Yu.A. Training of future teachers for professional activities in the conditions of a digital educational environment. *Innovations in professional and vocational pedagogical education: Proceedings of the 26th International scientific and practical conference*. Ekaterinburg. 2021;1:123-126. (In Russ.)
6. Afzalova A.N. Blended learning at university. *Problemy Sovremennogo Pedagogicheskogo Obrazovaniya = Problems of Modern Pedagogical Education*. 2021;73-1:32-34. (In Russ.)
7. Nazarova L.I., Chistova Ya.S., Gritsenko N.S. Blended learning as a mechanism of digital transformation of professional education. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(6):76-79. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-76-79>
8. Alipichev A., Nazarova L., Shingareva M., Siman A. Improving the credibility of pedagogical diagnostics in E-Learning. *CEUR Workshop Proceedings*, 2020;2861:203-209.
9. Loginova A.V. Blended learning: advantages, limitations and concerns. *Molodoy Ucheniy = Young Scientist*. 2015;7(87):809-811. (In Russ.)
10. Pletyago T.Yu., Ostapenko A.S., Antonova S.N. Pedagogical models of blended learning: On the experience of Russian and foreign practice of design and implementation. *The Education and Science Journal*. 2019;21(5):112-129. (In Russ.) <https://doi.org/10.17853/1994-5639-2019-5-113-130>
11. Shkunova A.A., Prokhorova M.P., Labazova A.V., Belousova K.V., Bulganina A.E. Trends and development prospects online education. *Innovatsionnaya Ekonomika: Perspektivy Razvitiya i Sovershenstvovaniya = Innovative Economics: Prospects for Development and Improvement*. 2019;2(36):108-115. (In Russ.)
12. Blinov V.I., Esenina E.Yu., Sergeev I.S. Models of Blended Learning: Organizational and Didactic Typology. *Vysshee obrazovanie v Rossii = Higher Education in Russia*. 2021;30;5:44-64. (In Russ.) <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2021-30-5-44-64>
13. Kozlov O.A., Novikova I.V., Matsui N.V., Polozhentseva I.V. Development of blended learning in educational institutions of higher education in the context of digital transformation of education. *Modern Pedagogical Education*. 2022;4:15-20. (In Russ.)
14. Rogov I.E., Adoniev A.A., Starichkova Yu.V. Experience in development, trends in the development and implementation of information systems supporting the main educational

организациях высшего образования в условиях цифровой трансформации образования // Современное педагогическое образование. 2022. № 4. С. 15-20. EDN: PPYQTQ

14. Рогов И.Е., Адоньев А.А., Старичкова Ю.В. Опыт разработки, тенденции развития и внедрения информационных систем поддержки основного образовательного процесса // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2017. Т. 13, № 4. С. 82-90. <https://doi.org/10.25559/SITITO.2017.4.628>

15. Симан А.С., Жилыева В.В. Электронная информационно-образовательная среда в условиях государственной аккредитации вуза // Международный научный журнал. 2020. № 3. С. 121-127. EDN: ZZEZMW

16. Меликов А.В., Макарычев П.П. Модели предметной области систем электронного анкетирования // Гаудеамус: Психолого-педагогический журнал. 2010. Т. 2, № 16. С. 59-60. EDN: MUETOF

17. Козленкова Е.Н., Волкова А.Н. Использование современных цифровых технологий в проектно-исследовательской деятельности обучающихся // Вестник РМАТ. 2021. № 4. С. 66-71. EDN: WODCBJ

18. Julian B., Noble J., Anslow C. Agile Practices in practice: Towards a theory of agile adoption and process evolution. *Lecture Notes in Business Information Processing*. 2019;355:3-18. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19034-7_1

19. Лозгачева Т.М., Табекина О.А., Федотова О.В. Agile и научная организация труда: практика применения гибких методов в России // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Экономика и управление. 2019. Т. 5, № 2. С. 48-59. EDN: OCMGEV

Информация об авторах

Людмила Ивановна Назарова^{1✉}, канд. пед. наук, доцент; nazarova@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-5698-6284>

Яна Сергеевна Чистова², канд. пед. наук, доцент; energo-chistova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3713-8965>

Екатерина Павловна Январева³, магистрант; ka.yanvareva@inbox.ru; <http://orcid.org/0009-0008-9928-8433>

^{1,2,3} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

Вклад авторов

Л.И. Назарова – формулирование основной концепции исследования, описание результатов и формирование выводов; Я.С. Чистова – разработка методологии и проведение исследования;

Е.П. Январева – верификация данных, создание черновика рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила в редакцию 04.03.2024; поступила после рецензирования и доработки 08.04.2024; принята к публикации 10.04.2024

process. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2017;13(4):82-90. (In Russ.)

15. Siman A.S., Zhilyaeva V.V. Electronic information-educational environment under conditions of state university accreditation. *International Scientific Journal*. 2020;3:121-127. (In Russ.)

16. Melikov A.V., Makarychev P.P. Models of the subject area of electronic questionnaire systems. *Psychology-Pedagogical Journal Gaudeamus*. 2010;2(16):59-60. (In Russ.)

17. Kozlenkova E.N., Volkova A.N. Use of modern digital technologies in design and research activities of students. *Vestnik RMAT*. 2021;4:66-71. (In Russ.)

18. Julian B., Noble J., Anslow C. Agile Practices in practice: Towards a theory of agile adoption and process evolution. *Lecture Notes in Business Information Processing*. 2019;355:3-18.

19. Lozgacheva T.M., Tabekina O.A., Fedotova O.V. Agile and the scientific organization of work: the practice of applying Agile methods in Russia. *Uchenye Zapiski Krymskogo Federalnogo Universiteta Imeni V.I. Vernadskogo. Ekonomika i Upravlenie*. 2019;5(71-2):48-59. (In Russ.)

Author Information

Lyudmila I. Nazarova^{1✉}, CSc (Ed), Associate Professor; nazarova@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-5698-6284>

Yana S. Chistova², CSc (Ed), Associate Professor; energo-chistova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3713-8965>

Ekaterina P. Yanvareva³, Master student; ka.yanvareva@inbox.ru; <http://orcid.org/0009-0008-9928-8433>

^{1,2,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49

Author Contribution

L.I. Nazarova – conceptualization, description of results and formulation of conclusions;

Y.S. Chistova – research methodology, investigation;

E.P. Yanvareva – data verification, writing – original draft preparation.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests and are responsible for plagiarism

Received 04.03.2024; Revised 08.04.2024; Accepted 10.04.2024.

К изданию принимается ранее не опубликованное автором (авторами) оригинальное произведение (научно-техническая или обзорно-аналитическая статья), соответствующее основным направлениям журнала объемом 3-4 тыс слов и оформленное согласно ГОСТ Р 7.0.7-2021.

Структура статьи (образец)

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК:

<https://doi.org/10.26897/2687-1149->

Название статьи (маx до 15 слов, включает ключевые слова!)

Инициалы, фамилия первого автора¹, инициалы, фамилия второго автора²

¹ Название организации первого автора (в именительном падеже без составных частей названий организаций); страна, город

² Название организации второго автора; страна, город

¹ e-mail первого автора; [https://orcid.org/..](https://orcid.org/)

² e-mail первого автора; [https://orcid.org/..](https://orcid.org/)

Аннотация – самостоятельный законченный материал. Вводная часть минимальна. Нужно коротко и емко отразить актуальность и цель исследований, условия и схемы экспериментов, привести полученные результаты (с обязательным аргументированием на основании цифрового материала), сформулировать выводы. Нельзя использовать аббревиатуры и сложные элементы форматирования (например, верхние и нижние индексы) (объем 200 слов, включает ключевые слова!).

Ключевые слова: 7-10 слов или словосочетаний для поисковых систем и классификации статей по темам.

Благодарности: сведения о грантах, финансировании.

Для цитирования: ФИО авторов. Название статьи // *Агроинженерия*. Год. Том. № . С. . <https://doi.org/10.26897/2687-1149->.

© ФИО авторов, год

ORIGINAL ARTICLE

Article title

Full name¹, Full name²

¹ Name of the organization; full address; e-mail

² Name of the organization; full address; e-mail

¹ e-mail; [https://orcid.org/..](https://orcid.org/)

² e-mail; [https://orcid.org/..](https://orcid.org/)

Abstract.

Keywords:

Acknowledgments:

For citation: Full name of the authors. Article title. *Agricultural Engineering (Moscow)*. year; volume (number); pages. <https://doi.org/10.26897/2687-1149->

Статья должна быть структурирована, обязательно содержать следующие разделы:

- Введение (актуальность);
- Цель исследований;
- Материалы и методы;
- Результаты и их обсуждение;
- Выводы.

Библиографический список должен быть составлен в соответствии с последовательностью ссылок в тексте.

Информация об авторах
Вклад авторов

Требования к оформлению статьи

1. **Шрифт** Times New Roman, размер – 14 пт, интервал – 1,5. Буквы латинского алфавита выделяются курсивом, греческого и русского алфавитов, индексы и показатели степени, математические символы \lim , \lg , const , \sin , \cos , tg , \min , max и др. приводятся в прямом начертании. Аббревиатуры должны быть пояснены. Диапазон любых значений указать в виде многоточия («...»: 13,25...13,50), кроме периода лет, где используется дефис («-»: 5-6).

2. **Рисунки** (иллюстрации, графики, диаграммы, схемы) должны иметь качество 300 dpi для растровых изображений (например, фотографий), их обрезка должна производиться до вставки в документ. Каждый график, диаграмма или схема вставляется в текст как объект MS Excel. Наименования осей, единицы измерения физических величин и прочие надписи должны быть выполнены на русском и английском языке.

Рисунки должны иметь сквозную нумерацию, название и ссылку в тексте: (рис. 1). Каждый рисунок должен иметь подрисуючную подпись, в которой даётся объяснение всех его элементов.

3. **Таблицы** должны иметь сквозную нумерацию и заголовки. К таблицам и рисункам необходим англоязычный перевод подрисуючных подписей и заголовков. Сокращать слова в таблице не допускается.

4. Для набора **формул** необходимо использовать программы Math Type (в приоритете) либо Equation. Недопустимо вставлять уравнения в текст в виде растровых либо векторных изображений. Простые математические выражения, не содержащие дробей, корней, сложных индексов и т.д. (цифры и буквы (русские, латинские, греческие; знаки, имеющиеся в таблице символов), размещаются в тексте без использования специальных программ. Формулы должны создаваться одним объектом, а не состоять из частей. Править стили отдельных букв (приводить их к прямому начертанию) в уравнении, набранном в разрешённых программах, неприемлемо.

Формулы и уравнения печатаются с новой строки и центрируются. Все обозначения в формулах должны быть объяснены с указанием единиц измерения в системе СИ. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи.

5. **Список литературы** к статье необходимо составлять в порядке цитирования, библиографическое описание – согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008. Все ссылки должны быть оформлены единообразно: только с точкой, без тире между частями описания. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. В тексте статьи ссылки на источник цитирования приводятся в квадратных скобках, в конце предложения перед точкой и размещаются последовательно в тексте статьи по мере упоминания. Названия цитируемых журналов приводятся полностью, без сокращений. Необходимо также при наличии указывать DOI цитируемой статьи.

Перевод названия статьи, ФИО, аффилиации, аннотации, ключевых слов и списка литературы должен выполняться качественно (механический перевод недопустим!)

Автор несёт ответственность за содержание статьи.

Статьи присылать по адресу: agroeng@rgau-msha.ru