



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

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Научный журнал

Том 27. № 2 / 2025

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

Подписано в печать 27.03.2025
Формат 60 84/8
Тираж 500 экз.

© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева, 2025

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

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

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 русского 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/0000-0001-6776-0432>, kazansev@rgau-msha.ru

Тамара Петровна Кобозева, д-р с.-х. наук, профессор ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-6776-0432>, 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

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, 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 государственного 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>, quangoang1510@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 27.03.2025

Format – 60 84/8

Circulation – 500 copies.

© Federal State Budgetary Establishment
of Higher Education – Russian State
Agrarian University – Moscow Timiryazev
Agricultural Academy, 2025

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
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

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>, vbalabanov@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. Kuprenko, 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>, kuprenkoai@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

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.avramenka@bsatu.by

Snezhana 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

- А.С. Дорохов, А.В. Сибирёв, С.Н. Петухов, А.Г. Пономарев**
Определение навесоспособности универсально-пропашного трактора интегральной схемы ЛТИ-162.5..... 4
- А.Н. Цепляев, Р.А. Непокрытый**
Аналитическое нахождение параметров пневмосистемы для внесения обогащенного гидрогеля при посадке картофеля на орошении..... 13
- Т.А. Медхн, А.Г. Левшин, С.Г. Теклай**
Оценка эксплуатационной точности пневматической сеялки на ферме Эритреи..... 21
- В.Ф. Федоренко**
Переход к технологическим процессам и техническим системам обработки почвы, интегрированным в природный ресурсооборот..... 30
- Е.А. Пшенов, А.А. Диденко, С.С. Блэскин, В.А. Годорожа**
Автоматизация миникомбикормового завода..... 38
- С.В. Брагинец, В.И. Пахомов, О.Н. Бахчевников, А.С. Алферов, К.А. Деев**
Оптимизация энергоёмкости процесса влажного гранулирования корма в корзинном грануляторе 47
- А.В. Бижаяев, В.Л. Чумаков, С.М. Гайдар, А.М. Пикина, А.В. Капустин**
Использование арахисового и пальмового масел в качестве топлива дизельных двигателей..... 54

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

- С.М. Гайдар, Х.Д. Куанг, В.Е. Коноплев, А.М. Пикина, А.Ю. Алипичев**
Исследование свойств продуктов взаимодействия этаноламина и борной кислоты в качестве летучих ингибиторов коррозии при защите черных и цветных металлов 63
- О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба, Ю.Г. Вергазова, Л.А. Гринченко**
Исследование параметров рассеяния натягов в соединении выходного конца вала КПП ЯМЗ с манжетой 70
- А.В. Лапаев, О.М. Мельников**
Выбор метода поверхностного упрочнения ремонтной тонкостенной втулки 77

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

- И.Г. Пospelova, М.Н. Ерохин, П.В. Дородов, С.П. Казанцев, И.В. Возмищев**
Исследование работы устройства для обеззараживания ИК-излучением почвосмеси в тонком слое на конвейере 84
- А.В. Виноградова**
Коэффициенты сезонности по количеству и продолжительности отключений в сельских электрических сетях с учетом их причин 92

CONTENTS

FARM MACHINERY AND TECHNOLOGIES

- A.S. Dorokhov, A.V. Sibirev, S.N. Petukhov, A.G. Ponomarev**
Determining the load capacity of the universal tractor of the integrated design LTI-162.5..... 4
- A.N. Tseplyaev, R.A. Nepokrytiy**
Analytical determination of the parameters of the pneumatic system used to apply enriched hydrogel when planting potatoes under irrigation..... 13
- T.A. Medhn, A.G. Levshin, S.G. Teklay**
Evaluation of operational precision of a pneumatic seed drill used by farms in Eritrea..... 21
- V.F. Fedorenko**
Transition to technological processes and technical systems of soil tillage integrated into natural resource management..... 30
- E.A. Pshenov, A.A. Didenko, S.S. Bleskin, V.A. Godorozha**
Prospects for the automation of a feed mini-plant..... 38
- S.V. Braginetz, V.I. Pakhomov, O.N. Bakhchevnikov, A.S. Alferov, K.A. Deev**
Optimizing the energy intensity of wet granulation of feed in a basket granulator 47
- A.V. Bizhaev, V.L. Chumakov, S.M. Gaydar, A.M. Pikina, A.V. Kapustin**
Prospects of adding peanut and palm oils to diesel fuel for tractor engines..... 54

TECHNICAL SERVICE IN AGRICULTURE

- S.M. Gaidar, H.D. Kuang, V.E. Konoplev, A.M. Pikina, A.Yu. Alipichev**
Study of the properties of ethanalamine and boric acid interaction products as volatile corrosion inhibitors used to protect ferrous and non-ferrous metals 63
- O.A. Leonov, N.Zh. Shkaruba, Yu.G. Vergazova, L.A. Grinchenko**
Study of interference dispersion parameters in the joint of the YAMZ gearbox shaft output end and a seal 70
- A.V. Lapaev, O.M. Melnikov**
Selecting a method of surface hardening for thin-walled repair bushings 77

POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION

- I.G. Pospelova, M.N. Erokhin, P.V. Dorodov, S.P. Kazantsev, I.V. Vozmishchev**
Study of the operation of an IR irradiator to disinfect the soil mixture placed in a thin layer on a conveyor belt 84
- A.V. Vinogradova**
Seasonality coefficients for the number and duration of outages in rural power grids, taking into account their causes..... 92

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 629.032:631.372

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-4-12>



Определение навесоспособности универсально-пропашного трактора интегральной схемы ЛТИ-162.5

А.С. Дорохов¹, А.В. Сибирёв², С.Н. Петухов³, А.Г. Пономарев⁴

^{1,2,3,4} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия

¹ dorokhov.vim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1143-7286>

² sibirev2011@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>

³ petuxov61@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2212-8569>

⁴ agrodisel@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8871-4419>

Аннотация. В настоящее время российский агрокомплекс испытывает острый дефицит в отношении тракторной энергетики, особенно дефицит универсально-пропашных тракторов. Для производства отечественного универсально-пропашного трактора и обоснования шлейфа машин к нему важно выявить возможности его агрегатирования с учетом навесоспособности гидравлических систем изделия и несущей способности движителей. Исследования проведены с целью оценки навесоспособности универсально-пропашного трактора интегральной схемы класса 2-3 ЛТИ-162.5 при различном агрегатировании сельскохозяйственных машин и работе в междурядьях различных сельскохозяйственных культур. Анализ показателя максимального давления на почву ходовой системы ЛТИ-162.5 показал его зависимость от вертикальной нагрузки на колесо, типоразмера шины колеса, внутреннего давления в шине. В результате исследований рассчитана допустимая масса сельскохозяйственных машин, агрегируемых на переднем и заднем навесных устройствах, из условия допустимой нагрузки на движители трактора ЛТИ-162.5 на всех заявленных типоразмерах шин и установлено ее соответствие техническим условиям по грузоподъемности навесных систем. Определили, что агрегатирование трактора ЛТИ-162.5 и в однооперационном и комбинированном вариантах обеспечивается без потери управляемости агрегата в положении ближнего транспорта на всех типоразмерах шин, в диапазоне допустимых нагрузок на них, и не требует дополнительной балластировки грузами. При агрегатировании трактора ЛТИ-162.5 в комбинированном варианте на переднем устройстве допускается агрегатирование навесной машины массой 1900 кг и на заднем навесном устройстве массой 2600 кг, что ограничивается грузоподъемностью навесных систем трактора. При этом в положении ближнего транспорта обеспечивается управляемость агрегата без дополнительной балластировки. Полученные результаты позволяют комплектовать универсально-пропашной трактор различным оборудованием и шлейфом машин.

Ключевые слова: универсально-пропашной трактор, агрегатирование, агрегат, грузоподъемность, навесоспособность трактора, навесные системы

Для цитирования: Дорохов А.С., Сибирёв А.В., Петухов С.Н., Пономарев А.Г. Определение навесоспособности универсально-пропашного трактора интегральной схемы ЛТИ-162.5 // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 2. С. 4-12. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-4-12>

ORIGINAL ARTICLE

Determining the load capacity of the universal tractor of the integrated design LTI-162.5

A.S. Dorokhov¹, A.V. Sibirev², S.N. Petukhov³, A.G. Ponomarev⁴✉

^{1,2,3,4}Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia

¹dorokhov.vim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1143-7286>

²sibirev2011@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>

³petukhov61@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2212-8569>

⁴agrodisel@mail.ru✉; <https://orcid.org/0000-0001-8871-4419>

Abstract. Currently, the Russian agricultural sector is experiencing an acute shortage in tractor power means, especially, general-purpose tractors. The production of a domestic universal tractor and the justification of its compatible machine train requires identifying the options of its coupling with implements, taking into account the attachment mounting capacity of its hydraulic systems and the bearing capacity of the running gear. The study aimed to assess the load capacity of a general-purpose tractor of the integrated design (class 2-3 LTI-162.5) for various coupling options of agricultural machinery and operation in the inter-row distance of various crops. The analysis of the maximum ground pressure indicator of the LTI-162.5 chassis system showed its dependence on the vertical load on the wheel, the tire size of the wheel, and the internal tire pressure. As a result of the research, the permissible mass of agricultural implements attached to the front and rear mounting units was found based on the condition of the permissible load on the LTI-162.5 tractor movers on all declared tire sizes. In addition, the study established its compliance with the technical specifications for the load capacity of the mounting unit. It was determined that the coupling of the LTI-162.5 tractor in both single-operation and combined versions is ensured without losing the unit controllability in the short-range transport position on all tire sizes, within the limits of permissible loads, and does not require additional ballasting with loads. When coupling the LTI-162.5 tractor in a combined version, an attachment weighing 1,900 kg can be mounted on the front mounting unit, while the rear mounting unit can take a weight of up to 2,600 kg, which is limited by the load capacity of the tractor's attachment systems. At the same time, in the short-range transport position, the unit can be controlled without additional ballasting. The results obtained will make it possible to equip a general-purpose tractor with various implements and a train of machines.

Keywords: general-purpose tractor, coupling, unit, load capacity, tractor mounting capacity, mounting linkages

For citation: Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Petukhov S.N., Ponomarev A.G. Determining the load capacity of the universal tractor of the integrated design LTI-162.5. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(2):4-12 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-4-12>

Введение

В настоящее время Российский агрокомплекс испытывает острый дефицит в отношении тракторной энергетики, особенно дефицит универсально-пропашных тракторов. До 2014 г. тракторный парк отечественного агрокомплекса пополнялся тракторами ведущих западных фирм. Однако ориентация экономики страны на широчайшую интеграцию в мировую экономику опасна и глубоко ошибочна. Особенно это касается системообразующих отраслей, к которым относится и машиностроение [1].

Решить существующую проблему поможет производство отечественного универсально-пропашного трактора интегральной схемы класса 2-3 до 40 тыс. шт.

Навесоспособность трактора – один из важнейших показателей, предъявляемых к конструкции, позволяющий оценить возможности энергетического средства при подборе оптимальной комплектации его

различным оборудованием, шлейфом машин [2]. Навесоспособность трактора определяется грузоподъемностью навесных систем и колесных движителей.

Тракторы ЛТЗ-155 и РТМ-160 являются прототипами трактора ЛТИ-162.5. В комплектацию последнего могут входить передняя и задняя навесные системы, передний, боковой и задний вал отбора мощности (ВОМ), колеса с различными типоразмерами шин и возможностью сдвигания колес при проведении работ в различных междурядьях пропашных культур¹.

Показатель навесоспособности трактора и его тяговые характеристики позволяют обосновать агрегатирование как в однооперационном варианте, предусматривающем трактор и сельскохозяйственную машину, агрегатируемую на переднем (ПНУ) или заднем (ЗНУ)

¹Технические условия ТУ 4722-001-05991805-2017. Тракторы ЛТИ-162.5 ЛТИ-162.5У: утв. МСХ Российской Федерации от 15 марта 2017 г.

навесных устройствах, так и в комбинированном, предполагающем наличие сельскохозяйственных машин на обеих гидравлических навесках.

При переводе трактора из рабочего положения в положение ближнего транспорта навесные машины оказывают значительное перераспределение масс агрегата по мостам трактора, что может привести к возможной перегрузке шин и потере управляемости трактора.

Цель исследований: провести оценку навесоспособности универсально-пропашного трактора интегральной схемы класса 2-3 по уровню загрузки движителей различного типоразмера и воздействия их на почву с учетом изменения агрегатов при различных способах агрегатирования сельскохозяйственных машин и работе в междурядьях различных сельскохозяйственных культур; подготовить базу для определения шлейфа сельскохозяйственных машин к универсально-пропашному трактору в однооперационном и комбинированном вариантах агрегатирования с учетом коэффициента продольной устойчивости.

Материалы и методы

Величина давления на почву ходовой системой колесного универсально-пропашного трактора ЛТИ-162.5 класса 2-3 зависит от применяемого типоразмера шин, внутреннего давления в них и нагрузок на гидравлические навесные системы [3]. В свою очередь, вертикальная составляющая нагрузки на колеса меняется в зависимости от способа агрегатирования сельскохозяйственной машины (фронтальная или задняя навесные системы) и от технологического процесса (ближний транспорт, разворотная полоса, рабочий процесс).

Исходная информация при проведении исследований обработана экспертно-аналитическим методом.

Результаты и их обсуждение

Универсально-пропашной трактор интегральной схемы имеет ряд существенных преимуществ перед тракторами классической схемы.

Универсально-пропашной трактор ЛТИ-162.5 способен агрегатировать сельскохозяйственные машины на фронтальной и задней навесных гидравлических системах, а также на технологической площадке за кабиной трактора.

Выбор шлейфа машин к колесному универсально-пропашному трактору обуславливается характеристикой его движителей по типоразмеру и внутреннему давлению (табл. 1), так как через этот параметр должны определяться массы сельскохозяйственных машин, возможность работы на различных междурядьях пропашных культур, тяговые показатели, величина

давления на почву [4]. Наибольшую нагрузку движители колесного трактора испытывают при агрегатировании навесных машин в положении ближнего транспорта при переезде на небольшие расстояния или разворотах. При этом важное значение имеет и показатель продольной устойчивости агрегата.

Нормы нагрузок на шины и мосты при различном внутреннем давлении при допустимой скорости движения (согласно символу скорости по ГОСТ 7463-2003²) приведены в таблице 1. В соответствии со стандартом² символ скорости для шины 9,5-42 равен 116А6, а для шин 16,9R30 и 13,6R38 – 128А8 и 137А8 соответственно. Символ скорости ограничивает максимальные скорости для данного типа шин: для А6 – 30 км/ч; для А8 – 40 км/ч. При эксплуатации шин на сдвоенных колесах нагрузки должны быть снижены на 12% при том же внутреннем давлении³.

В соответствии с ГОСТ 12.2.111-2020 «...нагрузка на управляемые колеса трактора должна составлять не менее 20% эксплуатационной массы энергосредства»³. У тракторов классической схемы управляемыми являются колеса переднего моста, а у схемы энергосредства с шарнирно-сочлененной рамой – колеса наименее нагруженного моста. Требования по безопасности для универсально-пропашного трактора, имеющего три схемы управления движения (поворот за счет управления только передними колесами, поворот передними и задними колесами в разные стороны и поворот передними и задними колесами в одну сторону «краб»), этим ГОСТом не предусмотрены.

Рассмотрим силы, действующие на универсально-пропашной трактор интегральной схемы при различных вариантах агрегатирования сельскохозяйственных машин, и определим их влияние на нагруженность движителей трактора и продольную устойчивость агрегата в положении ближнего транспорта (рис. 1).

Горизонтальная координата центра тяжести трактора ЛТИ-162.5 без навешивания сельскохозяйственных машин или орудий определяется по формуле, регламентированной действующим стандартом⁴:

$$X = \frac{N_1 L}{G}. \quad (1)$$

² ГОСТ 7463-2003 «Шины пневматические для тракторов и сельскохозяйственных машин. Технические условия».

³ ГОСТ 12.2.111-2020 «Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Машины сельскохозяйственные навесные и прицепные. Общие требования безопасности».

⁴ ГОСТ 33691-2015. Испытания сельскохозяйственной техники. Метод определения угла поперечной статической устойчивости М.: Стандартинформ, 2016. 9 с.

Таблица 1

Допустимая нагрузка на колесо (мост) трактора ЛТИ-162.5 при движении на поворотной полосе или положении ближнего транспорта

Table 1

Permissible load on the wheel (axle) of the LTI-162.5 tractor when driving on a turning lane or in the position of a nearby vehicle

Типоразмер шины / количество Tire size / number of tires	Нагрузка на колесо/мост (N_1 и N_2), кг / Wheel/axle load (N_1 and N_2), kg						
	Внутреннее давление в шине, кПа / Internal tire pressure, kPa						
	80	100	120	140	160	200	210
9,5-42 / 8	852/2999	972/3421	1092/3849	1188/4182	1278/4499	1464/5153	1500/5280
13,6R38 / 4	1380/2760	1578/3156	1770/3540	1968/3936	2160/4320	–	–
13,6R38 / 8	1380/4858	1578/5555	1770/6230	1968/6927	2160/7603	–	–
16,9R30 / 4	1848/3696	2106/4212	2358/4716	2568/5136	2760/5520	–	–
16,9R30 / 8	1848/6505	2106/7413	2358/8300	2568/9039	2760/9715	–	–

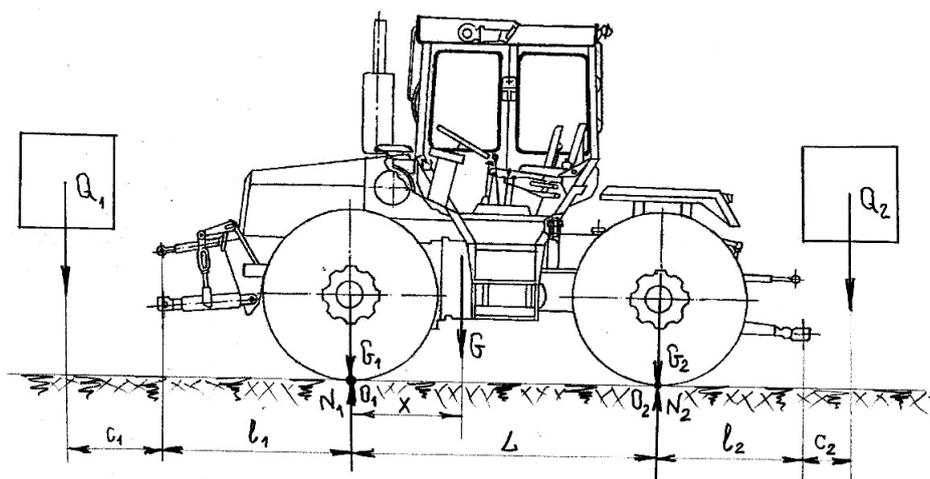


Рис. 1. Силы, действующие на трактор при различных вариантах агрегатирования:

L – продольная база трактора, мм; G – эксплуатационная масса трактора, кг;
 G_1 – составляющая эксплуатационной массы трактора, приходящаяся на передний мост, кг;
 G_2 – составляющая эксплуатационной массы трактора, приходящаяся на задний мост, кг;
 Q_1 – масса орудия, навешиваемого на ПНУ, кг; Q_2 – масса орудия, навешиваемого на ЗНУ, кг;
 N_1, N_2 – допустимые нагрузки на переднюю и заднюю оси трактора по грузоподъемности шин (с учетом давления в шине), кг; N_1 – грузоподъемность шин передней оси, кг;
 N_2 – грузоподъемность шин задней оси кг; l_1 – расстояние от оси передних колес трактора до оси подвеса орудия, мм; l_2 – расстояние от оси задних колес трактора до оси подвеса орудия, мм;
 $c_1 = c_2 = 610$ мм – расстояние от осей подвеса до центров тяжести орудий на переднем и заднем навесных устройствах

Fig. 1. Forces acting on the tractor in various coupling options

L – tractor’s longitudinal base, mm; G – tractor’s operating weight, kg;
 G_1 – tractor’s operating weight component of the front axle, kg;
 G_2 – tractor operating weight component of the rear axle, kg;
 Q_1 – weight of the implement mounted on the front mounting unit, kg;
 Q_2 – weight of the implement mounted on the rear mounting unit, kg; N_1, N_2 – permissible loads on the front and rear axles of the tractor according to tire capacity (taking into account tire pressure), kg;
 N_1 – load capacity of front axle tires, kg; N_2 – load capacity of rear axle tires, kg;
 l_1 – distance from the tractor’s front wheel axis to the implement suspension axis, mm;
 l_2 – distance from the tractor’s rear wheel axis to the implement suspension axis, mm;
 $c_1 = c_2 = 610$ mm – distance from suspension axes to the gravity centers of implements on front and rear mounting units

При навешивании на навесные системы трактора сельскохозяйственных машин или орудий значительно изменяются реакции опор N_1 и N_2 .

Определим значение максимальной массы сельскохозяйственной машины, агрегируемой различным способом с трактором интегральной схемы, с учетом типоразмера шин, их количества, внутреннего давления (из уравнения моментов сил относительно полюсов O_1 и O_2).

Рассмотрим три варианта агрегатирования:

1) на переднем навесном устройстве:

$$Q_1 \neq 0; Q_2 = 0;$$

$$N_1 = \frac{G \cdot (L - x) + Q_1 \cdot (L + \ell_1 + c_1)}{L};$$

$$N_2 = \frac{G \cdot x - Q_1 \cdot (\ell_1 + c_1)}{L};$$

2) на заднем навесном устройстве:

$$Q_1 = 0; Q_2 \neq 0;$$

$$N_1 = \frac{G \cdot (L - x) - Q_2 \cdot (\ell_2 + c_2)}{L};$$

$$N_2 = \frac{G \cdot x + Q_2 \cdot (L + \ell_2 + c_2)}{L};$$

3) эшелонированная навеска машин на заднем и переднем навесных устройствах:

$$Q_1 \neq 0; Q_2 \neq 0;$$

$$N_1 = \frac{G \cdot (L - x) - Q_2 \cdot (\ell_2 + c_2) + Q_1 \cdot (L + \ell_1 + c_1)}{L};$$

$$N_2 = \frac{G \cdot x + Q_2 \cdot (L + \ell_2 + c_2) - Q_1 \cdot (\ell_1 + c_1)}{L}.$$

Для устойчивости на поворотах при движении передним ходом или на реверсе значения N_1 и N_2 должны составлять не менее 20% от суммарного веса агрегата (трактор и навесные сельхозмашины). Максимальные значения N_1 и N_2 не должны превышать значений $N_{120\%}$ и $N_{220\%}$ по грузоподъемности шин с учетом их 20%-ной перегрузки.

Исходные данные, принятые в расчетах по определению допустимых масс сельскохозяйственных машин при агрегатировании их в однооперационном и комбинированном вариантах, с учетом типоразмера шин, давления в шинах и коэффициента продольной устойчивости агрегата⁵, представлены в таблице 2.

Исходя из данных таблицы 1, провели вычисления максимально допустимых масс сельскохозяйственных машин Q_1 и Q_2 , агрегируемых на навесных

Таблица 2

Исходные показатели, принятые в расчетах

Table 2

Initial indicators used in the calculations

Показатель / Indicator	Значение Value
Эксплуатационная масса трактора, G, кг / Tractor's operating weight, G, kg: на одинарных колесах на шинах 16,9R30 / on single wheels on 16.9R30 tires на двойных колесах на шинах 16,9R30 / on twin wheels on 16.9R30 tires на двойных колесах на шинах 9,5-42 / on twin wheels on 9.5-42 tires на одинарных колесах на шинах 13,6R38 / on single wheels on 13.6R38 tires на двойных колесах на шинах 13,6R38 / on twin wheels on 13.6R38 tires	5981 6721 6123 5837 6433
Колесная база, L, мм / Wheelbase, L, mm	2765
Расстояние от оси передних колес до оси подвеса переднего навесного устройства, ℓ_1 , мм Distance from front wheel axle to front mounting suspension axle, ℓ_1 , mm	1020
Расстояние от оси задних колес до оси подвеса заднего навесного устройства, ℓ_2 , мм Distance from rear wheel axle to rear mounting suspension axle, ℓ_2 , mm	1120
Расстояние от осей подвеса до центра тяжести орудий на переднем и заднем навесных устройствах, c_1, c_2 , мм Distance from suspension axles to the center of gravity of implements on front and rear mounting units, c_1, c_2 , mm	610
Масса поднимаемого груза, характеризующего грузоподъемность на раме (переднее навесное устройство), Q_1 , кг Mass of the lifted load characterizing the load capacity on the frame (front mounting unit), Q_1 , kg	1900
Масса поднимаемого груза, характеризующего грузоподъемность на раме (заднее навесное устройство), Q_2 , кг Weight of lifted load characterizing the lifting capacity on the frame (rear mounting unit), Q_2 , kg	-

⁵Протокол № 06-39-2010 (2010051) Периодических испытаний трактора РТ-М-160. Федеральное государственное учреждение «Кировская государственная зональная машиноиспытательная станция».

устройствах трактора, в зависимости от типоразмера колес, их количества и давления в шинах, для всех способов агрегатирования (табл. 3).

Проведенные расчеты для каждого случая агрегатирования позволяют построить графики зависимости, определяющие взаимосвязь допустимых

масс сельскохозяйственных машин, агрегируемых на навесных устройствах трактора ЛТИ-162.5, с параметрами типоразмеров применяемых шин, давлением в них и продольной устойчивости агрегатов при различных вариантах использования энергосредства (рис. 2-6).

Таблица 3

Максимальные массы сельскохозяйственных машин при агрегатировании на навесных устройствах трактора ЛТИ-162.5 в положении ближнего транспорта исходя из допустимых нагрузок на движители

Table 3

Maximum weight of agricultural machines mounted on the LTI-162.5 tractor in the short-range transport position, based on the permissible loads on the movers

Типоразмер шины / количество Tire size / number	Допустимая масса сельскохозяйственных машин Q_1/Q_2 , кг / Permissible weight of agricultural machines Q_1/Q_2 , kg						
	Внутреннее давление в шине, кПа / Internal tire pressure, kPa						
	80	100	120	140	160	200	210
9,5-42 / 8	-422/336	-156/596	110/856	323/1064	522/1259	934/1662	1014/1740
13,6R38 / 4	-465/259	-215/503	26/739	276/983	518/1219	-	-
13,6R38 / 8	856/1403	1295/1832	1720/2248	2159/2677	2584/3093	-	-
16,9R30 / 4	70/800	395/1117	712/1428	977/1686	1219/1922	-	-
16,9R30 / 8	1559/2346	2131/2905	2689/3451	3155/3906	3580/4322	-	-

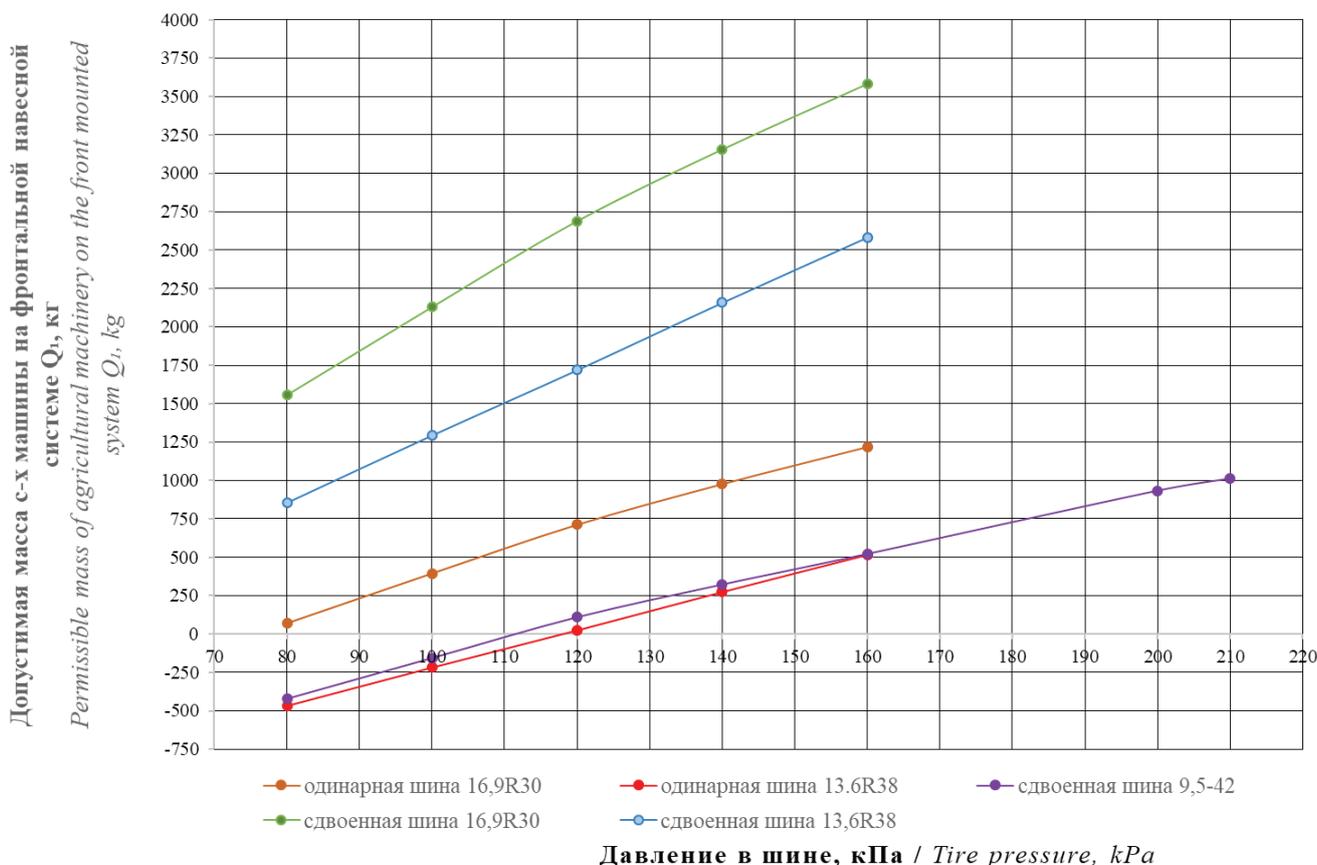


Рис. 2. Допустимая масса с.-х. машины (Q_1 , кг) на переднюю навесную систему трактора ЛТИ-162.5 в зависимости от типоразмера шин и давления в них, по критерию грузоподъемности шин

Fig. 2. Permissible weight of the agricultural machine (Q_1 , kg) on the front mounting unit of the LTI-162.5 tractor, depending on the tire size and pressure, according to the criterion of tire load capacity

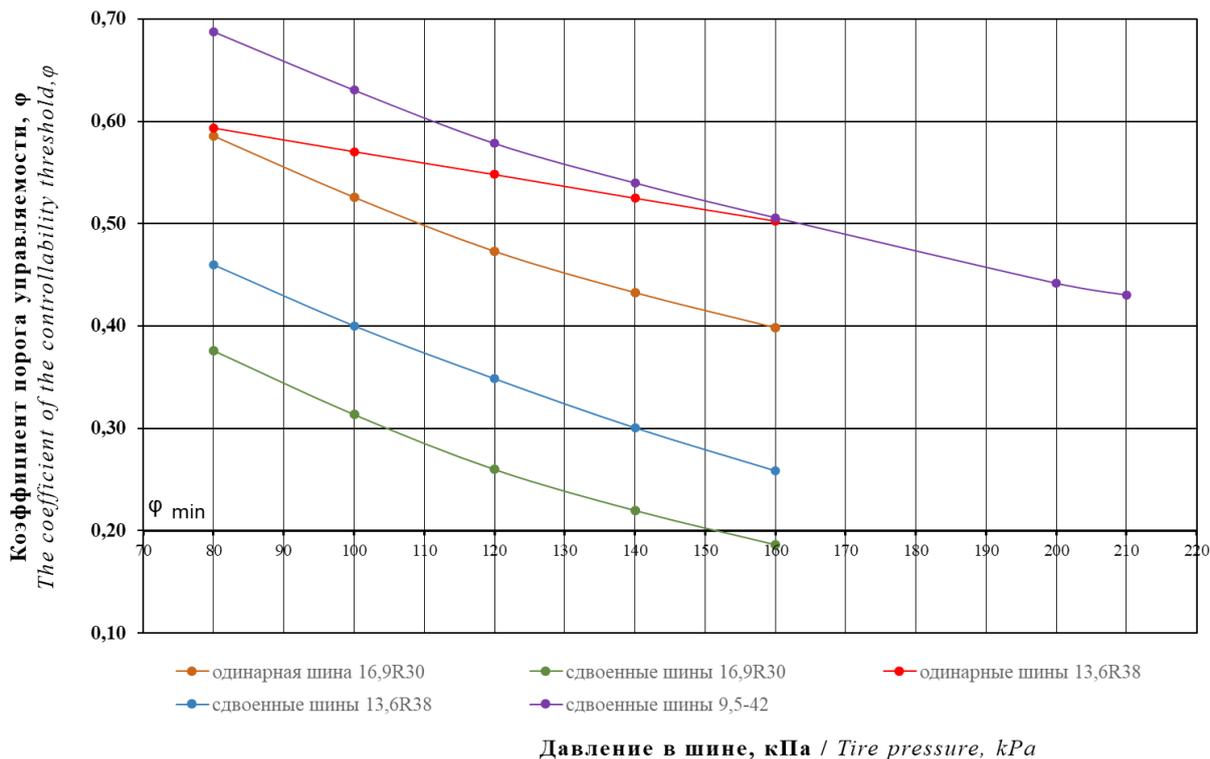


Рис. 3. Порог управляемости трактора ЛТИ-162.5 при загрузке передней навесной системы в зависимости от типоразмера шин и давления в них, по критерию массы сельскохозяйственной машины

Fig. 3. Controllability limit of the LTI-162.5 tractor when loading the front mounting unit, depending on the tire size and pressure, according to the criterion of the agricultural machine weight

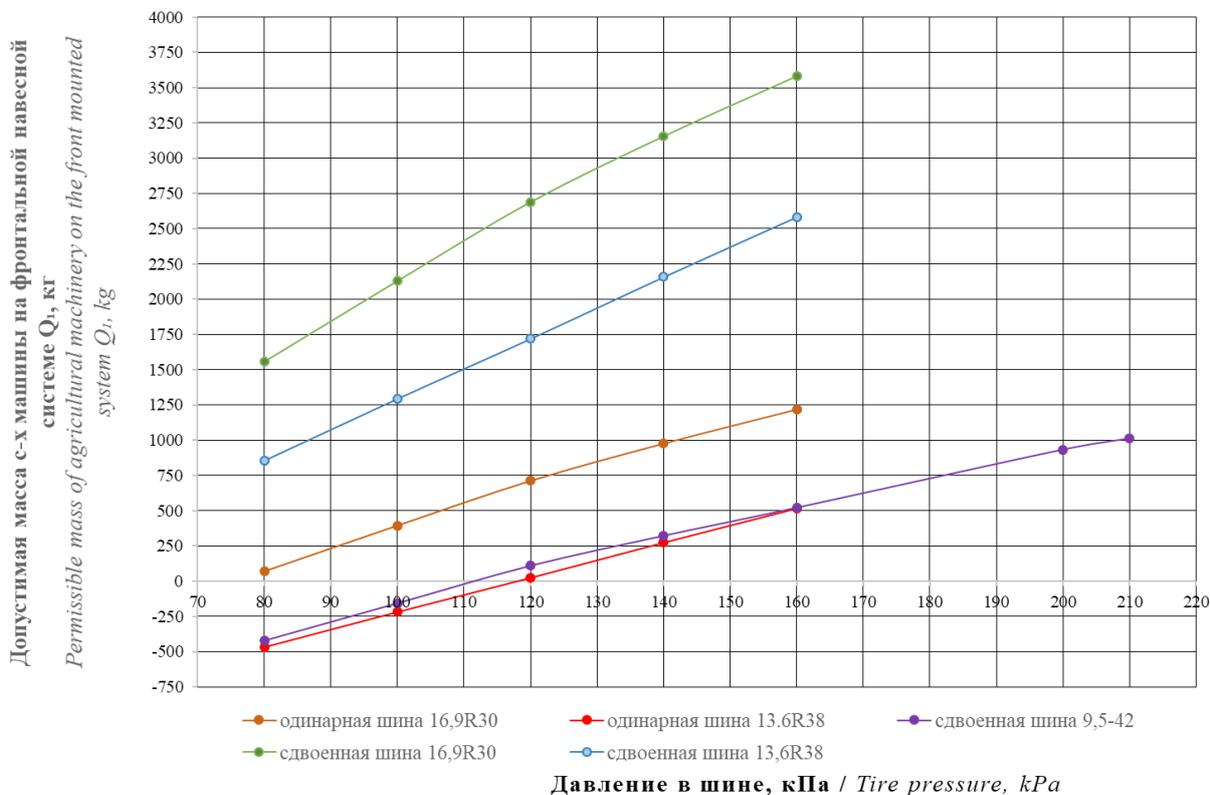


Рис. 4. Допустимая масса с.-х. машины (Q₂, кг) на заднюю навесную систему трактора ЛТИ-162.5 в зависимости от типоразмера шин и давления в них, по критерию грузоподъемности шин

Fig. 4. Permissible weight of the agricultural machine (Q₂, kg) on the rear mounting unit of the LTI-162.5 tractor, depending on the tire size and pressure, according to the criterion of tire load capacity

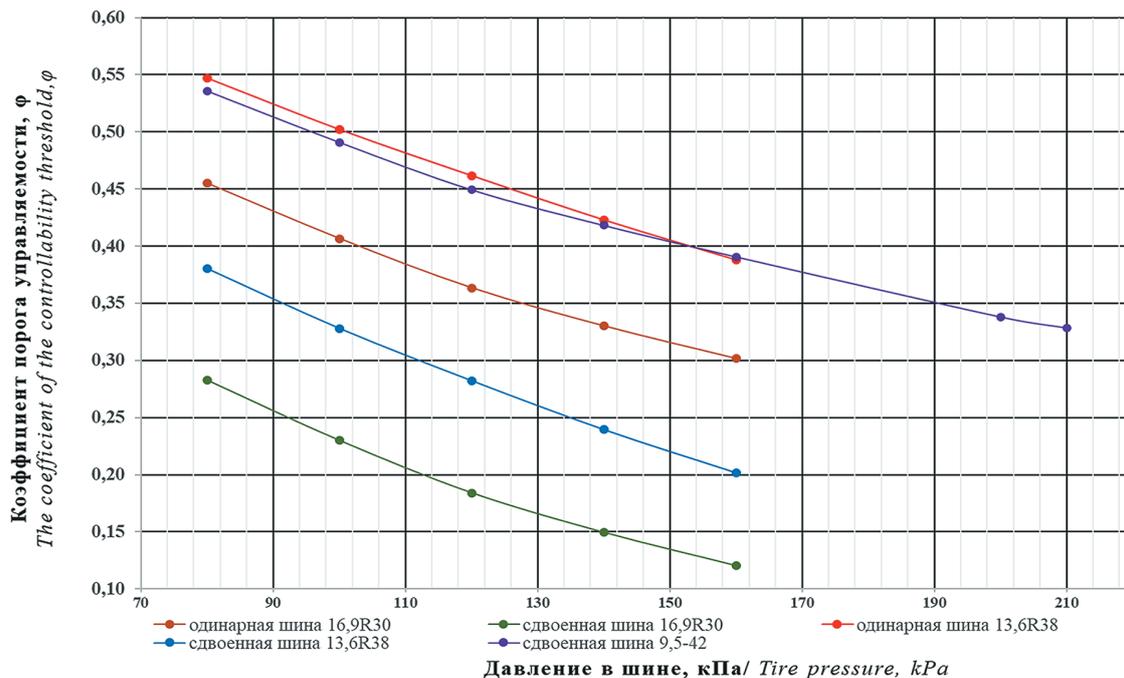


Рис. 5. Порог управляемости трактора ЛТИ-162.5 при загрузке задней навесной системы в зависимости от типоразмера шин и давления в них, по критерию массы сельскохозяйственной машины

Fig. 5. Controllability limit of the LTI-162.5 tractor when loading the rear mounted system, depending on the tire size and pressure, according to the criterion of the agricultural machine weight

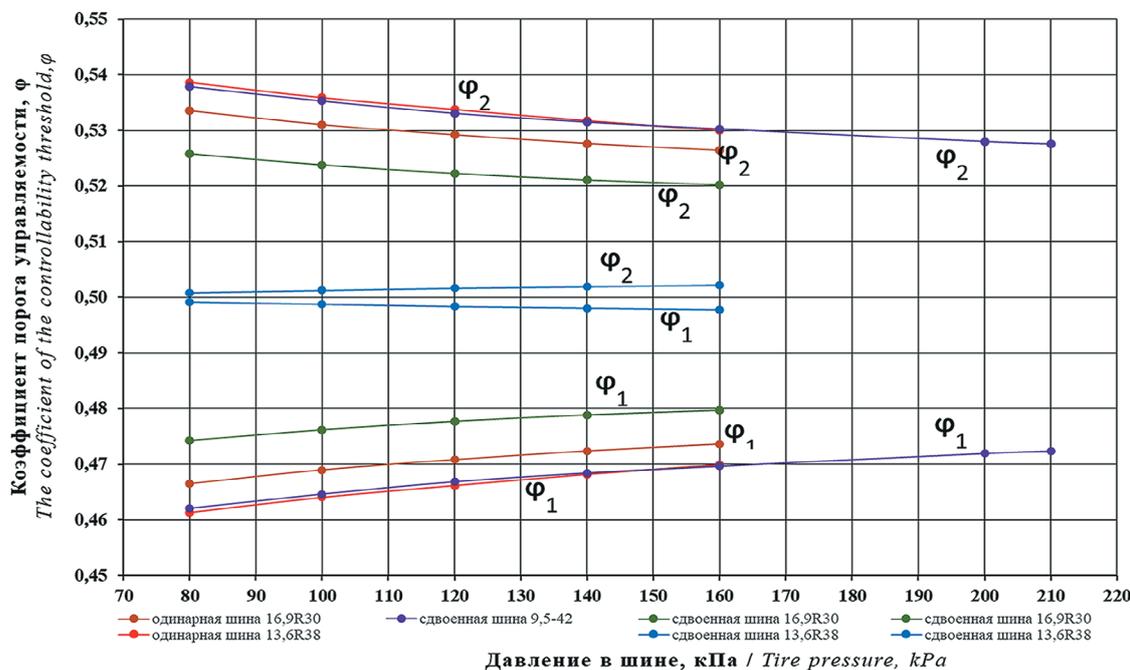


Рис. 6. Порог управляемости трактора ЛТИ-162.5 при загрузке передней и задней навесных систем в зависимости от типоразмера шин и давления в них, по критерию масс сельскохозяйственных машин

Fig. 6. Controllability limit of the LTI-162.5 tractor when loading the front and rear mounted systems, depending on the tire size and pressure, according to the criterion of the agricultural machine weight

Выводы

1. Рассчитанная допустимая масса сельскохозяйственных машин, агрегируемых на переднем и заднем навесных устройствах, из условия допустимой нагрузки на движители трактора ЛТИ-162.5 на всех заявленных типоразмерах шин, соответствует

техническим условиям по грузоподъемности навесных систем.

2. Агрегатирование трактора ЛТИ-162.5 и в однооперационном и комбинированном вариантах обеспечивается без потери управляемости агрегата в положении ближнего транспорта на всех типоразмерах

шин, в диапазоне допустимых нагрузок на них, и не требует дополнительной балластировки грузами.

3. При агрегатировании трактора ЛТИ-162.5 в комбинированном варианте и с учетом допустимых нагрузок на шины в соответствии с ГОСТ 7463-2003 на переднем устройстве допускается агрегатирование

навесной машины массой 1900 кг и на заднем навесном устройстве массой 2600 кг, что ограничивается грузоподъемностью навесных систем трактора. При этом в положении ближнего транспорта обеспечивается управляемость агрегата без дополнительной балластировки.

Список источников

1. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. Принципы формирования систем машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16, № 4. С. 4-12. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12>
2. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. и др. Современные технологии и техника для сельского хозяйства – тенденции выставки Agritechnika 2019 // *Тракторы и сельхозмашины*. 2020. Т. 87, № 6. С. 28-40. <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2020-6-28-40>
3. Ревенко В.Ю., Назаров А.Н., Скорляков В.И. Методика расчета давления на почву колесных тракторов // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.868-876>
4. Дидманидзе О.Н., Девянин С.Н., Парлюк Е.П. Трактор сельскохозяйственный: вчера, сегодня, завтра // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2020. Т. 21, № 1. С. 74-85. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.1.74-85>

Информация об авторах

- ¹ **Дорохов Алексей Семенович**, академик РАН, д-р техн. наук, заместитель директора; SPIN-код: 6711-8971; AuthorID: 550644; dorokhov.vim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1143-7286>
- ² **Сибирёв Алексей Викторович**, профессор РАН, д-р техн. наук, заведующий отделом; SPIN-код: 1726-5356; AuthorID: 794047; sibirev2011@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>
- ³ **Петухов Сергей Николаевич**, канд. с.-х. наук, ведущий научный сотрудник; SPIN-код: 4214-2950, AuthorID: 899789; petukhov61@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2212-8569>
- ⁴ **Пономарев Андрей Григорьевич**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; SPIN-код: 9398-2691, AuthorID: 412638; agrodisel@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8871-4419>
- ^{1,2,3,4} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский пр-д, 5

Вклад авторов

А.С. Дорохов – руководство исследованием, концептуализация; А.С. Сибирёв – концептуализация, методология, администрирование проекта; С.Н. Петухов – формальный анализ, проведение исследований, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование; А.Г. Пономарев – проведение исследований, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование, визуализация.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 16.09.2024, после рецензирования и доработки 03.02.2024; принята к публикации 04.02.2025

References

1. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S. Principles of forming machine and technology systems for integrated mechanization and automation of technological processes in crop production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022;16(4):4-12. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12>
2. Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Dorokhov A.S. Sibirev A.V., Kryuchkov V.A., Sazonov N.V. Modern agriculture technologies and equipment – trends of an AGRITECHNIKA 2019 exhibition. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2020;6:28-40. (In Russ.) <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2020-6-28-40>
3. Revenko V.Yu., Nazarov A.N., Skorlyakov V.I. Method of calculating the pressure on the soil of wheeled tractors. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2023;24(5):868-876. (In Russ.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.868-876>
4. Didmanidze O.N., Devyanin S.N., Parlyuk Ye.P. Past, present, future of agricultural tractors. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2020;21(1):74-85. (In Russ.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.1.74-85>

Author Information

- Aleksey S. Dorokhov**¹, RAS Corresponding Member, DSc (Eng), Director Deputy; dorokhov.vim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1143-7286>
- Aleksey V. Sibirev**², Professor of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Head of the Department; sibirev2011@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>
- Sergey N. Petukhov**³, CSc (Ag), Lead Research Engineer; petukhov61@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2212-8569>
- Andrey G. Ponomarev**⁴, CSc (Eng), Lead Research Engineer; agrodisel@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8871-4419>
- ^{1,2,3,4} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 1st Institutsky Proezd Str., 5, Moscow, 109428, Russia

Author Contribution

A.S. Dorokhov – research supervision, conceptualization; A.V. Sibirev – conceptualization, methodology, project administration; S.N. Petukhov – formal analysis, research, writing – original draft preparation, manuscript review and editing; A.G. Ponomarev – investigation, writing – original draft preparation, manuscript review and editing.

Conflict of interests

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

Received 16.09.2024; Revised 03.02.2025; Accepted 04.02.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 635.21:631

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-13-20>

Аналитическое нахождение параметров пневмосистемы для внесения обогащенного гидрогеля при посадке картофеля на орошении

*А.Н. Цепляев¹, Р.А. Непокрытый²*¹ Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова»; г. Волгоград, Россия² Волгоградский государственный аграрный университет; г. Волгоград, Россия¹ can_volgau@mail.ru² nepokrytyroman@yandex.ru

Аннотация. Разработка методики теоретического определения параметров пневмосистемы для равномерного распределения обогащенного удобрениями гидрогеля при посадке картофеля на орошении позволит сократить количество поливов. С целью определения параметров пневмосистемы рассматривали пневмосистему картофелесажалки, позволяющую равномерно распределить гранулы гидрогеля и удобрений в почве. В основе теоретических исследований нахождения параметров пневмосистемы принято уравнение Бернулли о неразрывности потока жидкости или газа. На основании полученных закономерностей определены значения скоростей воздуха в различных сечениях пневмосистемы, найдены зависимости избыточного давления в системе, параметры инжектора, а также определен радиус насадка для смешивания гранул удобрений и гидрогеля. Для решения полученных сложных зависимостей разработали алгоритм и использовали программу Mathcad. Установлено, что пневмосистема, обеспечивающая транспортировку смеси гидросорбента и удобрений ниже посадочной борозды картофеля, должна создавать оптимальный напор от 0,22 до 0,28 Н/м³. При этом радиус насадка варьируется в пределах от $3 \cdot 10^{-3}$ м до $3,5 \cdot 10^{-3}$ м, средняя величина радиуса составляет $3,25 \cdot 10^{-3}$ м. Полученные значения позволят оптимизировать работу картофелесажалки.

Ключевые слова: картофель, картофелесажалки, пневмосистема, гидросорбент, гранулы гидрогеля, параметры инжектора, удобрения, напор, радиус насадка

Финансирование. Материал подготовлен в соответствии с темой № FNFR-2022-0005 «Разработать с использованием новых научных знаний ресурсоэффективные технологии орошения сельскохозяйственных культур, отвечающих требованиям реализации их продуктивности и экологической устойчивости мелиорированных ландшафтов в условиях возрастающей аридизации климата».

Для цитирования: Цепляев А.Н., Непокрытый Р.А. Аналитическое нахождение параметров пневмосистемы для внесения обогащенного гидрогеля при посадке картофеля на орошении // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 2. С. 13-20. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-13-20>

ORIGINAL ARTICLE

Analytical determination of the parameters of the pneumatic system used to apply enriched hydrogel when planting potatoes under irrigation

*A.N. Tseplyaev¹, R.A. Nepokryty²*¹ All-Russian Scientific Research Institute of Irrigated Agriculture – Branch of Federal State Budgetary Scientific Institution “Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Melioration named after A.N. Kostyakov”; Volgograd, Russia² Volgograd State Agrarian University; Volgograd, Russia¹ can_volgau@mail.ru² nepokrytyroman@yandex.ru

Abstract. Methodology for the theoretical determination of the parameters of the pneumatic system for the uniform distribution of fertilized hydrogel when planting potatoes under irrigation can reduce the number of watering operations. To determine the pneumatic system parameters, the authors took an example of the pneumatic system of a potato planter that can evenly distribute granules of hydrogel and fertilizers in the soil. The Bernoulli equation describing the continuity of a liquid or gas flow was taken as the theoretical basis for the determination

of the parameters of the pneumatic system. Based on the obtained relationships, the authors determined the values of air velocities in various sections of the pneumatic system, found the dependencies of overpressure in the system, as well as the parameters of the injector and the radius of the nozzle for mixing fertilizer granules and hydrogel. To solve the obtained complex dependencies, use was made of a developed algorithm and the Mathcad software. It was established that the pneumatic system introducing hydrosorbent and a fertilizer mixture below the potato-planting furrow should make optimal pressure from 0.22 to 0.28 N/m³. In this case, the nozzle radius varies between $3 \cdot 10^{-3} m$ and $3.5 \cdot 10^{-3} m$, the average value of the radius being $3.25 \cdot 10^{-3} m$. The obtained values can optimize the potato planter operation.

Keywords: potato, potato planters, pneumatic system, hydrosorbent, hydrogel granules, fertilizers, thrust, nozzle radius

Funding: The manuscript was prepared in accordance with the theme: FNFR – 2022-0005 “Using new scientific knowledge, to develop resource-efficient irrigation technologies for agricultural crops that meet the requirements of high productivity and environmental sustainability of reclaimed landscapes in conditions of increasing climate aridization”.

For citation: Tseplyaev A.N., Nepokrytiy R.A. Analytical determination of the parameters of the pneumatic system used to apply enriched hydrogel when planting potatoes under irrigation. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(2):13-20 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-13-20>

Введение

Для накопления влаги в почве в богарном земледелии при возделывании сельскохозяйственных культур применяют различного типа гидросорбенты [1, 2]. Они способны при избытке влаги накапливать ее, значительно увеличиваясь в объеме, а затем передавать растениям через корневую систему. Их способность к водоотдаче в засушливый период, а также улучшение агрегатного состояния почвы широко используются в нашей стране и за рубежом [3-5]. Исследования по изучению эффективности гидрогелей проводились в Ставрополье, Краснодарском крае и других регионах, а в качестве культур рассматривались зерновые, картофель и овощные культуры [6-8].

Картофель – один из наиболее важных продуктов в рационе питания человека, в животноводстве и других отраслях. Технология его производства постоянно совершенствуется за счет сортов, машин, удобрений и т.д. [9-11]. Посадку картофеля одновременно с обогащенным гидрогелем выполняют специально разработанной картофелесажалкой, включающей в себя, помимо стандартных узлов, систему подачи гидрогеля и удобрений [12, 13], которые находятся в отдельных бункерах (рис. 1), снабженных механизмами дозирования. Норма гидрогеля при посадке картофеля может изменяться от 7,8 до 31,2 г/п.м. (100...400 кг/га). При использовании нитроаммофоски подача удобрений колеблется от 19,5 до 46,8 г/п.м. (250...600 кг/га). Содержание удобрений может в 6 раз превышать количество гидрогеля, поэтому для получения качественной и эффективно действующей на растения смеси требуется тщательное перемешивание компонентов. Кроме того, полученную смесь

необходимо равномерно распределять в почве полосой шириной до 0,25 м, соответствующей размерам корневой системы картофеля. Поэтому наиболее приемлемым в конструкции машины является применение воздушной системы подачи гидрогеля. Для этого нож под гидрогель и удобрения выполняется полым, а в нижней его части монтируется специальная лапа в виде двух лезвий с углом раствора $\gamma_n < 90^\circ$ [11]. В их основании закреплена пластина для образования внутренней полой камеры, в которую вмонтирован наконечник с винтовым насадком, подающим воздух под давлением. Диаметр отверстия насадка меньше диаметра трубопровода. Такая конструкция позволяет получить завихрение воздушного потока и создать эффект разряжения в зоне выхода воздуха. Данная воздушная система работает по принципу инжектора, улучшая транспортировку гидрогеля и удобрений по каналу и обеспечивая равномерность получения смеси (обогащенного гидрогеля) с последующей ее подачей в почву по ширине развития корневой системы картофеля [12].

Цель исследований: аналитическое нахождение параметров пневмосистемы для внесения обогащенного гидрогеля при посадке картофеля на орошении.

Материалы и методы

В качестве рабочей гипотезы принято предположение о создании в почве миниводохранилищ в зоне гидрогеля, обогащенного удобрениями. При этом равномерная концентрация удобрений в конгломерате гидрогеля оказывает положительное влияние на динамику всходов, последующее развитие растений и способствует формированию одинаковых по размеру клубней.

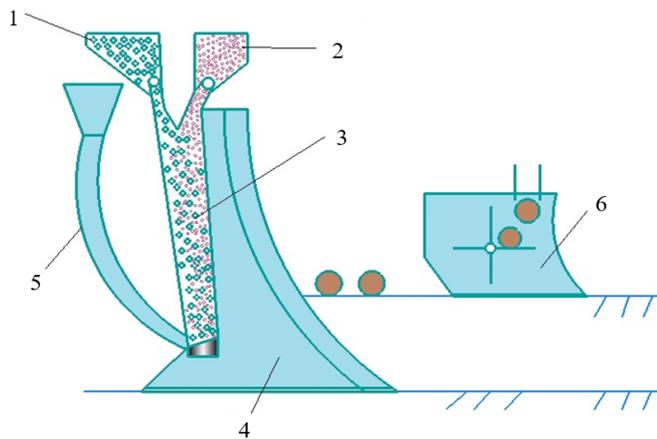


Рис. 1. Схема технологического процесса посадки клубней картофеля с обогащенным гидрогелем:

- 1 – бункер для удобрений; 2 – бункер для гидрогеля;
- 3 – канал ножа; 4 – лапа-бороздообразователь;
- 5 – воздуховод; 6 – сошник картофелесажалки

Fig. 1. Diagram of the technological process of planting potato tubers with enriched hydrogel:

- 1 – fertilizer hopper; 2 – hydrogel hopper; 3 – knife channel;
- 4 – furrower; 5 – air duct; 6 – potato planter opener

Схема технологического процесса посадки клубней картофеля с обогащенным гидрогелем представлена на рисунке 1. На типовую картофелесажалку установлена пневмосистема для перемешивания и подачи гидрогеля и удобрений. Транспортировка компонентов обеспечивается за счет создания вихревого потока, образуемого насадком с винтовым золотником. В основу теоретических исследований нахождения параметров пневмосистемы положено уравнение Бернулли о неразрывности потока жидкости или газа. Нахождение радиуса насадка выполнено с использованием программы MathCad.

Результаты и их обсуждение

Схема работы инжектора представлена на рисунке 2. На схеме обозначены сечения: *a-a*; *б-б*; *z-z*.

Чтобы не усложнять расчеты, примем условие, что сопротивление воздуха за счет трения о стенки воздуховодов и поверхности конструкции незначительны и в последующих выводах не учитываются. Исходя из указанных рассуждений, можно записать:

$$\frac{P_a}{\rho g} + \frac{\alpha_a \vartheta_a^2}{2g} = \frac{P_6}{\rho g} + \frac{\alpha_6 \vartheta_6^2}{2g}, \tag{1}$$

где P_a и P_6 – давление в сечениях *a-a* и *б-б*; ρ – плотность воздуха (исходя из ранее принятых условий плотность воздуха остается постоянной); ϑ_a – скорость воздушного потока в сечении *a-a*; ϑ_6 – скорость воздуха в сечении *б-б*; α_a и α_6 – коэффициенты, учитывающие изменение кинетической энергии воздуха при его движении (для коротких воздуховодов $\alpha \approx 1,05 \dots 1,1$).

Исходя из принятых условий и с учетом уравнения (1), определим скорость воздуха в воздуховоде 5 (рис. 1):

$$\vartheta_a = \left[\frac{2g \frac{P_6}{\rho g} + \frac{\alpha_6 \vartheta_6^2}{2g} - \frac{P_a}{\rho g}}{\alpha_a} \right]^{1/2}. \tag{2}$$

Примем $a_a \approx a_6 \approx 1,05$. Тогда

$$\vartheta_a = \left[\frac{2}{\rho} (P_6 - P_a) + \vartheta_6^2 \right]^{1/2}. \tag{3}$$

В полученном уравнении (3) присутствует разность давления в сечениях *a-a* и *б-б*. Эту разность можно представить в виде избыточного давления:

$$P_\Delta = (P_6 - P_a) \gamma_a, \tag{4}$$

где γ_a – удельный вес воздуха, Н/м³.

$$P_\Delta = H_p \gamma_a, \tag{5}$$

где H_p – пьезометрическая высота, м.

Отсюда зависимость (3) можно представить как

$$\vartheta_a = \left[\frac{2}{\rho} H_p \gamma_a + \vartheta_6^2 \right]^{1/2}. \tag{6}$$

Диаметр пневмопровода $D_a = const$, скорость ϑ_a не будет отличаться от скорости воздуха в воздуховоде, то есть $\vartheta_a = \vartheta_n$.

Для определения скорости ϑ_6 в сечение *б-б* воспользуемся схемой подачи гидрогеля в канал полого ножа. В соответствии с конструктивными особенностями устройство для подачи гидрогеля представляет собой полый цилиндр с закрепленными на нем лопатками (рис. 3). В нижней части между кромкой лопатки

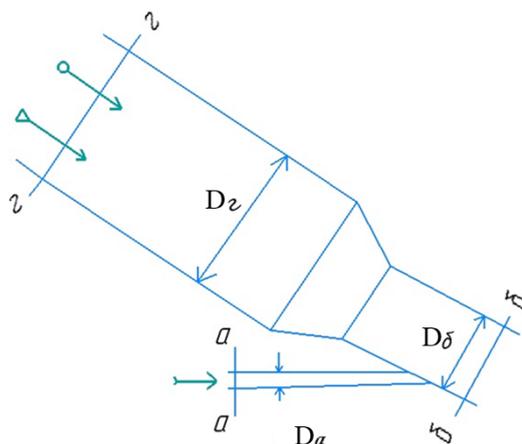


Рис. 2. Схема работы воздушно-смесительной системы:

- D_a – диаметр пневмопровода;
- D_z – диаметр тукопровода; D_6 – диаметр наконечника

Fig. 2. Operation diagram of the air mixing system

- D_a – diameter of pneumatic conduit;
- D_z – tube diameter; D_6 – tip diameter

и заслонкой зазор меньше диаметра частицы гидрогеля. Радиус окружности заслонки равен сумме радиусов цилиндра и лопатки. Кромка заслонки поднята на 10° от вертикальной оси цилиндра в нижней его части, что исключает самопроизвольное высыпание гидрогеля.

При вращении цилиндра 5 (рис. 3) лопатки перемещают гидрогель по внутренней части заслонки и сбрасывают его в полую часть ножа. Поскольку кромка заслонки поднята выше горизонтальной плоскости, частицы гидрогеля сбрасываются с нее под некоторым углом γ . Гранулы гидрогеля достаточно легковесны, и скорость их витания не превышает 1,2...1,5 м/с. Поэтому на перемещение частиц гидрогеля в воздушном пространстве будет действовать сопротивление воздуха. Его величина учитывается коэффициентом пропорциональности κ .

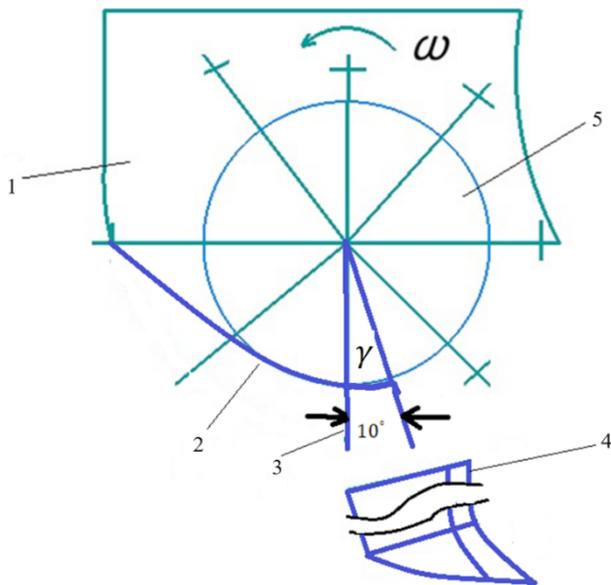


Рис. 3. Схема технологического процесса подачи гидрогеля в полый канал ножа:

1 – корпус; 2 – заслонка; 3 – лопатка; 4 – нож; 5 – цилиндр

Fig. 3. Diagram of the technological process of feeding hydrogel into the hollow channel of the knife:

1 – body; 2 – flap; 3 – blade; 4 – knife; 5 – cylinder

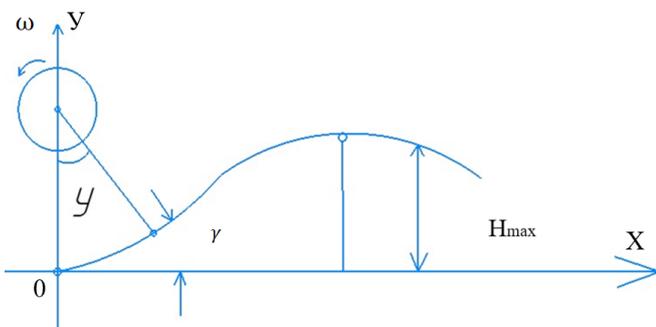


Рис. 4. Схема полета частицы гидрогеля при сбрасывании лопаткой

Fig. 4. Travel diagram of a hydrogel particle when dropped by a blade

Исходя из указанных рассуждений и схемы полета частицы гидрогеля, необходимо определить максимальную высоту подъема частицы гидрогеля H_{max} для последующего нахождения ее скорости.

В соответствии с выводами теоретической механики общее уравнения траектории движения частицы имеет вид:

$$x = \frac{\vartheta_0 \cos \gamma}{\kappa g} (1 - e^{-\kappa g t}); \tag{7}$$

$$y = \frac{1}{\kappa g} \left(\vartheta_0 \sin \gamma + \frac{1}{\kappa} \right) (1 - e^{-\kappa g t}) - \frac{t}{\kappa}, \tag{8}$$

где κ – коэффициент, учитывающий изменение времени на единицу пути при сопротивлении воздуха; скорость $\vartheta_0 = \omega R$, где ω – угловая скорость цилиндра, c^{-1} ; R – радиус лопатки, м.

Приведем уравнение (8) к явной форме, то есть представим в виде равенства:

$$1 - e^{-\kappa g t} = x \frac{\kappa g}{\omega R \cos \gamma}. \tag{9}$$

Выразим из полученного выражения величину t :

$$-e^{-\kappa g t} = x \frac{\kappa g}{\omega R \cos \gamma} - 1; \tag{10}$$

$$t = -\frac{1}{\kappa g} \ln \left(1 - x \frac{\kappa g}{\omega R \cos \gamma} \right). \tag{11}$$

Полученные выражения (10 и 11) подставим в уравнение (8):

$$y = x \frac{\kappa \omega R \sin \gamma + 1}{\kappa \omega R \cos \gamma} + \frac{1}{\kappa^2 g} \ln \left(1 - x \frac{\kappa g}{\omega R \cos \gamma} \right). \tag{12}$$

Максимальное значение высоты подъема частицы H_{max} определим на основании дифференциального вычисления, а именно: возьмем первую производную $\frac{dy}{dx} = \frac{dy}{dx} \frac{dt}{dy}$, но $\frac{dx}{dt} \neq 0$, отсюда $\frac{dy}{dt} = 0$.

Первая производная уравнения (8) –

$$\frac{dy}{dt} = \dot{y} = \left(\omega R \sin \gamma + \frac{1}{\kappa} \right) e^{-\kappa g t} - \frac{1}{\kappa}. \tag{13}$$

Отсюда

$$e^{-\kappa g t_1} = \frac{1}{\kappa \omega R \sin \gamma + 1}; \tag{14}$$

$$t_1 = \frac{1}{\kappa g} \ln (\kappa \omega R \sin \gamma + 1).$$

Тогда

$$y_{max} = H_{max} = \frac{\omega R \sin \gamma}{\kappa g} - \frac{1}{\kappa^2 g} \ln (\kappa \omega R \sin \gamma + 1); \tag{15}$$

$$H_{max} = \frac{1}{\kappa g} \left[\omega R \sin \gamma - \frac{1}{\kappa} \ln (\kappa \omega R \sin \gamma + 1) \right]. \tag{16}$$

Достигнув указанной высоты, частица гидрогеля устремляется вниз к смесительной камере со скоростью ϑ_r :

$$\vartheta_r = \vartheta_6 = \sqrt{2gH_\varepsilon},$$

где $H_\varepsilon = H_{max} + L_k$. При этом L_k – длина канала ножа. Отсюда скорость ϑ_6 –

$$\vartheta_6 = \left\{ \frac{2}{\varkappa} \left[\omega R \sin \gamma - \frac{1}{\varkappa} \ln(\varkappa \omega R \sin \gamma + 1) \right] + 2gL_k \right\}^{1/2}. \quad (17)$$

Подставим полученное выражение в уравнение (6) и найдем значение скорости в пневмопроводе ϑ_a :

$$\vartheta_a = \left\{ \frac{2}{\rho} H_p \gamma_a + \frac{2}{\varkappa} \left[\omega R \sin \gamma - \frac{1}{\varkappa} \ln(\varkappa \omega R \sin \gamma + 1) \right] + 2gL_k \right\}^{1/2}. \quad (18)$$

Рассчитаем конструкторские параметры насадка. При расчете воздушных систем чаще всего используют уравнение Эйлера, имеющего вид:

$$P_T = \frac{\gamma'}{g} (\vartheta_2 v_{t_2} - \vartheta_1 v_{t_1}), \quad (19)$$

где P_T – теоретический напор, Н/м²; γ' – объемный вес воздуха, Н/м³; ϑ_2 и ϑ_1 – скорость воздуха на входе и выходе, м/с; v_{t_2} и v_{t_1} – тангенциальные составляющие скорости на входе и выходе соответственно, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с².

Поскольку воздух направляется в систему из ресивера, уравнение 19 примет вид:

$$P_T = \frac{\gamma'}{g} (\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2); \quad (20)$$

$$\vartheta_2 = \vartheta_k;$$

$$P_T = \frac{\gamma'}{g} (\vartheta_k^2 - \vartheta_1^2). \quad (21)$$

Теоретический напор P_T определяется по формуле:

$$P_T = \frac{T_3}{Q_B},$$

где T_3 – энергия воздуха, направляемая в насадок, Н/с; Q_B – расход поданного воздуха, м³/с.

Следовательно, $T_3 = P_T \cdot Q_B$. При этом $T_3 = R_H \cdot \vartheta$, где R_H – усилие для преодоления воздухом насадка; ϑ – скорость прохождения воздуха через насадок, м/с.

$$Q_B = S_H \cdot \vartheta,$$

где S_H – площадь сечения, м² ($S_H = \pi r_H^2$); ϑ – скорость, м/с.

Силу воздушного потока R_H можно определить с помощью формул гидравлики:

$$P_B = \gamma' S_1 \frac{\vartheta_H^2}{g},$$

где S_1 – площадь сечения струи воздуха, м²; ϑ_H – скорость воздуха в насадке, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с².

Учитывая формулы, полученные ранее, запишем:

$$R_H \vartheta_1 = P_T \cdot Q_B;$$

$$S_1 \frac{\vartheta_1^3}{g} \gamma' = \frac{\gamma'}{g} (\vartheta_B^2 - \vartheta_1^2) S_H \cdot \vartheta_B. \quad (22)$$

Тогда

$$S_1 = \frac{(\vartheta_B^2 - \vartheta_1^2) S_H \cdot \vartheta_{\text{вит}}}{\vartheta_1^3}. \quad (23)$$

Скорость воздуха в насадке ϑ приравняем к критической скорости ϑ_k , при которой частицы гидрогеля витают в воздушном потоке, то есть $\vartheta_1 = \vartheta_k = \vartheta_{\text{вит}}$. Тогда

$$S_1 = \frac{(\vartheta_B^2 - \vartheta_k^2) \cdot S_H}{\vartheta_k^2}. \quad (24)$$

Поскольку $(\vartheta_B^2 - \vartheta_k^2) = \vartheta_a^2$, учитывая формулу (19), в конечном виде представим значение площади насадка на выходе:

$$S_1 = \frac{\frac{2}{\rho} H_p \gamma_a + \frac{2}{\varkappa} \left[\omega R \sin \gamma - \frac{1}{\varkappa} \ln(\varkappa \omega R \sin \gamma + 1) \right] + 2gL_k}{\vartheta_k^2}.$$

Площадь сечения струи воздуха равна площади сечения воздушного канала, то есть $S_1 = S_k = \pi r_H^2$.

Тогда, подставив полученные выражения в уравнение (24), можно записать:

$$\pi r_H^2 = \frac{\frac{2}{\rho} H_p \gamma_a + \frac{2}{\varkappa} \left[\omega R \sin \gamma - \frac{1}{\varkappa} \ln(\varkappa \omega R \sin \gamma + 1) \right] + 2gL_k}{\vartheta_k^2}.$$

Поскольку $H_p \gamma_a = \Delta P$, радиус насадка будет равен:

$$r_H = \left\{ \frac{r_k^2}{\left[\frac{2}{\rho} H_p \gamma_a + \frac{2}{\varkappa} \left[\omega R \sin \gamma - \frac{1}{\varkappa} \ln(\varkappa \omega R \sin \gamma + 1) \right] + 2gL_k \right]^{1/2}} \right\}^{1/2}. \quad (25)$$

Поскольку $H_p \gamma_a = \Delta P$, формула примет вид:

$$r_H = \left\{ \frac{r_k^2}{\left[\frac{2}{\rho} \Delta P + \frac{2}{\varkappa} \left[\omega R \sin \gamma - \frac{1}{\varkappa} \ln(\varkappa \omega R \sin \gamma + 1) \right] + 2gL_k \right]^{1/2}} \right\}^{1/2}. \quad (26)$$

Полученная формула является довольно громоздкой, и для ее решения необходимо использовать соответствующие программы – например, Mathcad. Для этого разработана блок схема, представленная на рисунке 5. При подстановке соответствующих числовых значений получены графики зависимости радиуса насадка от избыточного напора в пневмосистеме (рис. 6).

Поскольку значение критических скоростей гидрогеля и удобрений отличается, на графике (рис. 6) представлена некоторая зона, ограниченная их соответствующими значениями.

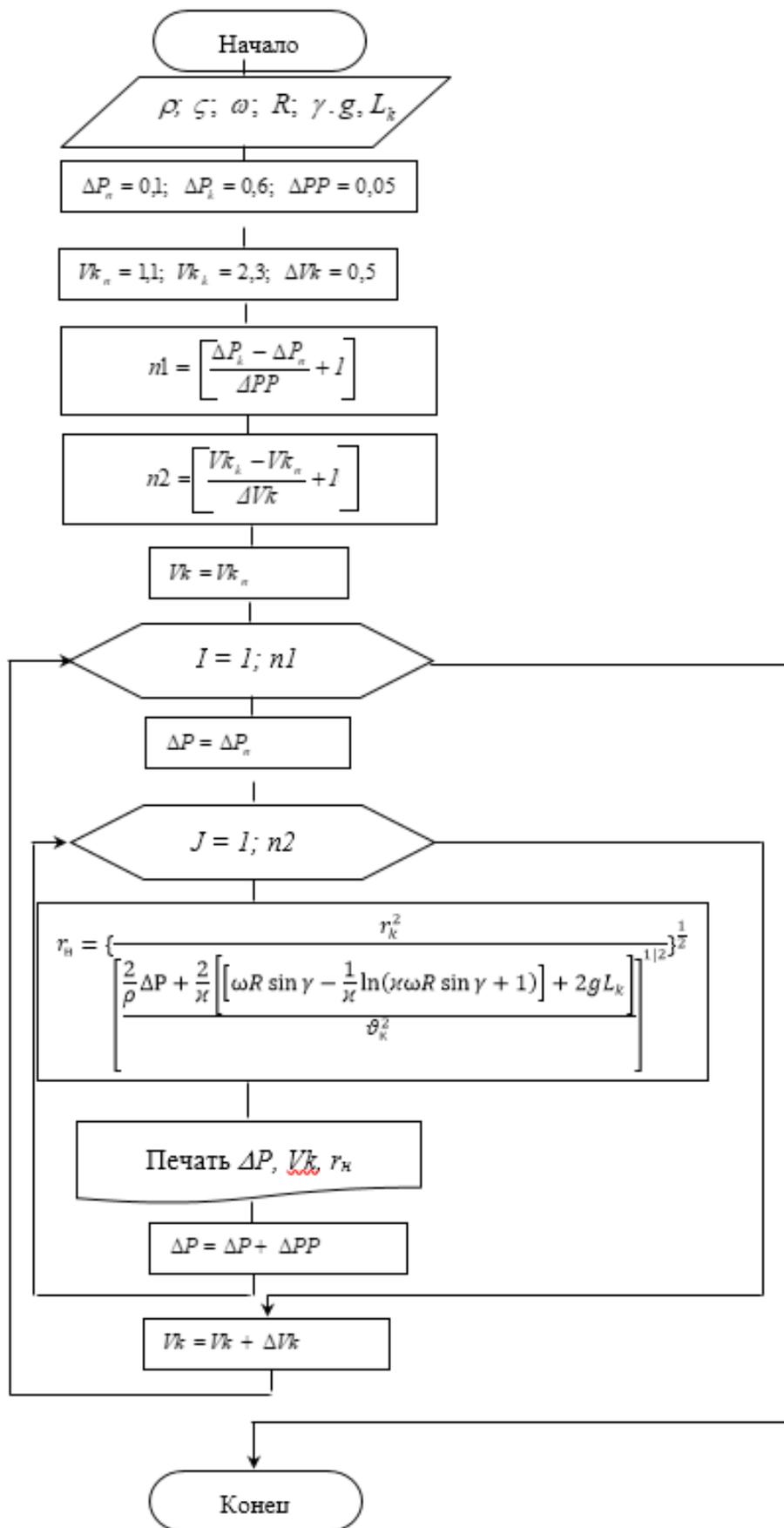


Рис. 5. Блок-схема по разработке программы для определения радиуса насадка
 Fig. 5. Flowchart for the development of an algorithm for determining the nozzle radius

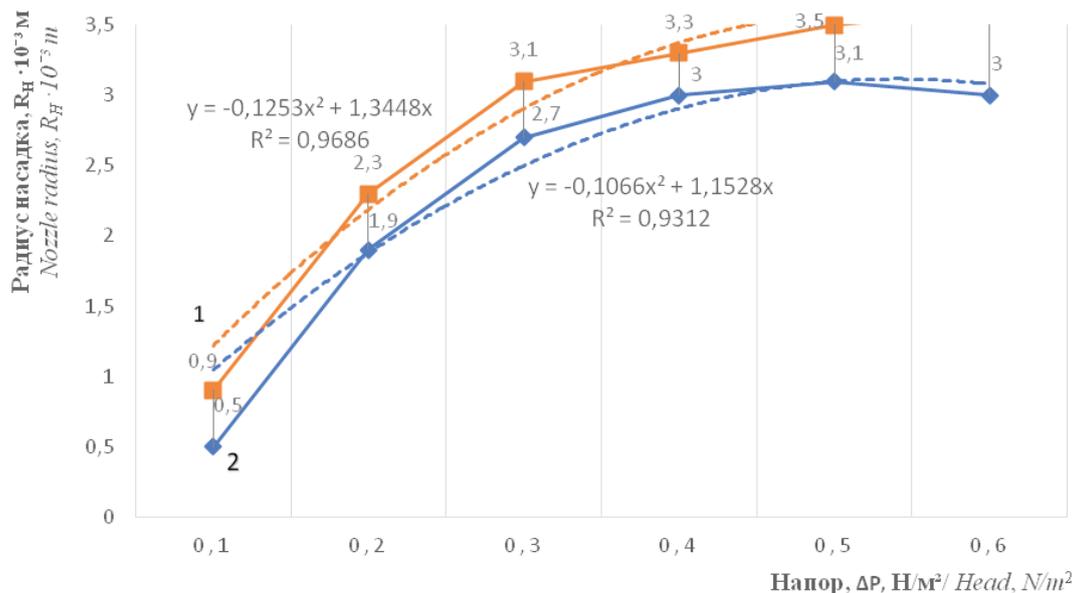


Рис. 6. Изменение радиуса насадка в зависимости от избыточного напора в пневмосистеме:
1 – скорость витания удобрений, м/с; 2 – скорость витания гидрогеля, м/с

Fig. 6. Changing the radius of the nozzle tip depending on the excess pressure in the pneumatic system:
1 – soaring rate of fertilizers, m/s; 2 – soaring rate of hydrogel, m/s

Выводы

1. Полученные аналитические зависимости позволили рассчитать параметры пневмосистемы для внесения обогащенного гидрогеля при посадке картофеля на орошении.

2. Теоретическое изменение радиуса насадка для создания избыточного напора в системе, определенное на основе уравнения Бернулли, получено с использованием программы Mathcad.

3. Оптимальным напором в пневмосистеме, обеспечивающей транспортировку смеси гидро-сорбента и удобрений ниже посадочной борозды картофеля, можно считать величину от 0,22 до 0,28 Н/м³. При этом параметры радиуса насадка находятся в пределах от $3 \cdot 10^{-3}$ м до $3,5 \cdot 10^{-3}$ м, средняя величина радиуса составляет $3,25 \cdot 10^{-3}$ м.

Список источников

1. Старовойтов В.И., Старовойтова О.А., Манохина А.А. Возделывание картофеля с использованием влагосберегающих полимеров // Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2015. № 1. С. 15-19. EDN: TYJHJQ
2. Гиченкова О.Г., Лаптина Ю.А., Дергачева И.А. Результаты агроэкологического испытания сортов картофеля отечественной селекции в условиях орошения Волгоградской области // Орошаемое земледелие. 2021. № 4. С. 41-44. <https://doi.org/10.35809/2618-8279-2021-4-7>
3. Rathore S.S., Shekhawat K., Dass A., Premi O.P., Rathore B.S., Singh V.K. Deficit irrigation scheduling and superabsorbent polymer-hydrogel enhance seed yield, Water productivity and economics of indian mustard under semi-arid ecologies. *Irrigation and Drainage*. 2019;68(3):531-541. <https://doi.org/10.1002/ird.2322>
4. Ioannou A., Gohari Gh., Papaphilippou P. et al. Advanced nanomaterials in agriculture under a changing climate: The way to the future? *Environmental and Experimental Botany*. 2020;176:104048. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104048>
5. Агафонов О.М., Ревенко В.Ю. Возможности полимерного гидрогеля как накопителя почвенной влаги в зоне неустойчивого увлажнения Краснодарского края // Международный

References

1. Starovoitov V.I., Starovoitova O.A., Manokhina A.A. Potato cultivation using moisture-saving polymers. *Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin"*. 2015;1:15-19. (In Russ.)
2. Gichenkova O.G., Laptina Yu.A., Dergacheva I.A. Results of agroecological tests of potato varieties of domestic breeding in the conditions of irrigation of the Volgograd region. *Irrigated agriculture*. 2021;4:41-44. (In Russ.) <https://doi.org/10.35809/2618-8279-2021-4-7>
3. Rathore S.S., Shekhawat K., Dass A. et al. Deficit irrigation scheduling and superabsorbent polymer-hydrogel enhance seed yield, Water productivity and economics of indian mustard under semi-arid ecologies. *Irrigation and Drainage*. 2019;68(3):531-541. <https://doi.org/10.1002/ird.2322>
4. Ioannou A., Gohari Gh., Papaphilippou P. et al. Advanced nanomaterials in agriculture under a changing climate: The way to the future? *Environmental and Experimental Botany*. 2020;176:104048. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104048>
5. Agafonov O.M., Revenko V.J. Possibilities of polymer hydrogel as a storage of soil moisture in the zone of unstable moistening of the Krasnodar Region. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2017;10:35-38. (In Russ.)

журнал гуманитарных и естественных наук. 2017. № 10. С. 35-38. EDN: ZTPRLR

6. Цепляев А.Н., Непокрытый Р.А. Энергоресурсосберегающие технологии посадки картофеля в орошаемом земледелии с использованием модернизированной картофелесажалки // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 1 (69). С. 472-482. EDN: IBSIVA

7. Данилова Т.Н. Влияние полимерных гелей «Ритин-10» и «В 415-К» на водообеспечение зерновых культур в условиях почвенной засухи // Агрофизика. 2018. № 1. С. 1-9. <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2018.01.01>

8. Дыйканова М.Е., Левшин А.Г., Гаспарян И.Н., Ивашова О.Н. Ресурсосберегающая технология возделывания раннего картофеля // Картофель и овощи. 2019. № 2. С. 26-28. <https://doi.org/10.25630/PAV.2019.14.2.005>

9. Непокрытый Р.А., Цепляев А.Н. Теоретический анализ работы ножа для подачи гидрогеля модернизированной картофелесажалки при внесении гидрогеля на орошаемых участках // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2022. № 4 (68). С. 580-587. EDN: TEBZGI

10. Калинин А.Б., Теплинский И.З., Теймуров Т.Ш. Совершенствование методов и средств снижения технологических рисков при функционировании машин для возделывания картофеля // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2021. № 1 (62). С. 178-190. <https://doi.org/10.24412/2078-1318-2021-1-178-190>

11. Годунова Е.И., Шкабарда С.Н., Гундырин В.Н. Использование гидрогеля и влагообеспеченность культур в зоне неустойчивого увлажнения Ставрополя // Земледелие. 2014. № 6. С. 37-38. EDN: SLBYYV

12. Ревенко В.Ю., Агафонов О.М. Использование гидрогелей в растениеводстве // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2018. № 11-2. С. 59-65. <https://doi.org/10.24411/2500-1000-2018-10193>

13. Кружилин И.П., Дубенок Н.Н., Мушинский А.А. и др. Эффективность возделывания картофеля при орошении в степной зоне Урала // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2015. № 1-2. С. 23-26. EDN: TGEVRR

6. Tseplyaev A.N., Nepokrytyy R.A. Energy-saving technologies of potato planting in irrigated agriculture using a modernized potato planter. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2023;1(69):472-482. (In Russ.)

7. Danilova T.N. Influence of "Ritin-10" and "B415-K" polymer gels on water supply of grain crops in conditions of soil drought. *Agrophysica*. 2018;1:1-9. (In Russ.) <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2018.01.01>

8. Dyikanova M.E., Levshin A.G., Gasparyan I.N., Ivashova O.N. Resource-saving technology of cultivation of early potatoes. *Potatoes and vegetables*. 2019;2:26-28. (In Russ.) <https://doi.org/10.25630/PAV.2019.14.2.005>

9. Nepokrytyy R.A., Tseplyaev A.N. Theoretical analysis of the operation of a knife for feeding hydrogel to a modernized potato planter when applying hydrogel in irrigated areas. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2022;4(68):580-587. (In Russ.)

10. Kalinin A.B., Teplinsky I.Z., Teymurov T.S. Improvement of methods and means of technological risks reducing when operating machines for potato producing. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2021;1(62):178-190. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2078-1318-2021-1-178-190>

11. Godunova E.I., Shkabarda S.N., Gundyryin V.N. Using of hydrogel and the moisture content of cultures in the area of unstable moistening of Stavropol region. *Zemledelie*. 2014;6:37-38. (In Russ.)

12. Revenko V.Yu., Agafonov O.M. The use of hydrogels in crop production. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2018;11-2:59-65. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/2500-1000-2018-10193>

13. Kruzhilin I.P., Dubenok N.N., Mushinsky A.A. et al. Effectiveness of potato cultivation under irrigation in the Ural steppe zone. *Russian Agricultural Sciences*. 2015;1-2:23-26. (In Russ.)

Сведения об авторах

¹ **Цепляев Алексей Николаевич**, д-р с.-х. наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия – филиал «Федеральный научный центр гидротехники» и мелиорации имени А.Н. Костякова» (ВНИИОЗ – филиал ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова»); 400002, Российская Федерация, Южный Федеральный округ, Волгоградская область, г. Волгоград, ул. Тимирязева, 9; can_volgau@mail.ru; SPIN-код: 9661-3149, AuthorID: 622919

² **Непокрытый Роман Александрович** , аспирант, Волгоградский государственный аграрный университет; 400002, Российская Федерация, Южный Федеральный округ, Волгоградская область, г. Волгоград, пр-т Университетский, 26; nepokrytyroman@yandex.ru , SPIN-код: 6385-8059, AuthorID: 1257314.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 04.12.2024, после рецензирования и доработки 28.01.2025; принята к публикации 05.02.2025

Author Information

Aleksei N. Tseplyaev¹, DSc (Ag), Lead Researcher; All-Russian Scientific Research Institute of Irrigated Agriculture – Branch of Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Melioration named after A.N. Kostyakov (VNIIOZ); 400002, Russia, Volgograd region, Volgograd, Timiryazeva Str., 9; e-mail: canvolgau@mail.ru

Roman A. Nepokrytyy² , postgraduate student, the Department of Technical Systems in Agriculture, Volgograd State Agrarian University; 400002, Russia, Volgograd Region, Volgograd, Universitetskiy Ave., 26; e-mail: nepokrytyroman@yandex.ru 

Conflict of interests

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

Received 04.12.2024; Revised 28.01.2025; Accepted 05.02.2024

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.331:633.11

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-21-29>**Оценка эксплуатационной точности пневматической сеялки на ферме Эритреи****Т.А. Медхн¹✉, А.Г. Левшин², С.Г. Теклай³**^{1,2} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Москва, Россия³ Колледж сельского хозяйства, потребительских и экологических наук, Университет штата Нью-Мексико; Лас-Крусес, США¹ noahtesas@gmail.com ✉; <https://orcid.org/0009-0002-4371-13233>² alevshin@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8010-4448>³ gtsimon1994@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-3336-0523>

Аннотация. Опыт использования современного посевного комплекса на базе сеялки Nardi Dora (DORA 600) на ферме Целот Республики Эритрея при посеве пшеницы показал большую вариацию характеристик, оценивающих точность движения агрегата: неравномерные расстояния между рядами, видимые зоны повторных посевов и зоны пропусков при посеве. Неточный высев приводит к образованию участков с повторным посевом и пропускам (незасеянной площади). При этом увеличиваются денежные затраты по причине перерасхода посевного материала и топлива, снижается производительность. Эти негативные явления стали причиной проведения исследований процесса посева и разработки рекомендаций по устранению недостатков. Исследования проведены с целью определения процента незасеянных и повторно засеянных площадей и оценки точности движения пневматической сеялки DORA 600 в сравнении с современными системами автоматизированного вождения. Эксперимент проведен в Эритрее на площади около 107 га, засеянной пшеницей. Проведена оценка точности посева по результатам отслеживания треков движения агрегата на мобильном телефоне с использованием приложения Locus GIS offline land survey, версия 1.17.0. По записи треков определены отклонения фактической рабочей ширины от требуемых значений. Произведено сравнение точности движения исследуемого агрегата с системой автовождения. Проведен анализ современных систем автовождения ведущих компаний Autopilot, Autopilot™, AutoTrac™, SteerCommand with GPS7500, AGI-4, GPS PILOT, Autosteer, Auto-Steer, F100 Auto Steer System и IntelliSteer™. По точности и универсальности управления выбран российский продукт Autopilot, обеспечивающий точность 1 см + 1 ppm. Определен рабочий диапазон скоростей – 10-12 км/ч, обеспечивающий допустимый интервал варьирования рабочей ширины захвата. Статистический анализ показал высокий уровень превосходства сеялок с GPS-наведением в сравнении с обычным посевным агрегатом. Авторы предложили применять в Эритрее передовые автоматизированные технологии.

Ключевые слова: пневматическая сеялка, повторный высев, незасеянная площадь, оценка точности посева, рабочая скорость, коэффициент рабочих ходов, статистический анализ, точность движения агрегата

Для цитирования: Медхн Т.А., Левшин А.Г., Теклай С.Г. Оценка эксплуатационной точности пневматической сеялки на ферме Эритреи // *Агроинженерия*. 2025. Т. 27, № 2. С. 21-29. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-21-29>

ORIGINAL ARTICLE

Evaluation of operational precision of a pneumatic seed drill used by farms in Eritrea**T.A. Medhn¹✉, A.G. Levshin², S.G. Teklay³**^{1,2} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia³ College of Agriculture, Consumer and Environmental Sciences, New Mexico State University; Las Cruces, USA¹ noahtesas@gmail.com ✉; <https://orcid.org/0009-0002-4371-13233>² alevshin@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8010-4448>³ gtsimon1994@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-3336-0523>

Abstract: The use of a contemporary sowing machinery unit – Nardi Dora (DORA 600) air drill for sowing wheat at the Tselot farm in Eritrea revealed a wide range of characteristics that trigger the assessment of the movement precision of the unit. They include uneven inter-row distances and visible over-seeded and skipped zones. Inaccurate seeding results in repeated and missed (unsown area) sowing patterns that lead to the rise of monetary expenses

owing to the overconsumption of seed and fuel while lowering production. The study sought to assess the rate of repetition and rate of miss operations to evaluate the sowing precision of the Nardi Dora Air drill and compare it with the modern automated systems. The experiment was conducted in Eritrea on a wheat-sown area of around 107 ha. Sowing precision evaluation was based on the tracked routes on a mobile phone using the Locus GIS offline land survey application version 1.17.0. Deviations of the actual working width from the required values were determined from the track records. The movement precision of the unit was compared with the auto-driving systems of the modern driving systems: Autopilot, Autopilot™, AutoTrac™, SteerCommand with GPS7500, AGI-4, GPS PILOT, Autosteer, Auto-Steer, F100 Auto Steer System и IntelliSteer™. An operating speed range of 10-12 km/h provided an acceptable range of the working width. Statistical analysis showed a high level of superiority of GPS-guided seeders over the conventional sowing units. Consequently, the authors recommend using advanced automated technologies in Eritrea.

Keywords: pneumatic seed drill, resowing, unsown area, sowing precision assessment, working speed, run coefficient, statistical analysis, machinery movement precision

For citation: Medhn T.A., Levshin A.G., Teklay S.G. Evaluation of operational precision of a pneumatic seed drill used by farms in Eritrea. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(2):21-29 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-21-29>

Введение

Уровень механизации сельского хозяйства страны обуславливает эффективность сельскохозяйственного производства и уровень национального валового дохода [1, 2]. Особенно это актуально для стран с экономикой, в значительной степени зависящей от сельского хозяйства, характеризующихся неопределенными климатическими условиями, прогрессивным ростом населения и скудными пахотными землями. Сельскохозяйственная механизация, снижая долю человеческого труда на ферме, повышает производительность, ускоряет процессы посадки и сбора урожая, тем самым снижая пиковые потребности в рабочей силе в сезонный период [1].

Оценка эффективности сельскохозяйственных операций позволяет скорректировать планировку полей, выбрать методы и организацию работ. При этом можно применить множество подходов – например, оценить эффективность использования времени, производительность, потребление энергии и качество работы.

Высокопроизводительные и точные сеялки обеспечивают оптимальную норму высева, точное расстояние между семенами и рядами и высева на нужной глубине [2, 3]. Автоматизированные машины, использующие RTK и GPS, отличаются точностью работы и минимумом ошибок. Высокопроизводительные сеялки в отличие от небольших агрегатов обеспечивают своевременность работы [4], однако могут быть нерентабельными по причине их высокой первоначальной стоимости. Выбор оптимального размера сеялки является необходимым.

Количественная характеристика сеялки (производительность) определяется размером обрабатываемой площади за единицу времени, в то время как для

качественной характеристики (точность размещения семян в трехмерном пространстве) свойственна равномерность распределения семян вдоль, поперек рядов и по глубине посадки. Точность высева достигается минимизацией ошибок маршрута следования машинно-тракторного агрегата (МТА). Для поддержания параллельности маршрутов МТА на заданных интервалах отслеживаются записи их передвижения [5]. Эксплуатационная точность МТА определяется степенью незасеянной площади или частичным либо полным перекрытием маршрутов [6].

Несколько лет назад в Эритрее начали внедрять механизированную технологию посева для многих богарных культур, в том числе для пшеницы. Богарная пшеница – одна из основных культур в Эритрее¹, выращиваемая в основном в горных районах на территории около 30000 га. Для эффективной организации работы, оптимизации используемых ресурсов и повышения урожайности необходимо провести оценку эксплуатационной точности пневматической сеялки.

Цель исследований: оценка точности пневматической сеялки путем анализа отклонений рабочей ширины от требуемых значений и расчета площади незасеянных и повторно засеянных участков; сравнение эффективности обычной пневматической сеялки с автоматизированными системами посева; определение предельного диапазона скорости движения сеялки на основе соотношения погрешностей рабочей ширины, зафиксированных в ходе эксперимента.

¹Eritrea: ongoing research produces six high yield wheat varieties. ICARDA. [Electronic resource]. URL: <https://www.icarda.org/media/news/eritrea-ongoing-research-produces-six-high-yield-wheat-varieties> (accessed: 15.12.2023).

Материалы и методы

Исследования проводились в Целоте, Асмара, Эритрея (широта $15^{\circ}17'6.4''$, долгота $38^{\circ}56'59''$, высота 2341 м над уровнем моря) на площади около 107 га, засеянной пшеницей с помощью тракторной пневматической сеялки Nardi Dora Air Drill². Пневматическая сеялка DORA 600, имеющая 40 сошников, рабочую ширину 6 м, была оснащена трактором New Holland T6090 мощностью 152 лошадиные силы. Сеялка, оснащенная стандартным бункером емкостью 800 л (общим для всех моделей), механическими маркерами колеи, сошниками типа Suffolk и стандартным вентилятором с приводом от ВОМ, весит 1090 кг и работает с междурядьем 15,3 см.

Выпадение и распределение осадков в Эритрее являются непредсказуемыми и нестабильными. Во время проведения эксперимента (между предпосевной и посевной фазами) не было ни одного дождя, в результате чего почва осталась сухой и пыльной. Это затрудняло наблюдение оператора за линиями маркеров, сделанными МТА, поэтому на линии находились люди, указывавшие оператору направление (рис. 1).

Посев проводился в течение 8 дней, с 3 по 10 июля 2023 г. включительно. Для отслеживания маршрутов МТА использовалось автономное приложение Locus GIS offline land survey – data collector, mapper, area calculator, and SHP editor version 1.17.0. Для большей точности отслеживания маршрутов мобильный телефон с включенным приложением располагался вдоль центральной линии трактора. Запись маршрутов следования экспортировалась в Google Earth Pro и ArcGIS для дальнейшей обработки.

Для оценки точности маршрутов и результатов посадочных работ, выполненных МТА, проведено однодневное полевое обследование всходов на выбранных участках. В мобильном приложении исследовались промежутки между маршрутами, ширина которых в идеале должна составлять 6,15 м. На рисунке 2 отображены пространственная запись участка 11, выполненная в приложении, и реальная фотография. В точке, где лежит линейка 50 см, расстояние между рядами составляло 0,8 м вместо 0,15 м.

Записи маршрутов МТА показаны на рисунке 3, на котором темными линиями обозначены границы четырех участков, а сиреневым цветом – отслеживаемые



Рис. 1. Люди, находящиеся на сделанной маркером МТА линии, направляющие оператора

Fig. 1. People standing on the line made by the machinery unit marker and guiding the operator



Рис. 2. Фотография участка 11 с мобильного приложения и его натуральный увеличенный фрагмент

Fig. 2. Photo of plot 11 from the mobile application and its enlarged section

² AMIA. Nardi Dora Air Drill. AMIA. [Electronic resource]. AMIA Online Shop. 2021. URL: <https://www.agrimarketia.com/product/nardi-dora-air-drill/> (accessed: 15.12.2023).

маршруты, записанные во время полевых работ с использованием приложения Locus GIS.

На всех участках, перпендикулярно направлению движения МТА, измеряли расстояние между линиями маршрутов: например, вдоль линий В – В, С – С, А – А и D – D (рис. 3). Количество повторных сечений на всех полях – 5.

Отклонение ширины от идеального значения использовали для количественной оценки площадей ошибок (площадь повторно засеивалась или оставалась незасеянной). В этих целях размер идеальной площади математически определяется по уравнению 1:

$$S = \sum_{i=1}^n a_i = \frac{B_0}{2}(L_0 + L_n) + \frac{B_1}{2}(L_0 + L_1) + \frac{B_2}{2}(L_1 + L_2) + \dots + \frac{B_n}{2}(L_{n-1} + L_n), \quad (1)$$

где S – общая площадь, обработанная за время работы рассматриваемого участка, m^2 ; a_i – площадь между двумя последовательными отслеживаемыми маршрутами, m^2 ; B_0 – фактическая ширина, м, пройденная за один проход орудия (рис. 4а); B_i – расстояние между двумя последовательными записанными маршрутами, м; $L_0, L_1 \dots L_n$ – длины отдельных маршрутов, м, пройденных техникой между поворотными

остановками (рис. 4а); $i = 1, 2 \dots n$ – количество отдельных маршрутов.

По причине неточности вождения, особенностей рельефа местности и других факторов участки могут засеиваться повторно (RP) или оставаться незасеянными между проходами (MP). Значения RP и MP можно определить по формулам [6]:

$$RP = \frac{S_R}{S - S_R} \cdot 100; \quad (2)$$

$$MP = \frac{S_M}{S - S_R + S_M} \cdot 100; \quad (3)$$

$$S_R = B_{ovi}; \quad (4)$$

$$S_M = B_{usi} \cdot L_i, \quad (5)$$

где S_R – повторно засеянная площадь, m^2 ; S_M – незасеянная площадь, m^2 ; B_{ov} и B_{us} – ширина (м), перекрытая и оставшаяся незасеянной, соответственно (рис. 4б).

Коэффициент рабочих ходов оценивается отношением расстояния рабочего маршрута к сумме рабочих и холостых ходов³:

$$\varphi_{PO} = \frac{S_P}{S_P + S_{XO}} \cdot 100, \quad (6)$$

где S_{XO} и S_P – длина холостого и рабочего пути агрегата.

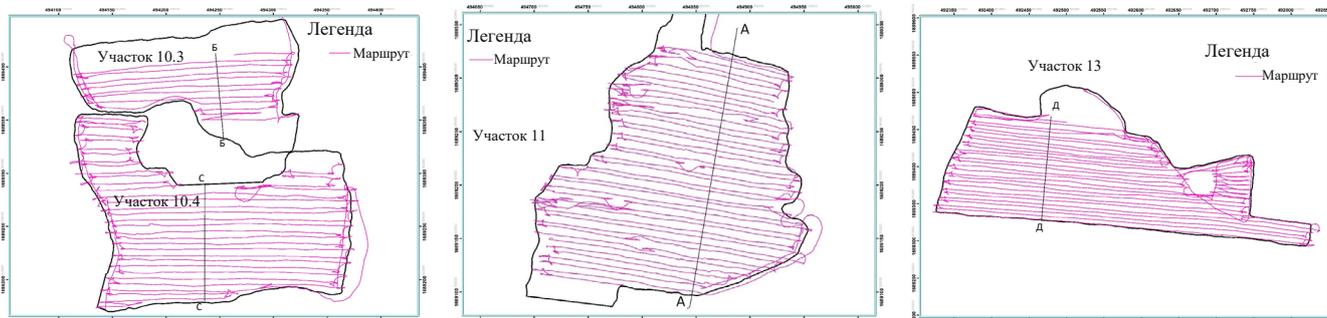


Рис. 3. Отслеживаемые маршруты оцениваемых участков

Fig. 3. Tracked routes of the assessed plots

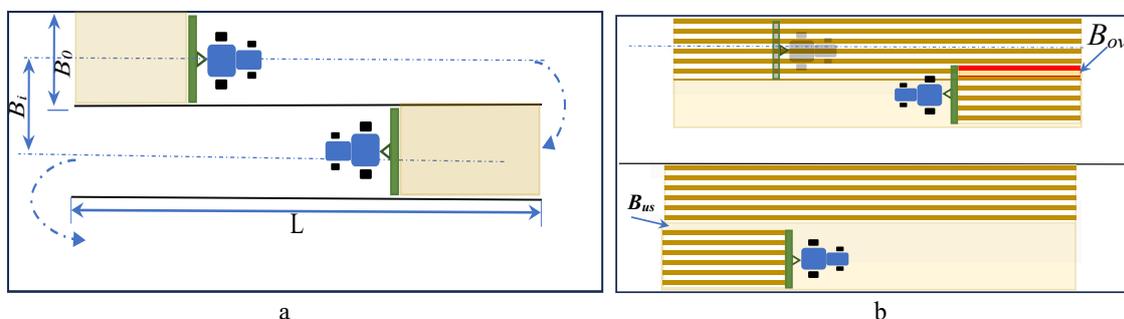


Рис. 4. Идеальная ширина, расстояние между маршрутами (а) и возможные отклонения (б)

Fig. 4. Ideal width and distance between routes (a) and possible deviations (b)

³Зангиев А.А., Скороходов А.Н. Практикум по эксплуатации машинно-тракторного парка: Учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2020. 464 с.

Значения φ_{po} лежат в диапазоне 0...100%. Значения, близкие к единице, указывают на меньшую дальность холостого хода, и наоборот.

Повышение точности и эффективности движения агрегатов возможно за счет применения систем автоматического управления. Различные компании-производители сельскохозяйственной техники предлагают системы с разным уровнем точности и услуг по настройке (табл. 1).

Точность высева, контролируемую человеком по сравнению с автоматизированными системами, и количественную оценку производительности определяли с помощью t-теста.

Ошибку МТА (ε) определили как абсолютное значение разницы между фактическими (B_{ui}) и теоретическим (B_i) расстоянием между последующими

проходами (уравнение 8). Ссылаясь на значения в таблице 1, выполнили одновыборочный t-тест (уравнение 9) при сравнении ошибки МТА и уровня точности автоматизированной системы:

$$\varepsilon_{i(T6090)} = |B_{ui} - B_i|; \quad (8)$$

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{s/\sqrt{n}}, \quad (9)$$

где \bar{x} – среднее значение выборки; μ – идеальное значение ширины между двумя проходами; s – стандартное отклонение выборки; n – размер выборки.

Рабочая скорость пневматической сеялки существенно влияет на расстояние между семенами, качество посева и урожайность биомассы. Идеальная скорость зависит от вида культуры, состояния почвы

Сравнительный обзор систем автоматического вождения агрегата

Таблица 1

Comparative overview of automated machinery unit guidance systems

Table 1

Компания <i>Company</i>	Система <i>System</i>	Точность, см <i>Accuracy, cm</i>	Коррекционные услуги <i>Correction services</i>
ИТЭЛМА СП	Autopilot ⁴	1 см + 1 ppm	RTK
John Deere	AutoTrac™ ⁵	±2,5 (RTK), ±3 (SF3)	StarFire™ RTK, SF3, SF2, SF1
Trimble	Autopilot™ ⁶	±2,5 (RTK)	RTK, CenterPoint® RTX, RangePoint® RTX, ViewPoint™ RTX
Ag Leader	SteerCommand® with GPS7500 ⁷	±2,5 (RTK)	RTK, TerraStar-C Pro, TerraStar-L
Topcon	AGI-4 ⁸	±2 (RTK)	RTK, TopNET Global D, SBAS (WAAS/EGNOS/MSAS)
CLAAS	GPS PILOT ⁹	±2-3 (RTK)	RTK, EGNOS, other regional correction services
FieldBee	Autosteer ¹⁰	±2,5	RTK
FJDynamics	Auto-Steer ¹¹	±2,5	GPS, GLONASS, Beidou, Galileo
Sveaverken ¹²	F100 Auto Steer System	±2,5	GPS, GLONASS
NewHolland	IntelliSteer™	±1-2 (RTK)	RTK, WAAS, EGNOS ¹³

⁴ Itelma: сайт. <https://www.itelma-sp.ru/produkty/gidravlicheskiy-avtopilot>. [Electronic resource].

⁵ Precision Ag Technology. Guidance Solutions | John Deere US. [Electronic resource]. 2024. URL: <https://www.deere.com/en/technology-products/precision-ag-technology/guidance/> (accessed: 05.06.2024).

⁶ Trimble RTX Frequently Asked Questions TRANSFORMING THE WAY THE WORLD WORKS. [Electronic resource]. 2019.

⁷ SteerCommand® Z2. [Electronic resource]. 2024. URL: <https://www.agleader.com/guidance-and-steering/steercommand-z2/> (accessed: 05.06.2024).

⁸ AGI-4. Topcon Positioning Systems, Inc. [Electronic resource]. 2024. URL: <https://mytopcon.topconpositioning.com/support/products/agi-4> (accessed: 05.06.2024).

⁹ CEMIS1200 becomes the new standard for precision farming applications at CLAAS – Press releases. CLAAS Group. [Electronic resource]. 2021. URL: <https://www.claas-group.com/press-group-communications/press-releases/cemis-1200-becomes-the-new-standard-for-precision-farming-applications-at-claas/2693590> (accessed: 05.06.2024).

¹⁰ FieldBee – GPS tractor systems. Precision farming tools. [Electronic resource]. 2024. URL: <https://www.fieldbee.com/> (accessed: 05.06.2024).

¹¹ FJDynamics auto-steering kit: Your experienced assistant in precision farming – Future Farming. [Electronic resource]. 2021. URL: <https://www.futurefarming.com/tech-in-focus/fjdynamics-auto-steering-kit-your-experienced-assistant-in-precision-farming/> (accessed: 05.06.2024).

¹² F100 AUTOMATIC CONTROL SYSTEM. Sveaverken. [Electronic resource]. 2024. URL: <https://www.sveaverken.com/ru/products/f100-auto-steer-system> (accessed: 05.06.2024).

¹³ PLM GUIDANCE. NHAG. [Electronic resource]. 2024. URL: <https://agriculture.newholland.com/apac/th-th/equipment/products/agricultural-tractors/t7-tier-4a/detail/plm-guidance> (accessed: 05.06.2024).

и типа сеялки. Для участков 10.4, 11 и 13 время прохождения маршрута определяли по записи трека движения, скорость МТА вычисляли по формуле:

$$v_i = \frac{l_i}{t_i}, \tag{7}$$

где v_i – скорость, м/с; l_i – длина отдельного маршрута, м; t_i – время, с, необходимое для завершения маршрута l_i .

Результаты и их обсуждение

Отклонение фактического расстояния между маршрутами от требуемой ширины 6,15 м и повторный высев площадей отражены на рисунке 5.

На рисунке показаны средняя ширина и количество операций на четырех участках. Отметим, что непараллельные маршруты сопровождаются высокой частотой повторно засеянных площадей. Кроме того, нельзя исключить вероятность, что между маршрутами останется незасеянное пространство.

Количество незасеянных и повторно засеянных участков определяли путем нахождения разницы между требуемой шириной (интервал между последовательными трассами, равный 6,15 м) и фактической шириной.

Чем меньше расстояние ниже контрольной линии, тем больше ширина перекрытия и тем больше размер повторно засеянной области; чем выше точка над контрольной линией, тем больше площадь, оставшаяся незасеянной (рис. 5).

Установлено, что 79% интервалов между последовательными маршрутами были меньше 6,15 м (идеальной ширины), а 21% превысил ее.

Значения площади незасеянных участков (RM) и имеющих повторный высев (RP) и коэффициент рабочих ходов (ϕ_{PO}) приведены в таблице 2. В идеальных ситуациях RP и MP должны быть как можно ближе к нулю. Средневзвешенные значения RP и MP составили 16,05 и 2,38% соответственно,

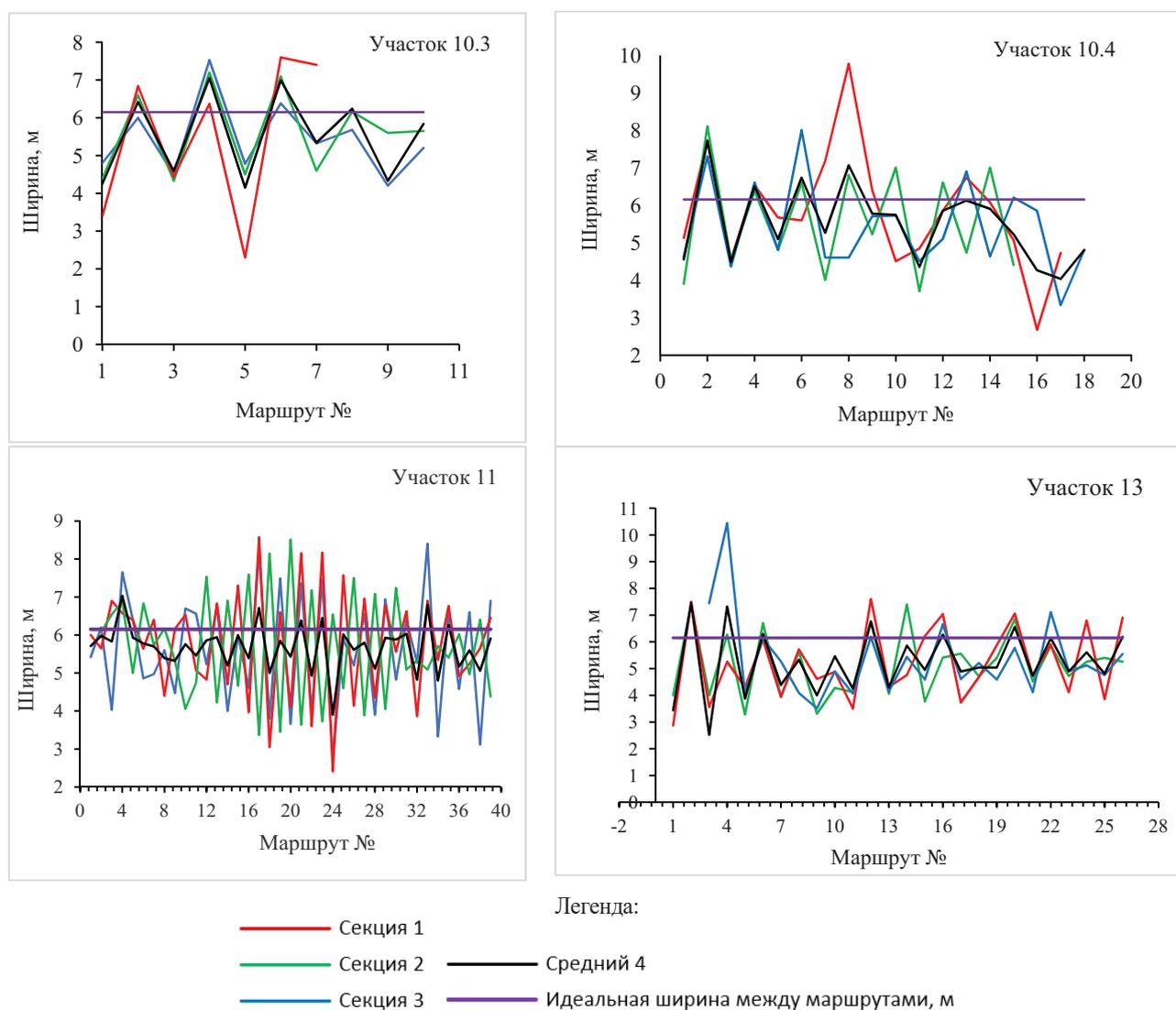


Рис. 5. Фактическое расстояние между маршрутами

Fig. 5. Actual distance between routes

что указывает на процент повторно засеянной и незасеянной площади. Тот же процент семян и энергии, использованной МТА, был убыточно растрочен. Кроме того, 16,05% от общей площади участков продемонстрировали удвоенную плотность растений, что приведет к снижению урожайности и чрезмерному истощению питательных веществ в почве. Около 2,38% пахотных земель участков остались незасеянными несмотря на ограниченное количество пахотных земель в центральной зоне Эритреи.

Из общей площади, обработанной во время эксперимента (107 га), около 17 га повторно засеяны и около 3 га остались незасеянными. При средней урожайности пшеницы в стране¹⁴ 1,1 т/га с 3 га незасеянной площади можно получить 3300 кг, что может удовлетворить потребность в зерновых более 34 чел. (при годовой потребности в зерновых 96 кг/чел.¹⁵). При точном высеве 107 га будут обработаны за 6,7 дня вместо 8.

Самый низкий уровень коэффициента рабочих ходов МТА (52,3%) наблюдали на неровном и очень

маленьком участке 10.4, на котором длины рабочих проходов МТА короткие и, соответственно, выше доля холостого хода. Это означает, что менее 60% было потрачено на продуктивные ходы. В целом на участках 10.4 и 10.3 МТА продемонстрировал умеренный уровень производительности с соответствующими значениями 52,3 и 62%. Однако холостой ход по-прежнему значителен по причине сложной формы полей и относительно короткой длины хода. Значение находится в пределах, указанных в стандарте ASAE D497.7 (2011)¹⁶. Эксплуатационные характеристики выше на участках 11 (73,2%) и 13 (74,1%) с большей длиной гона, где у МТА были более длинные рабочие ходы (доля рабочих ходов выше холостых). Средневзвешенное значение коэффициента рабочих ходов МТА (66,9%) соответствует стандарту ASAE D497.7 (2011)¹⁷, но есть возможность его повышения.

Точность и согласованность МТА оценивали по статистическим показателям: среднему значению, стандартному отклонению и коэффициенту

Площадь незасеянных и повторно засеянных участков и коэффициент рабочих ходов МТА

Таблица 2

Unsovn and resown area and the ratio of machine runs

Table 2

Параметр <i>Parameter</i>	Участок / <i>Plot</i>				Среднее значение, % <i>Average value, %</i>
	10.3	10.4	11	13	
Повторно засеянная площадь, (РР), % / <i>Resown area, (RP), %</i>	14,64	15,09	10,52	21,15	16,05
Незасеянная площадь (МР), % / <i>Unseeded area (MP), %</i>	2,34	3,75	1,27	2,51	2,38
Средняя длина гона, м / <i>Average chase length, m</i>	156,6	197,6	184,9	344,6	220,7
Коэффициент рабочих ходов (φ_{PO}), % / <i>Run ratio (φ_{PO}), %</i>	62,00	52,30	73,20	74,10	66,90

Таблица 3

Сводные статистические данные о точности посева на всех участках

Summary statistics on sowing precision at all plots

Table 3

Метрическая <i>Metric</i>	Участок / <i>Plot</i>			
	10.3	10.4	11	13
Количество измерений / <i>Number of measurements</i>	10	18	39	26
Средняя ширина захвата, см / <i>Average working width, cm</i>	550,0	551,90	568,10	514,70
Стандартное отклонение, см / <i>Standard deviation, cm</i>	114,60	104,0	60,20	124,10
Стандартная ошибка среднего значения / <i>Standard error of the mean value</i>	36,2	24,5	9,6	24,3
Коэффициент вариации, % / <i>Coefficient of variation, %</i>	20,80	18,90	10,60	24,10

¹⁴ Eritrea: ongoing research produces six high yield wheat varieties. ICARDA. [Electronic resource]. URL: <https://www.icarda.org/media/news/eritrea-ongoing-research-produces-six-high-yield-wheat-varieties> (accessed: 15.12.2023).

¹⁵ Отчет национального министерства сельского хозяйства за 2016 год. Planning and Statistics Division. Ministry of Agriculture Annual Report 2015. Asmara, 2016.

¹⁶ James Condra C. Influence of Planter Width, Planting Speed, and Perimeter-to-area Influence of Planter Width, Planting Speed, and Perimeter-to-area ratio on Field Efficiency for Row Crop Planters ratio on Field Efficiency for Row Crop Planters. 2017.

¹⁷ Там же.

вариации (табл. 3). Наилучшие результаты по посевному агрегату были получены на участке 11 (наименьшая стандартная ошибка среднего значения – 9,6, стандартное отклонение – 60,2 см, наименьший коэффициент вариации – 10,6%). Наибольшая вариация движения МТА была на участке 13 (стандартная ошибка среднего значения – 24,3 см, стандартное отклонение – 124,1 см, наибольший коэффициент вариации – 24,1%).

Статистический анализ показал высокий уровень превосходства сеялок с GPS-наведением в сравнении с обычным посевным агрегатом. Средняя ошибка GPS-наведения составляет 2,2 см, что отвечает агротехническим требованиям. Общая тестовая статистика $t_p = 7,02$ существенно больше критического значения $t_{кр} = 1,98$ для доверительной вероятности

0,05 и объема выборки $n = 100$, что указывает на значительную разницу.

Точность управления во многом зависит от скорости агрегата. По причине неправильной формы участков и чрезвычайно изменчивой топографии рабочая скорость МТА сильно варьировалась (2...20 км/ч) со средним и стандартным отклонением 10,66 и 4,84 км/ч соответственно (рис. 6).

При работе без навигационной системы для обеспечения допустимого диапазона варьирования рабочей ширины захвата $6,15 \pm 7$ см рекомендуемый диапазон рабочих скоростей составляет 10...12 км/ч. При использовании систем автоматизированного вождения рабочая скорость может быть увеличена до рекомендуемых изготовителем максимальных значений – до 15 км/ч.

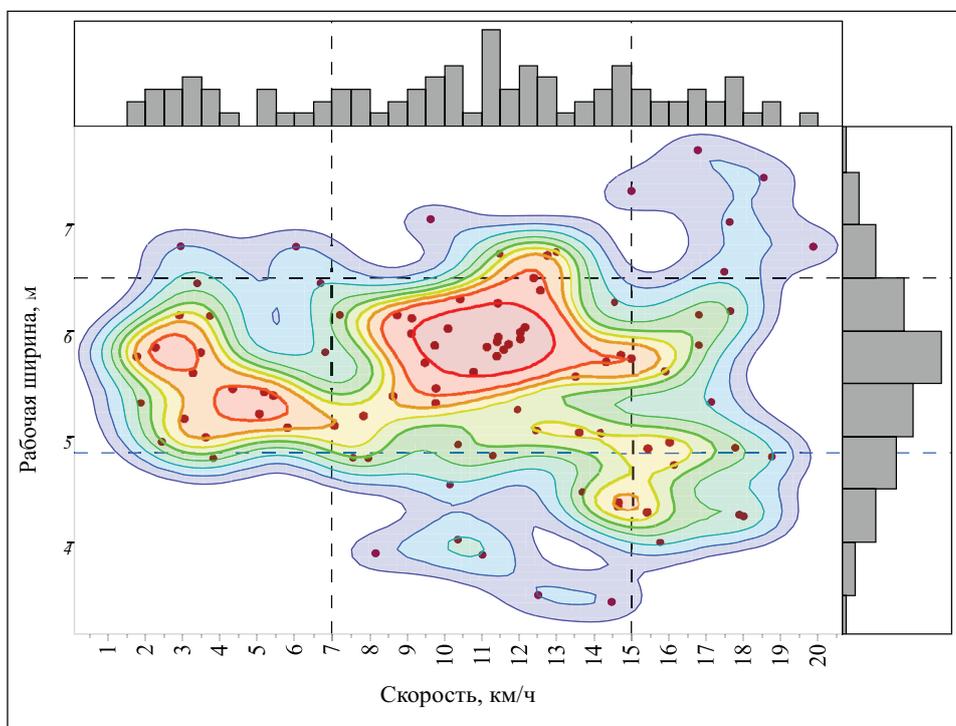


Рис. 6. Плотность контуров рабочей скорости в зависимости от рабочей ширины

Fig. 6. Density of working speed contours as a function of working width

Выводы

1. При посеве пшеницы в Эритрее пневматической сеялкой Nardi Dora без внедрения современных технологий навигации при вождении агрегата среднее отклонение от требуемого уровня равно 71 см, в результате чего площадь повторно засеянных участков составила около 17 га, площадей незасеянных пахотных земель – около 3 га.

2. Результаты статистического анализа показали высокий уровень превосходства сеялок с GPS-наведением в сравнении с обычным посевным агрегатом. Средняя ошибка GPS-наведения

составляет 2,2 см, что отвечает агротехническим требованиям. Общая тестовая статистика $t_p = 7,02$. Это существенно больше критического значения при доверительной вероятности 0,05 и объеме выборки $n = 100$, $t_{кр} = 1,98$, что указывает на значительную разницу.

3. При работе без навигационной системы для обеспечения допустимой точности вождения (варьирования рабочей ширины захвата $6,15 \pm 7$ см) рекомендуемый диапазон рабочих скоростей составляет 10...12 км/ч. При использовании систем автоматизированного вождения рабочая скорость может составлять 15 км/ч.

4. Коэффициент рабочих ходов МТА значительно варьировался на участках (52,3...74,1%): наименьшее значение наблюдали на участке 10.4, (длина гона – 197,6 м), наибольшее – на участке 13 (длина гона – 344,6 м). Среднее значение коэффициента рабочих ходов МТА (66,9%) при средней длине гона составляет 220,7 м.

5. Для повышения точности посевных работ и эффективного расхода ресурсов, повышения производительности машин и урожая необходимо внедрение передовых автоматизированных технологий.

Список источников / References

1. Shinnars K.J. Engineering principles of silage harvesting equipment. *Silage Science and Technology*. 2003;42:361-403.
2. Sharaby N., Doroshenko A., Butovchenko A., Legkonogih A. A comparative analysis of precision seed planters. *E3S Web of Conferences*. 2019;135:01080. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913501080>
3. Laryushin N.P., Shukov A.V., Kiryukhina T.A., Yashin A.V. Innovative seed planter implements for resource-saving sowing technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;953:012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/953/1/012012>
4. Srivastava A. et al. Engineering principles of agricultural machines. Second edition. Peg McCann. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006. 559 p.
5. Yuzenko Y.A., Tarkivsky V.E., Ivanov A.B. et al. Method for assessing the performance of agricultural machinery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;1045:012086. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1045/1/012086>
6. Li Y., Zhao B., Zhang W. et al. Evaluation of agricultural machinery operational benefits based on semi-supervised learning. *Agriculture (Switzerland)*. 2022;12(12):2075. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122075>

Информация об авторах

- ¹Медхн Тесфит Асрат, аспирант; noahtesas@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0009-0002-4371-13233>; SPIN-код: 9344-9472, AuthorID: 1264463
- ²Левшин Александр Григорьевич, д-р техн. наук, профессор; alevshin@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8010-4448>; SPIN-код: 1428-5710, AuthorID: 366502
- ³Теклай Симон Гебрехивет, магистрант; gtsimon1994@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-3336-0523>
- ^{1,2}Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49
- ³Колледж сельского хозяйства, потребительских и экологических наук, Университет штата Нью-Мексико; Лас-Крусес, NM 88003-8001, США

Вклад авторов

Т.А. Медхн – проведение исследований, выбор методики исследований, обработка результатов, статистический анализ, визуализация, написание статьи и внесение изменений;
А.Г. Левшин – руководство проведением исследований, верификация данных, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
С.Г. Теклай – оказание помощи в проведении исследований и обработке результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 21.10.2024, после рецензирования и доработки 21.02.2025; принята к публикации 24.02.2025

Author Information

- Tesfit A. Medhn¹, postgraduate student; noahtesas@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0009-0002-4371-13233>
- Aleksandr G. Levshin², DSc (Eng), Professor; alevshin@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8010-4448>
- Simon G. Teklay³, MSc student, gtsimon1994@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-3336-0523>
- ^{1,2}Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russia
- ³College of Agriculture, Consumer and Environmental Sciences, New Mexico State University; Las Cruces, NM 88003-8001, USA

Author Contribution

T.A. Medhn – investigation, research methodology, data curation, statistical analysis, visualization, writing – original draft, review and editing;
A.G. Levshin – supervision, data verification, writing – manuscript review and editing;
S.G. Teklay – investigation, data curation

Conflict of interests

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

Received 21.10.2024; Revised 21.02.2025; Accepted 24.02.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.31

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-30-37>

Переход к технологическим процессам и техническим системам обработки почвы, интегрированным в природный ресурсооборот

В.Ф. Федоренко

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия

f@maro.pro; <https://orcid.org/0000-0001-6398-4463>

Аннотация. Неудовлетворительное состояние большинства почвенных ресурсов страны обусловлено применением агротехнических приемов и технических средств механического воздействия на почвенные горизонты. При энергозатратной отвальной вспашке плугом с оборотом пласта происходит вертикальное перемешивание разнородных слоев почвы и воздействие фотохимической лучистой энергии солнца. В результате погибают аэробные и анаэробные бактерии, микроорганизмы и мезофауна, приспособленные к жизни в почве на определенной глубине, нарушаются естественные природные процессы формирования и накопления гумуса и плодородия почв, переуплотняются и разрушаются почвенные горизонты. При такой технологии непроизводительные потери органического углерода достигают 50%. С целью разработки технологических процессов и технических систем обработки почвы, обеспечивающих интегрированный переход в природный ресурсооборот сельскохозяйственных угодий, автором проведен анализ тенденций развития приемов обработки почвы, закономерностей физиологии, жизнедеятельности растений и почвенных биоценозов. В результате исследований установлено, что внутрпочвенная обработка импульсами сжатого воздуха посредством погружения в почву пневмогидробуров обеспечивает оптимальное рыхление, аэрацию и последующую рациональную подачу растворов агрохимикатов в корнеобитаемые слои. При этом прекращаются процессы деградации и эрозии сельскохозяйственных земель, увеличивается содержание гумуса в корнеобитаемых слоях почвы. Разработанный способ (Патент № 2830861 РФ) и инновационная конструкция пневмогидробура создают условие в режиме онлайн за 10-15 с сканировать почвенный горизонт и осуществлять экспресс-анализ характеристик почвы, на его основе подавать в почву необходимую дозу соответствующих реагентов. Переход к инновационному принципу обработки почвы позволяет значительно сократить совокупные удельные энергозатраты.

Ключевые слова: земледелие, почвенные горизонты, биоценоз, гумус, природный ресурсооборот, обработка почвы импульсами сжатого воздуха, пневмогидробур

Для цитирования: Федоренко В.Ф. Переход к технологическим процессам и техническим системам обработки почвы, интегрированным в природный ресурсооборот // Агроинженерия. 2025. Т. 27. № 2. С. 30-37. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-30-37>

ORIGINAL ARTICLE

Transition to technological processes and technical systems of soil tillage integrated into natural resource management

V.F. Fedorenko

Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia

f@maro.pro; <https://orcid.org/0000-0001-6398-4463>

Abstract. The unsatisfactory condition of the majority of soil resources of the country is due to the use of agrotechnical methods and technical means of mechanical impact on soil horizons. Energy-consuming moldboard plowing with a soil layer turnover results in a vertical mixing of heterogeneous soil layers and their exposure to photochemical radiant energy of the sun. As a result, aerobic and anaerobic bacteria, microorganisms and mesofauna adapted to live in the soil at a certain depth die; natural processes of humus formation and accumulation are disturbed, soil fertility decreases, soil horizons are overconsolidated and destroyed. This technology results in unproductive losses of organic carbon up to 50%. In order to develop technological processes and technical systems of soil tillage, providing an integrated transition to the natural resource management of agricultural lands, the author analyzed trends in the development of soil tillage techniques, regularities of plant physiology, plant life and soil biocenoses. The studies have established that in-soil treatment with pulses

of compressed air by means of pneumatic hydrodrills immersed in the soil provides optimal loosening, aeration and subsequent rational supply of agrochemical solutions into root-inhabited layers. At the same time, this operation stops the processes of degradation and erosion of agricultural lands and increases the humus content in root-inhabited soil layers. The developed method (Patent No. 2830861 of the Russian Federation) and the innovative design of a pneumatic hydrodrill provide conditions for the online scanning of a soil horizon for 10-15 s and express analysis of soil characteristics. Based on the results obtained, we can supply the necessary dose of appropriate reagents to the soil. Transition to the innovative principle of soil treatment reduces significantly the total specific energy inputs.

Keywords: farming, soil horizons, biocenosis, humus, natural resource management, soil treatment with pulses of compressed air, pneumatic hydrodrill

For citation: Fedorenko V.F. Transition to technological processes and technical systems of soil tillage integrated into natural resource management. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(2):30-37 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-30-37>

Введение

Технологические процессы и технические системы обработки почвы совершенствовались в зависимости от потребностей людей, меняющихся почвенно-климатических условий, особенностей вегетации возделываемых культур¹ (рис. 1). Однако эти условия и особенности недостаточно хорошо были изучены и проверены, не ставились задачи гармоничного взаимодействия между техническими системами обработки почвы, возделываемыми культурами, особенно процессами жизнедеятельности почвенных бактерий, микроорганизмов, мезофауны, симбиоза их с растениями, не обосновывались пути оптимального их взаимодействия².

В земледелии продолжает превалировать утверждение В.П. Горячкина³: «Главнейшая задача современной агротехники – крошение пласта различной толщины в различных условиях посредством клиньев всевозможной формы».

ГОСТ 16265-83 рекомендует более 60 видов воздействий на почву. Большинство из них оказывает значительное негативное воздействие на плодородие почв, формируя условия развития процессов деградации, эрозии и дефляции сельскохозяйственных земель⁴. Отвальная вспашка плугом – чрезвычайно энергозатратный процесс, требующий 10...15 МДж

энергии на 1 га, базирующийся на физических принципах резания, крошения и обороте пластов земли, состоящих из разнородных слоев почвы, каждый из которых населен огромным количеством различных микроорганизмов, грибов, бактерий и пр. Агроценозы в своей жизнедеятельности обеспечивают формирование и накопление в почве гумуса⁵. При обороте пласта аэробные агроценозы, адаптированные к жизни в верхних горизонтах почвы, оказываются в глубине и в большинстве своем погибают, а анаэробные из нижних горизонтов, попадая в верхние, также погибают [1, 2].

Периодическое интенсивное рыхление почвенных горизонтов нарушает равновесие экологической системы «Почва – растение – атмосфера», активизирует процессы разрушения структуры гумуса, при формировании урожая до 50% увеличиваются непродуцируемые потери плодородия и органического углерода⁶. Негативно сказывается фотохимическое воздействие световой энергии солнца на агрохимические показатели почвы⁷ [1].

Вследствие роста площадей земель сельскохозяйственного назначения, подверженных эрозии, дефляции и опустыниванию⁸, в настоящее время в земледелии особенно остро стоит проблема поиска и разработки новых, эффективных технологических принципов и технических систем природопользования. Современные принципы трансформации приемов обработки почвы обусловлены развитием нетрадицион-

¹ Агропромышленный комплекс России в 2022 году: Сборник. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2024. 562 с.; Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2022 году. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2023. 372 с.

² Бобровский М.В., Гин А. Земледелие в Европе. Хронология с картинками. ТРИЗ-профи: Эффективные решения в сельском хозяйстве. М.: Кушнир, 2006. 220 с.; Агропромышленный комплекс России в 2022 году: Сборник. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2024. 562 с.

³ Ерохин М.Н., Зайцев Н.Л., Алдошин Н.В. Василий Прохорович Горячкин: страницы жизни. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. 280 с.

⁴ Андрианов Б.В. Земледелие наших предков. М.: Наука, 1978. 167 с.

⁵ Менделеев Д.И. С думою о благе российском: Избранные экономические произведения. Новосибирск: Наука, 1991. 231 с.

⁶ Технологии XXI века в агропромышленном комплексе России: Каталог. 4-е изд., доп. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2023. 536 с.

⁷ Богатырев Л.Г. Основные концепции, законы и принципы современного почвоведения: Монография. М.: МАКСПресс, 2015. 196 с.

⁸ Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2022 году. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2023. 372 с.



Рис. 1. Этапы развития технологических процессов и технических систем обработки почвы

Fig. 1. Stages of developing the technological processes and technical systems of soil tillage

ных природоохранных, природоподобных, «зеленых» технологий земледелия, переходом от стратегии обработки почвы, базирующейся на принципе максимума производства энтропии (Г. Циглер)⁹, к стратегии ее минимального производства (И. Пригожин)¹⁰ с рациональным использованием доступных природных ресурсов¹¹. Такое земледелие основано на частичном или полном уходе от отвальной вспашки и вертикальном перемещении пахотных горизонтов, сохранении корнеобитаемых слоев почвы и почвенной влаги, уменьшении эрозии¹² [2].

Цель исследований: разработка технологического процесса и технической системы обработки корнеобитаемых слоев почвы импульсами сжатого воздуха в соответствии с величиной пенетрации с последующим внесением растворов агрохимикатов для оптимизации условий симбиоза растений и почвенных микроорганизмов; обеспечение интегрированного перехода сельскохозяйственных угодий в природный ресурсооборот.

⁹ Циглер Г. Экстремальные принципы термодинамики необратимых процессов и механика сплошной среды. М.: Мир, 1966. 136 с.

¹⁰ Глендорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации. М.: Мир, 1973. 280 с.

¹¹ Гумилев Л. Этногенез и биосфера Земли. М.: Танаис-Дик, 1994. 640 с.

¹² Овсинский И.Е. Новая система земледелия. Перепечатка публикации 1909 г. М.: АГРО-СИБИРЬ, 2004. 47 с.

Материалы и методы

Патентный поиск, а также анализ проведенных лабораторных и полевых исследований позволили выявить недостатки известных приемов обработки почвы с применением пневмогидробуров: невозможность регулировки в режиме реального времени глубины их погружения в почву, установки частоты и давления импульсов сжатого воздуха, а также изменения давления подачи раствора в зависимости от величины пенетрации почвы. Без учета состояния и типа почвы не обеспечиваются качество и энергоэффективность обработки, не исключается возможность избыточной подачи и неэффективного распределения воды и растворов удобрений непосредственно к корневой системе растений.

Разработка эффективного пневмогидробура осуществлялась с учетом ГОСТ 34276-2017¹³.

Результаты и их обсуждение

Базовые представления о процессах формирования почв, компонентного их состава (рис. 2) являются основой адекватного обоснования физических принципов и оптимальных агротехнических требований, на которые необходимо ориентироваться при разработке процессов и технических систем

¹³ ГОСТ 34276-2017. Грунты. Методы лабораторного определения удельного сопротивления пенетрации. М.: Стандартинформ, 2019. 11 с.

обработки почвы, интегрированных в природный ресурсооборот.

В природной экосистеме корни предшествующих растений и представители мезофауны (почвенные животные и насекомые, дождевые черви и др.) образуют микропустоты и полости, способствующие формированию и сохранению компонентного состава естественной структуры, плотности, пористости почв, развитию процессов инфильтрации и способности аккумулировать и удерживать внутрипочвенную воду. При этом создаются условия образования гумусового компонента, значительно снижаются и даже предотвращаются процессы развития эрозии и дефляции сельскохозяйственных угодий.

Многочисленные исследования отечественных и зарубежных ученых свидетельствуют о том, что сохранение корнеобитаемых слоев почвы и мульчирование ее поверхности соломой в объеме 4...6 т на 1 га снижает эрозию в 8...10 раз, смыв почвы в период таяния снега – более чем в 2 раза, а ливневых стоков – в 1,5 раза. Формирование мульчирующего слоя из пожнивных остатков в течение нескольких лет способствует восстановлению биоценоза почвы и воспроизводству ее плодородия естественным путем за счет кругооборота питательных элементов и активизации жизнедеятельности почвенных биоценозов. Мульчирование приводит к увеличению содержания почвенного углерода, снижению применения минеральных удобрений и предотвращению почвенной эрозии [3-5].

На основании анализа информации, моделирования природных процессов жизнедеятельности

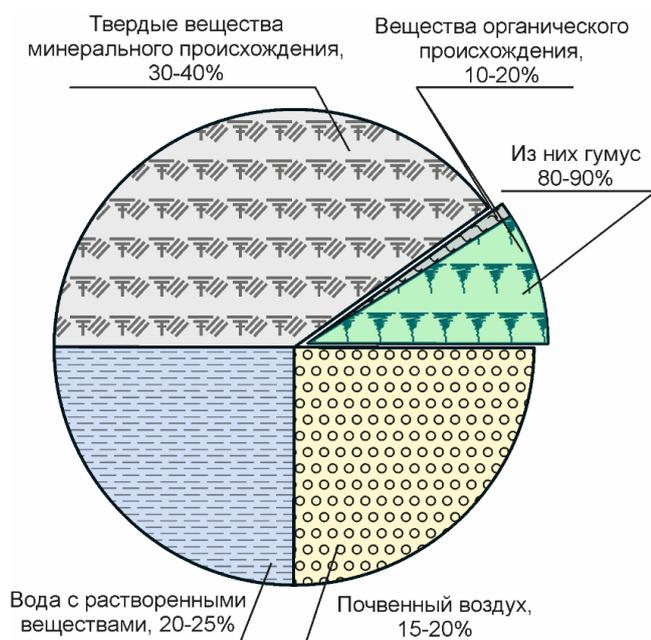


Рис. 2. Компонентный состав почв

Fig. 2. Component composition of soils

почвенной мезофауны и с учетом результатов экспериментальных исследований разработан процесс внутрипочвенной раздельной и последовательной подачи импульсами сжатого воздуха, затем – воды или аэрозоля [6]. Разработан и изготовлен инновационный пневмогидробур (рис. 3) [7].

Пневмогидробур работает следующим образом. Ствол 1 с перфорированным наконечником 2 вручную погружали вертикально в почву, при этом подвижный упор 11 с измерительным стержнем 14 поднимался вверх и перемещался вдоль линейки 17 с герконами 18. Под действием магнитного поля

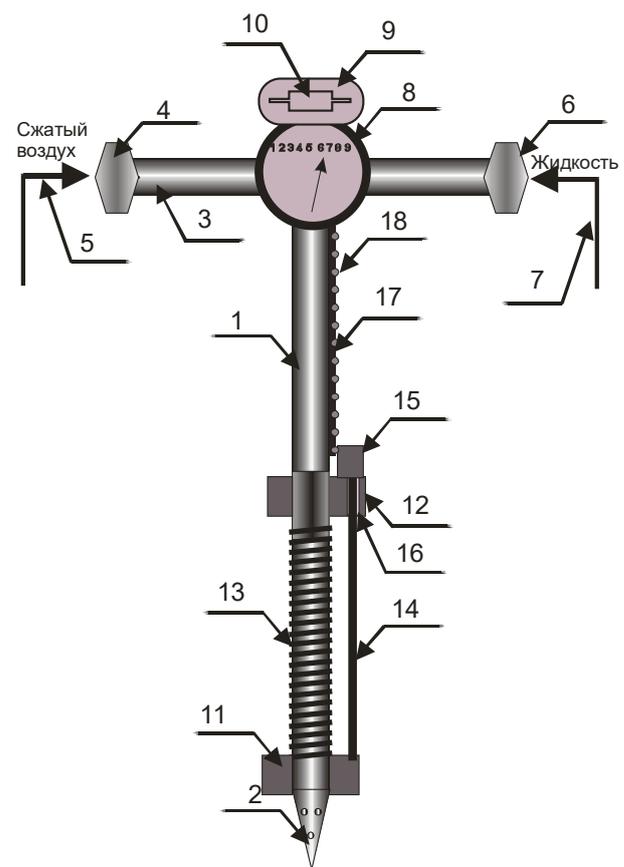


Рис. 3. Пневмогидробур:

- 1 – ствол; 2 – перфорированный наконечник;
- 3 – полая рукоять; 4 – воздушный электропневмоклапан;
- 5 – шланг сжатого воздуха; 6 – электропневмоклапан;
- 7 – шланг для жидкости; 8 – блок управления;
- 9 – пенетрометр; 10 – тензометрический датчик силы;
- 11 – подвижный упор; 12 – неподвижный упор;
- 13 – возвратная пружина; 14 – измерительный стержень;
- 15 – магнит; 16 – отверстие неподвижного упора;
- 17 – линейка; 18 – герконы

Fig. 3. Pneumatic hydrodrill:

- 1 – barrel; 2 – perforated tip; 3 – hollow handle;
- 4 – air electropneumatic valve; 5 – compressed air hose;
- 6 – electropneumatic valve; 7 – liquid hose; 8 – control unit;
- 9 – penetrometer; 10 – strain gauge force sensor;
- 11 – movable stop; 12 – fixed stop; 13 – return spring;
- 14 – measuring rod; 15 – magnet; 16 – fixed stop hole;
- 17 – ruler; 18 – reed switches

магнита 15 срабатывал геркон 18, находящийся в сфере действия магнита. Контакты геркона 18 замыкались, и электрический сигнал поступал в блок управления 8, который при достижении заданной глубины перфорированным наконечником 2 подал сигнал, и погружение прекращали. Одновременно перфорированный наконечник 2 при погружении в почву преодолевал силы пенетрации корнеобитаемых слоев почвы, деформировав упругий элемент тензометрического датчика силы 10, создающего электрический сигнал, величиной, прямо пропорциональной величине силы пенетрации почвы. В зависимости от величины электрического сигнала блок управления 8 устанавливал посредством воздушного электропневмоклапана 4 частоту и величину давления импульсов сжатого воздуха, которые по шлангу 5, стволу 1 и перфорированному наконечнику 2 поступали в почву. Затем блок управления 8 посредством электропневмоклапана жидкости 6 устанавливал величину давления растворов и по шлангу 7, стволу 1, и через перфорированный наконечник 2 осуществлялась подача растворов агрохимикатов непосредственно к корневой системе растений. По окончании обработки пневмогидробур извлекали из почвы, возвратная пружина 13 опускала подвижный упор 11 и измерительный стержень 14 в исходное положение.

Эффективность подачи импульсов сжатого воздуха и качество внутрпочвенного рыхления, формирование в почве системы каналов и пустот, обеспечивающих благоприятную для корневой системы растений водно-воздушную среду для последующей подачи растворов агрохимикатов, создающих рациональные условия питания и жизнедеятельности

агоценозов, грибов и пр., обеспечивают наконечники пневмогидробуров [3, 7].

Особенно значимо влияние на эффективность технологических процессов конструктивных параметров отверстий в наконечниках: диаметра, формы, расположения и пр. Поэтому в зависимости от видов почв, необходимого расхода и давления, целей применения пневмогидробуров используются различные конструкции наконечников (рис. 4), которые позволяют осуществить отдельную или одновременную подачу воды, воздуха, растворов агрохимикатов в требуемых пропорциях. Выбор этих параметров основан на результатах исследований (рис. 5) [9] и обусловлен требованиями ГОСТ 34276-2017¹⁴.

Применение разработанного инновационного пневмогидробура (рис. 3) является эффективным в личных и фермерских хозяйствах с небольшими объемами обработки. Более целесообразное и производительное решение размещения комплекта оборудования – в кузове мини-автомобиля.

Более рациональное и эффективное решение – роботизированный гидропневматический модуль (рис. 6), осуществляющий внутрпочвенную подкормку многолетних культур по электронной карте задания с автоматической регулировкой режимов внесения питательных веществ на глубину корнеобитаемого слоя до 60 см без непосредственного участия человека, снижающий воздействие на почву и корни растений, значительно сокращающий время обработки [8]. Элементы и технические характеристики разработанного модуля представлены в таблице.

Рациональный переход к технологическим процессам и техническим системам обработки почвы, интегрированным в природный ресурсооборот,

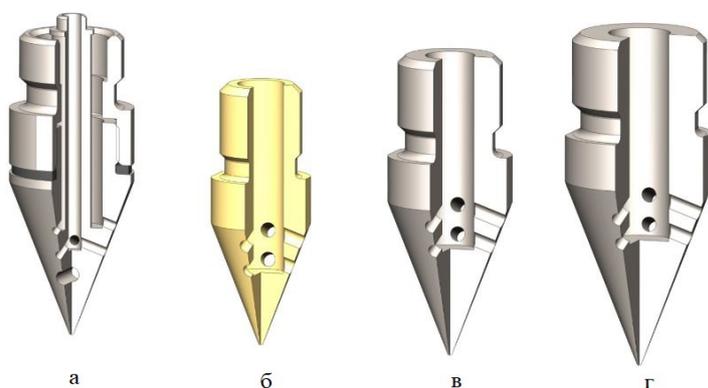


Рис. 4. Конструкции наконечников пневмогидробуров:

а – комбинированный для различных видов почв; б – для глинистых, суглинистых;
в – для песчаных, известковых; г – для болотистых

Fig. 4. Designs of pneumatic hydrodrill tips:

a – combined for different types of soils; b – for clay, loamy soils; c – for sandy, calcareous soils; d – for swampy soils

¹⁴ГОСТ 34276-2017. Грунты. Методы лабораторного определения удельного сопротивления пенетрации. М.: Стандартинформ, 2019. 11 с.

обеспечивает разработанное инновационное техническое решение [10], которое значительно эффективнее ранее созданных изобретений [11, 12]. В новом способе обработка, рыхление, аэрация осуществляются внутрпочвенными импульсами сжатого воздуха, посредством пневмогидробуров, вертикально погружаемых в почву на глубину, соответствующую толщине корнеобитаемого слоя. Каждый

пневмоцилиндр оснащен пенетрометром для определения силы пенетрации почвы, на основе которой автоматически устанавливаются частота и величина давления импульсов сжатого воздуха. После рыхления и аэрации в образованные почвенные поры, полости и микропустоты под давлением, устанавливаемым в зависимости от величины электрического сигнала пенетрометра, подаются растворы гидрогеля

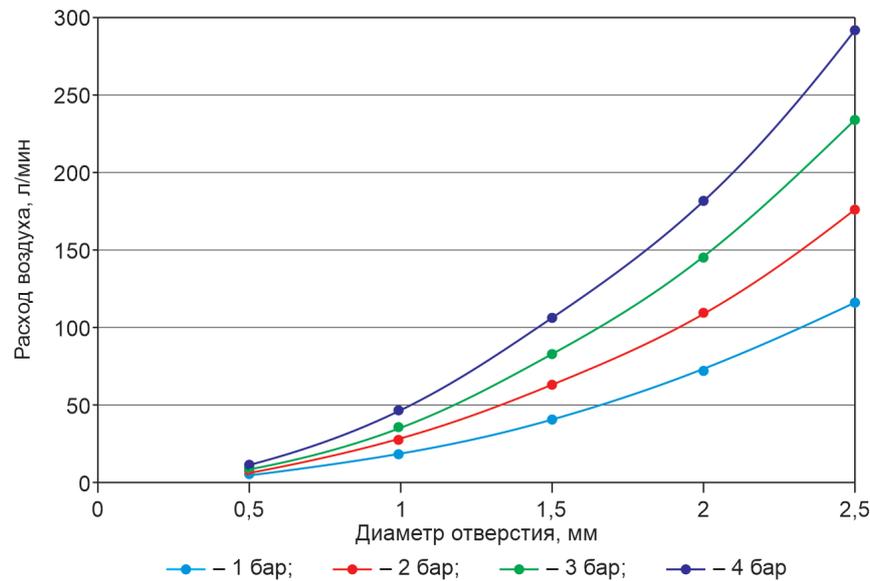


Рис. 5. Расход воздуха в зависимости от диаметра отверстий в наконечниках пневмогидробура и давления воздуха в системе¹⁵

Fig. 5. Air flow rate depending on the diameter of holes in pneumatic hydrodrill tips and air pressure in the system

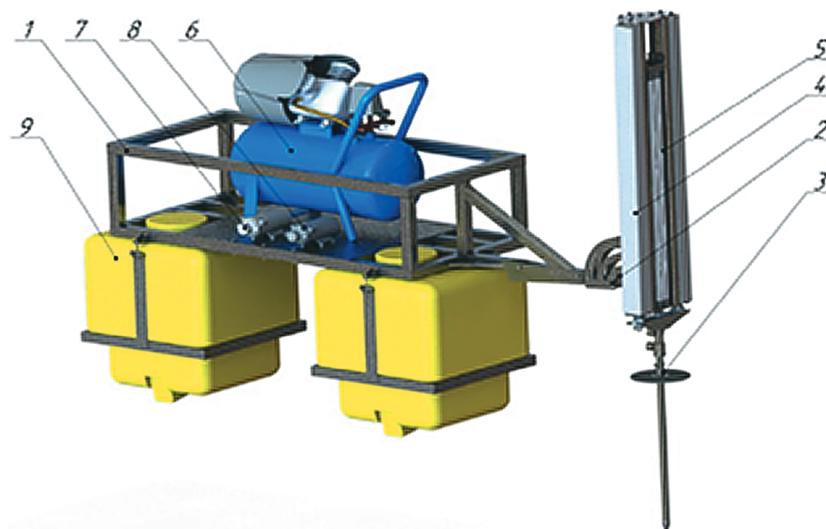


Рис. 6. Общий вид роботизированного гидропневматического модуля:

1 – рама; 2 – стрела; 3 – ствол пневмогидробура; 4 – пневмоцилиндр; 5 – направляющая пневмоцилиндра; 6 – гидронасос; 7 – компрессор с ресивером; 8 – рукава для сжатого воздуха и жидкостей; 9 – баки для жидкостей

Fig. 6. General view of the robotized hydropneumatic module:

1 – frame; 2 – boom; 3 – pneumatic hydrodrill barrel; 4 – pneumatic cylinder; 5 – pneumatic cylinder guide; 6 – hydraulic pump; 7 – compressor with a receiver; 8 – hoses for compressed air and liquids; 9 – tanks for liquids

¹⁵Мишууров Н.П. и др. Инновационные технологии и технические средства для подпочвенного полива многолетних насаждений: Отчет о НИР. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2022. 156 с.

Таблица

Основные технические параметры

Table

Main technical parameters

Показатели / Indicators	Значение / Value
Габаритные размеры (Д×Ш×В), м / Overall dimensions (L×W×H), m	2,89×2,55×2,23
Глубина погружения, мм / Immersion depth, mm	до 600
Давление рабочей жидкости при погружении, бар / Pressure of working liquid when deepening the tools, bar	до 7
Давление при внесении минеральных удобрений и раствора гидрогеля, бар Pressure when introducing mineral fertilizers and hydrogel solution, bar	4...5
Давление воздуха в системе, бар / Air pressure in the system, bar	до 10
Угол введения гидробура почву, град. / Approach angle of the pneumatic hydrodrill into the soil, deg.	От 0 до 30° с шагом 5°
Объем бака для рабочих жидкостей, л / Tank volume for working liquids, l	120
Объем бака для воды при погружении лунок, л / Volume of a water tank for immersing the holes, liters	120
Способ заглабления пневмогидробура / Method of deepening the pneumatic hydrodrill by means of a pneumatic cylinder	Посредством пневмоцилиндра

или удобрений непосредственно к корневой системе растений.

Посредством установки в пневмогидробуры соответствующих электронных датчиков можно осуществлять экспресс-анализ основных физико-механических показателей (твердость, пористость, влажность, температура и пр.) и агрохимического состава (содержание азота, фосфора, калия и пр.). За время экспозиции пневмогидробуров в почве (порядка 10-15 с) в режиме онлайн на бортовой компьютер подается сигнал, который регулирует подачу через пневмогидробуры соответствующей дозы воды, раствора агрохимикатов, а также формирует электронную карту поля с приведенной к координатам оценкой почвы.

При обработке почвы импульсами сжатого воздуха корнеобитаемые слои почвы не подвергаются механическому воздействию и не разрушаются. Создается эффективный тип устойчивого земледелия, обеспечивающий гармоничное соотношение между антропогенной нагрузкой и природным потенциалом почвы, формирование полноценного продукционного и экологического земледелия.

Библиографический список

- Новоселов С.И. Влияние фотохимического воздействия света на подвижность гумусовых веществ и свойств почвы // Агрохимия. 2021. № 12. С. 37-41. <https://doi.org/10.31857/S0002188121120097>
- Пыхтин И.Г., Гостев А.В., Нитченко Л.Б. Теоретические основы систематизации обработки почвы в агротехнологиях нового поколения // Земледелие. 2015. № 5. С. 13-15. EDN: UGTHRF
- Черногаев В.Г., Свирина В.А. Сравнительный анализ эффективности применения различных способов обработки почвы в системе ресурсосберегающих технологий земледелия // Аграрная наука. 2020. № 11-12. С. 105-107. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-343-11-105-107>

Выводы

1. Внутрипочвенная обработка импульсами сжатого воздуха посредством вертикального погружения пневмогидробуров и последующей подачи в корнеобитаемые слои почвы различных агрохимикатов способствует формированию оптимальных условий обмена веществ и энергии, водно-воздушно-тепловых режимов, бездефицитного баланса биофильных элементов, основных почвообразовательных и продукционных процессов, симбиоза растений с почвенными биотой, микроорганизмами и мезофауной и снижению процессов деградации и эрозии сельскохозяйственных угодий, что в полной мере обеспечивает комплексные, оптимально эффективные, адаптивно-интегрированные условия естественно-природного ресурсооборота.

2. Разработанный способ (Патент № 2830861 РФ) позволяет в режиме онлайн посредством пневмогидробуров за 10-15 с сканировать почвенный горизонт и осуществлять экспресс-анализ характеристик почвы, на его основе подавать в почву необходимую дозу соответствующих реагентов.

References

- Novoselov S.I. Effect of photochemical exposure light on the mobility of humus substances and soil properties. *Agrochimia*. 2021;12:37-41. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0002188121120097>
- Pykhtin I.G., Gostev A.V., Nitchenko L.B. The theoretical fundamentals for the systematization of soil cultivations in agricultural technologies of a new generation. *Zemledelie*. 2015;5:13-15. (In Russ.)
- Chernogaev V.G., Svirina V.A. Comparative analysis of the efficiency of application of different methods of tillage in the system of resource-saving agriculture technologies. *Agrarian Science*. 2020;(11-12):105-107. (In Russ.) <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-343-11-105-107>

4. Артамонова В.С., Бортникова С.Б. Биогеохимическая характеристика корнеобитаемого слоя травянистых растений на рекультивированных участках техногенных отходов // Вестник Пермского университета. Серия «Биология». 2022. № 2. С. 155-163. <https://doi.org/10.17072/1994-9952-2022-2-155-163>
5. Денисов К.Е., Полетаев И.С., Гераскина А.А. Влияние различных схем питания на урожайность яровой твердой пшеницы при разных способах основной обработки почвы // Аграрный научный журнал. 2022. № 5. С. 10-12. <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i5pp10-12>
6. Ялалетдинов Д.А., Рахимов И.Р., Куликова А.П. и др. Моделирование процессов рыхления почвы сжатым воздухом // Челябинский физико-математический журнал. 2024. Т. 9, № 1. С. 160-168. EDN: LVCIVQ
7. Федоренко В.Ф., Киреев И.М., Марченко В.О. Исследование методов и технических средств для измерения глубины обработки почвы при испытаниях почвообрабатывающих машин // Техника и оборудование для села. 2019. № 5. С. 12-17. EDN: QXUZCE
8. Федоренко В.Ф., Харитонов М.П., Смирнов И.Г., Аристов Э.Г. Перспективы роботизации процессов внутривиточного полива и подкормки растений // Агроинженерия. 2024. № 26 (1). С. 11-17. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-11-17>
9. Мишуров Н.П., Федоренко В.Ф., Аристов Э.Г. и др. Результаты исследований подпочвенного орошения многолетних эфиромасличных культур с использованием гидрогеля // Техника и оборудование для села. 2022. № 11. С. 11-15. EDN: AFYPAD
10. Способ внутривиточных обработки, рыхления, аэрации, орошения, удобрения корнеобитаемых слоев почвы: Патент RU2830861 C1; A01B79/02, A01C21/00 / В.Ф. Федоренко, А.В. Федоренко, И.В. Федоренко; № 2024102931, заявл. 06.02.2024; опубл. 26.11.2024, Бюл. № 33. EDN: ICUTRG
11. Устройство для внутривиточных обработки, аэрации, орошения, удобрения корнеобитаемых слоев почвы и способ внутривиточных обработки, аэрации, орошения, удобрения корнеобитаемых слоев почвы таким устройством: Патент RU2807342 C1 / В.Ф. Федоренко, А.В. Федоренко, И.В. Федоренко; № 2023113383; заявл. 24.05.2023; опубл. 14.11.2023. EDN: QOTGVP
12. Устройство для обработки корнеобитаемых горизонтов почв и способ обработки корнеобитаемых горизонтов почв таким устройством: Патент RU2807736 C1, МПК A01B79/02 / В.Ф. Федоренко, А.В. Федоренко, И.В. Федоренко; № 2023110458; заявл. 24.04.2023; опубл. 21.11.2023. EDN: HTNOTE
4. Artamonova V.S., Bortnikova S.B. Biogeochemical characteristics of the root layer of herbaceous plants in recultivated areas of man-made. *Bulletin of Perm University. Biology*. 2022;2:155-163. (In Russ.) <https://doi.org/10.17072/1994-9952-2022-2-155-163>
5. Denisov K.E., Poletaev I.S., Geraskina A.A. The influence of different nutrition schemes on the yield of spring durum wheat with different methods of basic tillage. *The Agrarian Scientific Journal*. 2022;5:10-12. (In Russ.)
6. Yalaletdinov D.A., Rahimov I.R., Kulikova A.P. Simulation of soil loosening processes with compressed air. *CheLyabinsk Physical and Mathematical Journal*. 2024;9(1):160-168. (In Russ.)
7. Fedorenko V.F., Kireev I.M., Marchenko V.O. Research of methods and technical means for measuring the tillage depth when testing tillage machines. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2019;5:12-17. (In Russ.)
8. Fedorenko V.F., Kharitonov M.P., Smirnov I.G., Aristov E.G. Robotization prospects for subsurface irrigation and fertilization of plants. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(1):11-17. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-11-17>
9. Mishurov N.P., Fedorenko V.F., Aristov E.G. et al. Results of studies of subsoil irrigation of perennial essential oil crops using hydrogel. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022;11:11-15. (In Russ.)
10. Fedorenko V.F., Fedorenko A.V., Fedorenko I.V. Method of intrasoil treatment, tillage, aeration, irrigation, fertilization of root layers of soil: patent RU2830861 C1; A01B79/02, A01C21/00, 2024. (In Russ.)
11. Fedorenko V.F., Fedorenko A.V., Fedorenko I.V. Device for subsoil cultivation, aeration, irrigation, fertilization of root-inhabited soil layers and method for subsoil cultivation, aeration, irrigation, fertilization of root-inhabited soil layers using device: patent RU2807342 C1, 2023. (In Russ.)
12. Fedorenko V.F., Fedorenko A.V., Fedorenko I.V. Device for treating root-inhabited soil horizons and method for treating root-inhabited soil horizons with such device: patent RU2807736 C1, IPC A01B79/02, 2023. (In Russ.)

Информация об авторе

Федоренко Вячеслав Филиппович, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, главный научный сотрудник, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5; SPIN-код: 5363-1873, AuthorID: 672972; fedorenko@rosinformagrotech.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6398-4463>

Статья поступила 15.08.2024, после рецензирования и доработки 09.12.2024; принята к публикации 17.12.2024

Author Information

Vyacheslav F. Fedorenko, DSc (Eng), Professor, Full Member of the Russian Academy of Sciences; Chief Research Engineer, Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 1st Institutsky Proezd Str., 5, Moscow, 109428; Russia, fedorenko@rosinformagrotech.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6398-4463>

Received 15.08.2024; Revised 09.12.2024; Accepted 17.12.2024

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.363

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-38-46>**Автоматизация миникомбикормового завода***Е.А. Пшенов¹, А.А. Диденко², С.С. Блёскин³, В.А. Годорожа⁴*^{1,2,3,4}Новосибирский государственный аграрный университет – НГАУ; г. Новосибирск, Россия¹evgen_mex@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6371-456X>²didenkonsau@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8146-9147>³moonlait2510@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8671-6485>⁴godorozha2001@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-4426-3122>

Аннотация. Автоматизация миникомбикормового завода позволяет исключить человеческий фактор в процессе управления и контроля технологического процесса производства кормов. Исследования проведены с целью повышения эффективности работы миникомбикормового завода за счет автоматического контроля и управления процессом измельчения зерновых компонентов. Автоматизация систем управления технологическим процессом измельчения зерна возможна при условии механизации процесса регулирования подачи зернового материала в пневматическую молотковую дробилку. Авторами предложена модель системы дистанционного автоматического управления устройством загрузки (эжектором) пневматической молотковой дробилки с учетом заданной массы компонента согласно рецептуре комбикорма, силы потребляемого тока молотковой дробилкой и сравнения набора данных изображений задаваемых компонентов с видеопотоком поступающего сырья в дробилку. Для реализации предлагаемой модели разработан эжектор с дистанционным управлением заслонки окна подсоса воздуха посредством «боуден-троса». Проведена экспериментальная проверка его работоспособности, по результатам которой получена зависимость производительности эжектора от площади окна подсоса воздуха с достоверностью аппроксимации 0,9985. В результате доказано, что предлагаемое техническое решение способно осуществить автоматическое регулирование производительности пневматической молотковой дробилки. В дальнейшем планируется разработать сервопривод для плавного перемещения «боуден-троса» как в прямом, так и в обратном направлениях, а также мгновенного отключения подачи материала при достижении заданной массы компонента или возникновении аварийной ситуации.

Ключевые слова: комбикорм, мини завод, эжектор, пневматическая молотковая дробилка, автоматизация миникомбикормового завода, автоматизация систем управления технологическим процессом

Для цитирования: Пшенов Е.А., Диденко А.А., Блёскин С.С., Годорожа В.А. Автоматизация миникомбикормового завода // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 2. С. 38-46. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-38-46>

ORIGINAL ARTICLE

Prospects for the automation of a feed mini-plant*Е.А. Pshenov¹, А.А. Didenko², S.S. Bleskin³, V.A. Godorozha⁴*^{1,2,3,4}Novosibirsk State Agrarian University – NGAU; Novosibirsk, Russia¹evgen_mex@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6371-456X>²didenkonsau@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8146-9147>³moonlait2510@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8671-6485>⁴godorozha2001@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-4426-3122>

Abstract. Automation of a mini feed mill will eliminate the human factor in the management and control of the feed production process. The authors conducted research to improve the efficiency of the mini feed mill through automatic control and regulation of grain crushing. Automation of the control systems for grain crushing is feasible in case of mechanized regulation of grain material supply into a pneumatic hammer mill. The authors proposed a model for a remote automatic control system for the loading device (ejector) of a pneumatic hammer mill. The proposed design takes into account the specified mass of the component according to the feed formulation, the current consumed by the hammer mill, and the comparison of image datasets of the specified components

with the video stream of raw materials entering the mill. To implement the proposed model, they developed an ejector with remote control of the air suction window flap via a “Bowden cable”. Experimental testing of its functionality has shown a relationship between the ejector’s performance and the area of the air suction window with an approximation reliability of 0.9985. As a result, the research has proven that the proposed technical solution is capable of automatic regulation of the performance of a pneumatic hammer mill. There are further plans to develop a servo drive for smooth movement of the “Bowden cable” in both forward and reverse directions, as well as instant shutdown of material supply upon reaching the specified component mass or in case of emergency.

Keywords: compound feed, mini-plant, ejector, pneumatic hammer mill, automation of a small-scale feed mill, automation of process control systems

For citation: Pshenov E.A., Didenko A.A., Bleskin S.S., Godorozha V.A. Prospects for the automation of a feed mini-plant. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(2):38-46 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-38-46>

Введение

Производство комбикормов из собственного зернового сырья способствует устойчивому развитию животноводства.

Преимуществами миникомбикормовых заводов являются приготовление адресных комбикормов для соответствующей половозрастной группы животных и возможность быстрой корректировки состава комбикорма. Однако в упрощенной технологической схеме миникомбикормовых заводов часто отсутствует комплекс подготовки зерна к переработке. Экструдирование осуществляется без предварительного измельчения и увлажнения цельного зерна, а также без очистки от минеральных примесей, что сказывается на работе экструдеров и их ресурсе [1, 2]. Перечисленных недостатков лишен экструдер ES-380 Avto S¹, в котором автоматический запуск и выход в рабочий режим осуществляются нажатием одной кнопки, система управления регулирует подачу, обеспечивая максимально возможную загрузку главного привода. Имеется функция передачи данных в диспетчерскую. Влажность исходного сырья влияет на процесс гранулирования.

Автоматизированные системы управления (АСУ) [3, 4] на комбикормовых заводах производительностью 10 т/ч контролируют работу технологического оборудования. АСУ применяются на средних и крупных комбикормовых заводах. Для миникомбикормового завода, состоящего из пневматической молотковой дробилки со смесителем, оборудованным весовым дозирующим устройством, необходим особый подход к контролю и управлению технологическим процессом, максимально снижающему человеческий фактор.

¹Agro-engineering: сайт. (2022). Register. URL: <https://agro-i.ru/catalog/oborudovanie-dlya-proizvodstva-kombikorma/ekstrudery/ekstrudery-es-380/?ysclid=m77bujlxs54920022>.

На минизаводе рецепты комбикормов заносятся в память контроллера, каждому компоненту присваивается порядковый номер без возможности выбора очередности загружаемого материала. Загрузка компонентов производится в определенной последовательности и качество готового продукта зависит от работы оператора, проводящего дозирование компонентов по световому и звуковому сигналам электронного весового дозирующего устройства при достижении 80 и 100% веса дозы, а также при превышении заданной массы компонента.

На миникомбикормовых заводах отсутствуют модули микродозирования что, по мнению авторов [5], не позволяет производить комбикорма надлежащего качества.

Работы С.Ю. Булатова и др. [6, 4] посвящены совершенствованию процесса дозирования сыпучих компонентов при производстве комбикормов шнековым дозатором как с ручным, так и с автоматическим управлением. В работе Ю.А. Ушакова и др. [7] представлено устройство объемного дозирования сыпучих компонентов комбикормов, повышающее точность дозирования множества сочетаний компонентов в автоматическом режиме. Способ непрерывного взвешивания дозаторным расходомером представил Д. Шилин [8, 9], что в совокупности с качественным смешиванием [10] позволит в будущем проводить дозирование в малых производственных цехах.

Выявить неисправности решета в молотковой дробилке в режиме реального времени позволяет созданная на основе машинного зрения система автоматической идентификации, установленная на устройстве отбора проб [11].

Проблемами дробилок с большой мощностью установленного электродвигателя являются большие пусковые токи и малый ресурс работы при частых перегрузках. Для решения первой проблемы применяют устройства плавного пуска или переключатели схем подключения со «звезды» при разгоне,

на «треугольник» после выхода на номинальные обороты. Вторая задача решается установкой амперметра для визуальной оценки степени загрузки дробилки, поскольку в силу особенности конструкции пневматические самовсасывающие дробилки не имеют средств автоматического регулирования подачи исходного сырья. Проблематике токовой защиты асинхронного электродвигателя посвящены работы В.Г. Петько и др. [12], в которых обосновываются основные конструктивные параметры защиты, в том числе с использованием микроконтроллера.

Совершенствованию технологического процесса измельчения зерна на молотковых дробилках посвящены также работы зарубежных авторов. Это, в частности, повышение эффективности просеивания решета на основе воздушного потока [13], использование Т-образного молотка вместо классического, имеющего прямоугольную форму [14], оптимизация работы по ключевым факторам – скорости вращения шпинделя, влажности зерна кукурузы и количества молотков [15], повышение производительности молотковой дробилки за счет решета с треугольным профилем для разрушения циркуляционного слоя [16], а также комбинированного решета [17].

Проведенный анализ выявил актуальность вопроса автоматизации миникомбикормового производства.

Цель исследований: повышение эффективности работы миникомбикормового завода за счет автоматического контроля и управления процессом измельчения зерновых компонентов.

Материалы и методы

Для исключения человеческого фактора при загрузке пневматической молотковой дробилки необходимо обеспечить дистанционное управление эжектором, которое позволит плавно увеличивать подачу зернового материала в дробилку, при этом в качестве обратной связи используют силу потребляемого тока. Для контроля максимальной допустимой нагрузки на дробилках с мощностью двигателя от 5 кВт используют амперметр, установленный на пульте управления. При этом контроль силы тока осуществляется оператором визуально, а регулировка эжектора производится вручную перемещением центральной трубы эжектора непосредственно в месте забора зернового материала. Блоки управления приводом технологического оборудования по силе тока уже существуют, остается решить задачу дистанционного управления эжектором, расположенным на конце гибкого материалопровода на расстоянии до 10...15 м от пневматической молотковой дробилки. Это позволит в автоматическом режиме останавливать подачу

материала в дробилку при достижении заданной массы измельчаемого компонента посредством обеспечения связи блока управления эжектором с электронным весовым дозирующим устройством.

Чтобы исключить ошибочную загрузку оператором компонента в иерархии рецептурного списка, предлагается использовать систему машинного зрения, которая на основе анализа изображения компонента позволит исключить влияние человеческого фактора за счет связи с электронным весовым дозирующим устройством.

Основным компонентом систем машинного зрения являются камеры, обеспечивающие получение цифрового изображения высокого качества, оптимального для компьютерной обработки, анализа, измерений, диагностики, распознавания и контроля². В части программного обеспечения возможно использование библиотеки с открытым кодом OpenCV, а в качестве аппаратных средств – nVidiaJetson, Intel® Movidius™ Myriad™ X Vision Processing Unit.

Проблему человеческого фактора можно исключить и путем установки стационарных оптических датчиков на каждом закрое с зерновым материалом, которые также необходимо связать с электронным весовым дозирующим устройством.

Электронное весовое дозирующее устройство должно обеспечивать передачу данных на ПК оператора для обеспечения оперативного контроля, учета компонентов комбикормов и накопления данных.

Предлагаемая схема управления пневматической молотковой дробилкой на основе дистанционного управления эжектором представлена на рисунке 1.

Управление пневматической молотковой дробилкой по предложенной схеме позволит исключить ошибочную загрузку компонента, оптимизировать загрузку дробилки по силе тока и защитить ее от перегрузки, автоматически отключать подачу измельчаемого компонента при достижении заданной рецептурой массы, собирать данные для последующего анализа состава готовых комбикормов и количества израсходованных компонентов.

На основании проведенного анализа технологического процесса производства комбикормов поставлена задача: разработать механическую часть системы дистанционного управления эжектором пневматической молотковой дробилки.

²Базуев И.В. Цифровизация процессов единой системы управления производственной безопасностью // Актуальные проблемы нефти и газа: Сборник трудов V Всероссийской молодежной научной конференции, Москва, 20-21 октября 2022 года. Москва: Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, 2022. С. 169-172. EDN: WZEKHN

В качестве технического решения предлагается эжектор с управляемым окном подсоса воздуха, площадь которого изменяется подпружиненной заслонкой, перемещающейся с помощью «боуден-троса» (рис. 2) и сервопривода, управляемого блоком управления эжектора.

Предлагаемый эжектор работает следующим образом. Перед запуском пневматической дробилки заслонка находится в положении «Открыто». После включения дробилки (пневмотранспортной установки) эжектор помещается в насыпь транспортируемого материала. Сервопривод плавно закрывает заслонку. Уменьшение площади окна подсоса воздуха приводит к увеличению разрежения в приемном конусе эжектора, и как следствие – к засасыванию транспортируемого материала и подаче его в пневматическую дробилку. При этом визуально наблюдается изменение показаний амперметра, а в блоке управления эжектором фиксируется значение силы

тока, при которой заслонка останавливается. После окончания процесса измельчения (транспортирования) заслонка переводится в положение «Открыто». Разрежение в приемном конусе падает, прекращается подача транспортируемого материала и происходит продувка всасывающего материалопровода и пневматической дробилки.

Методика экспериментальных исследований. Для подтверждения предложенной гипотезы проведены поисковые экспериментальные исследования процесса измельчения зерна на молотковой дробилке с отводом продуктов измельчения зерна посредством пневмотранспорта.

Исследовали зависимость гранулометрического состава продуктов дробления зерна от подачи зерна в дробилку и величины потребляемой мощности.

Гранулометрический состав проб измельченного зерна определялся с помощью метода ситового анализа согласно ГОСТ 13496.8-72 «Комбикорма».

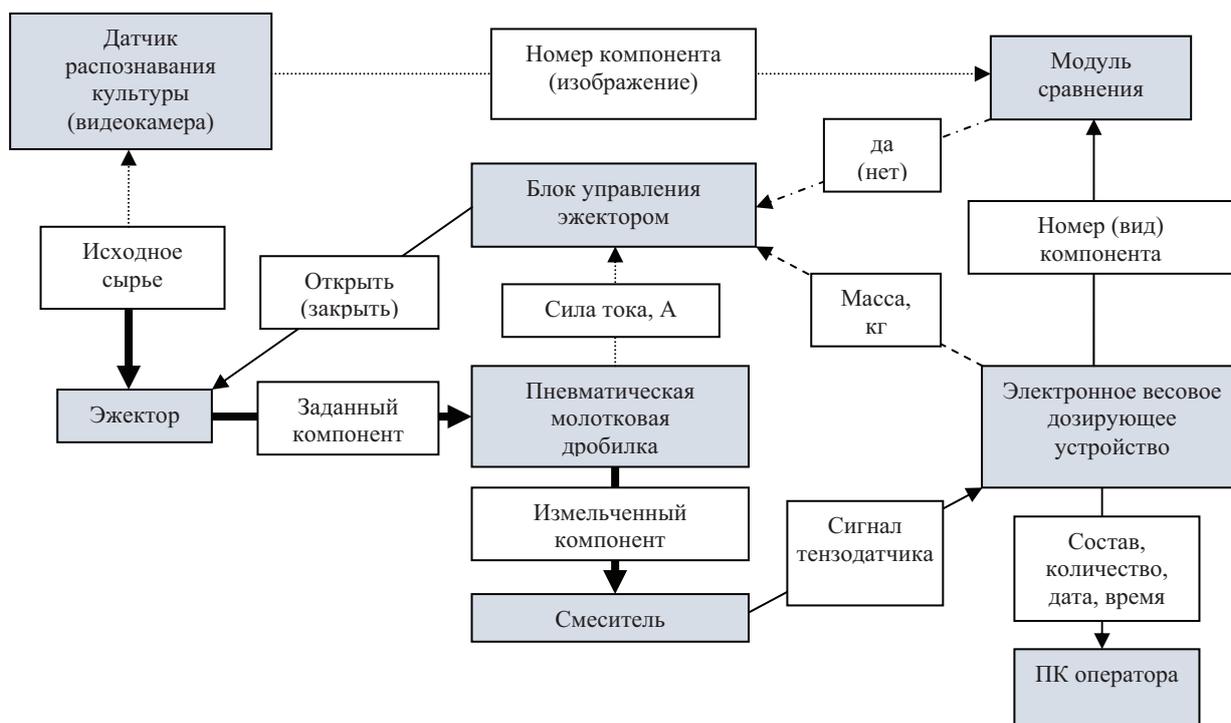


Рис. 1. Блок-схема управления пневматической молотковой дробилкой с дистанционным управлением эжектора

Fig. 1. Block diagram of a pneumatic hammer crusher with remote ejector control

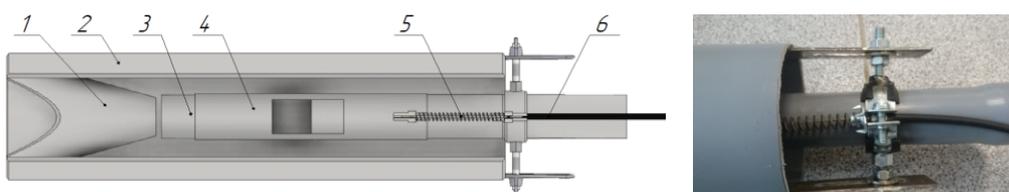


Рис. 2. Конструкция эжектора:

1 – конфузор; 2 – кожух; 3 – центральная труба; 4 – заслонка; 5 – пружина; 6 – «боуден-трос»

Fig. 2. Ejector design:

1 – confuser; 2 – casing; 3 – central pipe; 4 – flap; 5 – spring; 6 – Bowden cable

Замер потребляемой мощности дробилки и эффективность работы циклона определялись на экспериментальной установке.

Измельчались пробы зерна пшеницы массой 4 кг и влажностью около 16%. Диаметр отверстий решета на дробилке соответствовал 3 мм.

Схема экспериментального стенда, состоящего из дробилки ШИК Б-600 с системой отвода продуктов дробления, включающей в себя пневмоприемник-отвод типа У2-БПО, материалопровод, циклон УЦ-38 и вентилятор, представлена на рисунке 3.

Подачу зерна в дробилку ШИК Б-600 регулировали штатной заслонкой, расположенной в загрузочном бункере. Предварительно экспериментально определили минимальную высоту подъема заслонки, обеспечивающую стабильное поступление зерна в камеру измельчения, а оставшийся ход разбили на пять равноудаленных положений. Изготовили дополнительную задвижку, открывающуюся вручную при сохранении выставленного положения основной заслонки в каждой повторности.

Время измельчения каждой пробы зерна определяли секундомером, потребляемую мощность дробилки – амперметром.

Из общей массы измельченного зерна отбирали пробы методом квадратования и проводили ситовой анализ согласно ГОСТ 13496.8-72 «Комбикорма».

Ситовой анализ навески массой 100 г проводили набором штампованных сит диаметром 150 мм с отверстиями диаметром 1, 2, 3 и 5 мм на рассеве лабораторном У1-ЕРЛ-10. Использовали весы лабораторные ВК-600 с точностью взвешивания 0,01 г.

Для экспериментальной проверки работоспособности предлагаемого эжектора с регулируемым окном подсоса воздуха разработана и изготовлена экспериментальная установка (рис. 4), в которой за счет разрежения, создаваемого вентилятором, зерно из короба засасывается эжектором и по гибкому материалопроводу попадает в циклон с приемным герметичным бункером.

На центральной трубе эжектора (рис. 5) выполнено окно подсоса воздуха прямоугольного сечения. Площадь живого сечения всасывающего окна в 1,75 раза больше площади сечения материалопровода диаметром 36 мм.

Приняв ширину окна B как $1/4$ от длины окружности центральной трубы диаметром d , получим

$$B \geq d \cdot \sin(\alpha / 2) \geq 36 \cdot \sin(90^\circ / 2) \geq 25,5 \text{ мм}, \quad (1)$$

где α – центральный угол, соответствующий $1/3$ длины окружности, $\alpha = 90^\circ$.

Принято $B = 26 \text{ мм}$.

Длина окна L определена соотношением:

$$L \geq 0,25 \cdot 1,75 \cdot 4 \cdot d \geq 1,75 \cdot 36 \geq 63 \text{ мм}. \quad (2)$$

Принято $L = 65 \text{ мм}$.

В центральной трубе эжектора на расстоянии $l \geq L$ от входного конца вырезано окно прямоугольной формы с длиной $L = 65 \text{ мм}$ и шириной $B = 26 \text{ мм}$.

Зерновой ворох засыпался в имитирующий закрываемый короб. Предварительно перемещением центральной трубы в пазах кронштейна при закрытой заслонке окна подсоса воздуха эжектор настраивался на максимальную загрузку. Предварительно определено положение заслонки, обеспечивающее стабильное засасывание материала в эжектор.

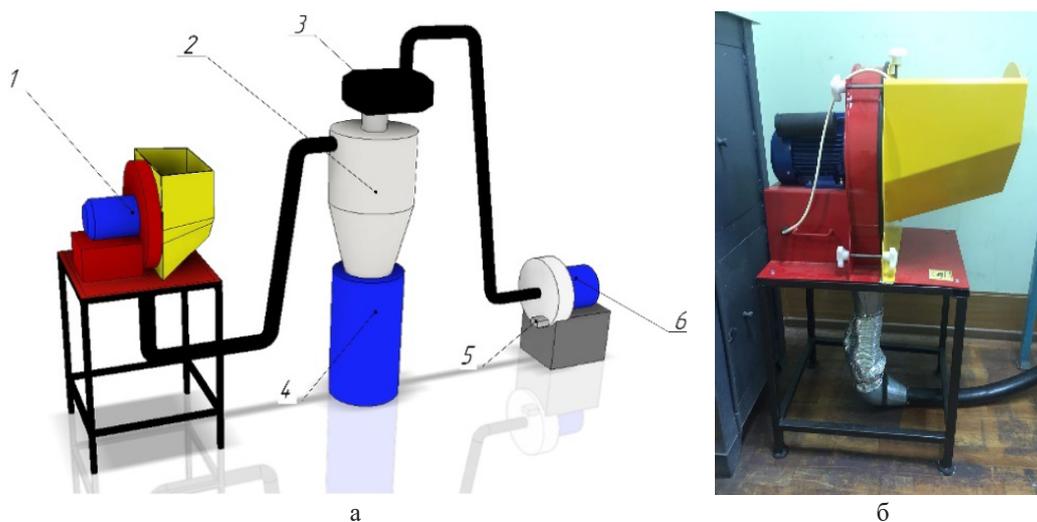


Рис. 3. Схема экспериментальной установки (а) и общий вид дробилки ШИК Б-600 (б):

1 – пневматическая молотковая дробилка; 2 – циклон; 3 – фильтр-уловитель частиц; 4 – емкость сбора фракций; 5 – выходной патрубков фракций; 6 – вентилятор

Fig. 3. Experimental installation (a) and general view of the ShIK B-600 crusher (b):

1 – hammer crusher; 2 – cyclone; 3 – particle trap filter; 4 – fraction collection tank; 5 – fraction outlet branch pipe; 6 – fan

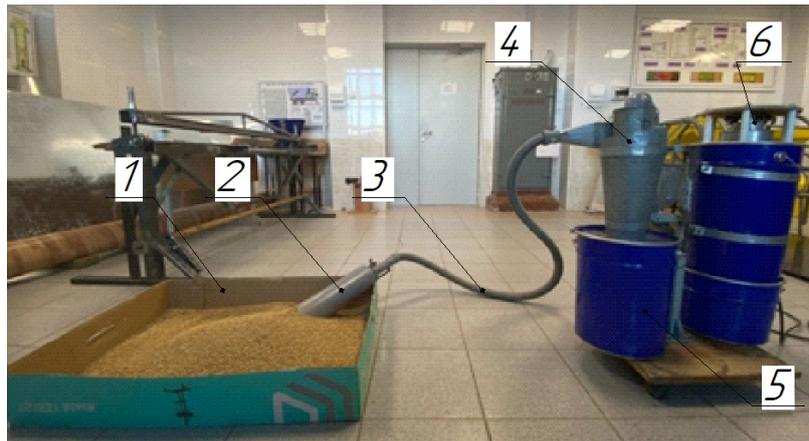


Рис. 4. Общий вид экспериментальной установки с эжектором:
1 – короб; 2 – эжектор; 3 – материалопровод; 4 – циклон ЦР; 5 – бункер; 6 – вентилятор

Fig. 4. General view of the experimental installation with an ejector:
1 – box; 2 – ejector; 3 – material pipeline; 4 – cyclone discharger; 5 – hopper; 6 – fan



Рис. 5. Общий вид конструкции эжектора
Fig. 5. General view of ejector structure

Затем вдоль длины окна подсоса воздуха отметили семь одинаковых отрезков, получив шесть положений заслонки. На этапе проверки работоспособности эжектора не использовались «боуден-трос» и пружина. Опыт проводился в трехкратной повторности.

Каждая повторность проводилась в такой последовательности: выставлялось очередное положение заслонки относительно центральной трубы эжектора; запускался вентилятор; после выхода его на номинальные обороты эжектор помещался в ворох зерна; с момента погружения засекалось время наполнения бункера (60 с); фиксировалась потребляемая мощность вентилятора; по истечении 60 с эжектор извлекался из вороха; система продувалась; взвешивался набранный материал³; производилась обработка полученных данных.

³Новосибирский государственный аграрный университет: сайт. (2022). Register. URL: <https://edubiotech.ru/file/1829181>.

Результаты и их обсуждение

Результаты экспериментальных исследований гранулометрического состава продуктов дробления зерна в виде массы остатков на ситах (m_o , г) в зависимости от подачи (q , кг/с) материала в дробилку представлены на гистограмме (рис. 6).

Установлено, что при изменении подачи материала меняется гранулометрический состав: при подаче 0,16 кг/с количество фракции, оставшейся на сите с диаметром отверстий 3 мм, увеличивается на 40%, а количество мелкой пылевидной, проходящей через сито с диаметром отверстий 1 мм, уменьшается на 8% по сравнению с подачей 0,09 кг/с.

В диапазоне увеличения подачи с 0,1 до 0,16 кг/с остаток на сите с диаметром отверстий 1 мм имеет тенденцию снижаться на 15%, а с диаметром отверстий 2 мм – наоборот, увеличиваться на 25%.

Полученные данные дают возможность регулировать гранулометрический состав изменением подачи материала в дробилку в зависимости от назначения готового комбикорма, что сказывается на качестве готового продукта.

Результаты замеров потребляемой мощности (N , Вт) молотковой дробилки при изменении подачи материала (q , кг/с) представлены на рисунке 7.

Полученная зависимость подтверждает взаимосвязь потребляемой мощности от подачи зернового материала в молотковую дробилку и гранулометрического состава продуктов измельчения зерна, а также возможность автоматического регулирования степени ее загрузки посредством силы тока в качестве обратной связи от дробилки к блоку управления эжектором. Подаче 0,13 и 0,16 кг/с соответствуют значения мощности 2722 и 2982 Вт. С учетом того, что паспортная мощность электродвигателя молотковой

дробилки ШИК Б-600 составляет 2200 Вт, перегрузка составила 24 и 34% соответственно.

Асинхронные двигатели выдерживают кратковременные перегрузки до 50% в течение 1 мин практически без последствий. Поскольку технологический процесс измельчения зерна по продолжительности занимает значительно большее время, то перегрузки неизбежно приведут к перегреву и преждевременному выгоранию изоляции обмоток статора, что

доказывает необходимость автоматической защиты электродвигателя по току нагрузки.

Результаты экспериментальной проверки работоспособности предлагаемого эжектора с регулируемым окном подсоса воздуха полностью подтверждают техническую возможность дистанционного управления производительностью пневматической молотковой дробилки в диапазоне от 0 (при открытой заслонке) до 933 кг/ч (при закрытом окне) (рис. 8).

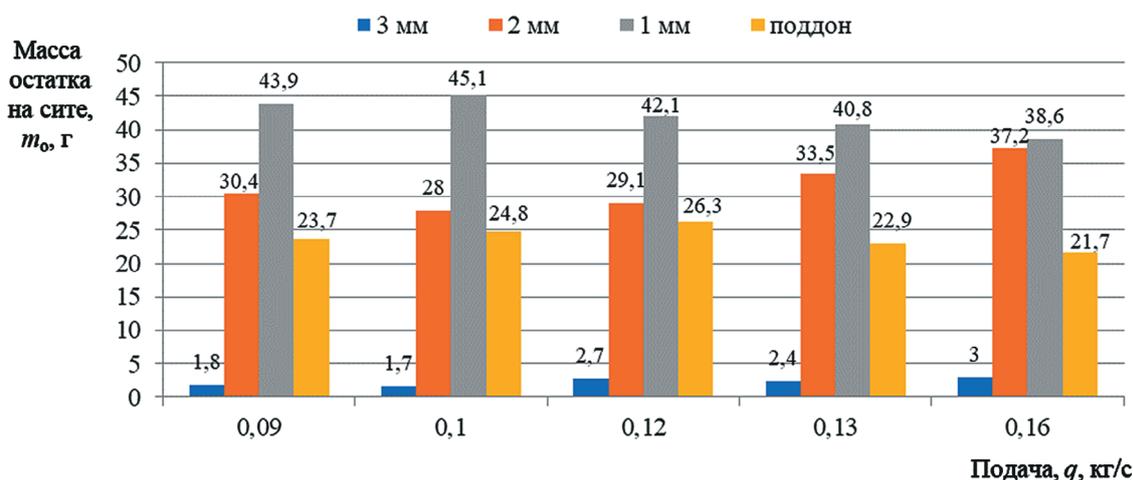


Рис. 6. Зависимость гранулометрического состава продуктов измельчения зерна от подачи на дробилку ШИК Б-600

Fig. 6. Relationship between grain size distribution of grain milling products and feed to the ShIK B-600 crusher

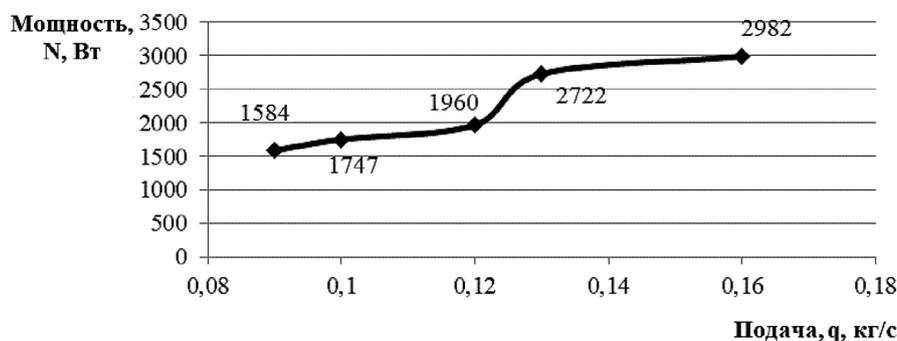


Рис. 7. Зависимость потребляемой мощности (N) дробилкой ШИК Б-600 от подачи материала (q)

Fig. 7. Relationship between power consumption (N) of the ShIK crusher B-600 and the supply of material (q)

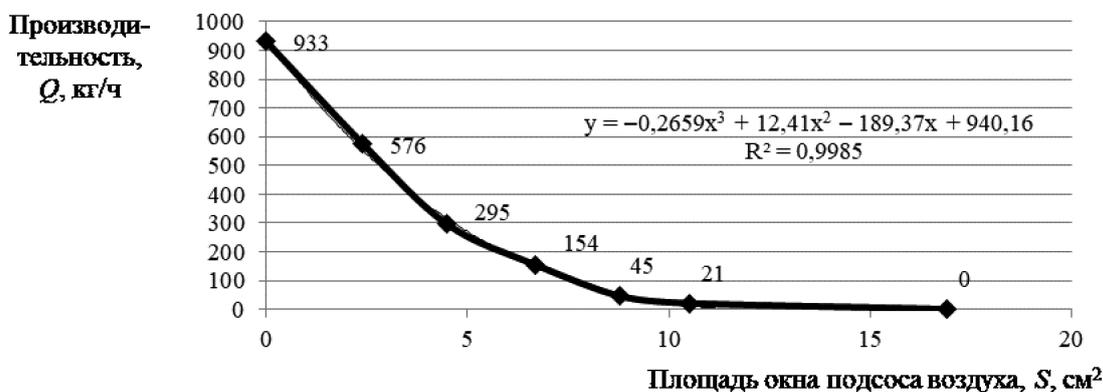


Рис. 8. Зависимость производительности эжектора (Q) от площади окна подсоса воздуха (S)

Fig. 8. Relationship between the ejector capacity (Q) and the air suction window area (S)

По данным С.Ю. Булатова [19], подающее устройство (эжектор) оказывает влияние на производительность агрегата приготовления рассыпных комбикормов. По результатам производственных испытаний выявлено повышение производительности дробилки на 15% в результате модернизации эжектора. Также дистанционное управление эжектором повышает эксплуатационную надежность пневматической молотковой дробилки за счет защиты асинхронных электродвигателей от перегрузок [12] в автоматическом режиме.

Выводы

1. В комбикормовом производстве, в условиях фермерских хозяйств, отсутствуют системы автоматизированного управления.

2. Предложенная авторами схема управления пневматической молотковой дробилкой с дистанционным

управлением эжектора показала свою работоспособность в ходе экспериментальной проверки.

3. Установленная зависимость производительности эжектора от площади окна подсоса воздуха имеет вид полинома третьей степени с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,9985$. Таким образом, в зависимости от положения заслонки блок управления эжектором может прогнозировать требуемую производительность и автоматически корректировать подачу зернового материала в дробилку, повышая качество готового продукта.

4. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку сервопривода для плавного перемещения «боуден-троса» как в прямом, так и в обратном направлениях, а также мгновенного отключения подачи материала при достижении заданной массы компонента или возникновении аварийной ситуации.

Список источников / References

1. Пшенев Е.А. Гидротермическая подготовка зерна перед экструдированием // Актуальные проблемы агропромышленного комплекса: Сборник трудов научно-практической конференции преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов Новосибирского ГАУ, г. Новосибирск, 20 октября 2021 г. Новосибирск: Издательский центр НГАУ «Золотой колос», 2021. С. 97-101. EDN: ZRJTCZ
1. Pshenov E.A. Hydrothermal preparation of grain before extruding. *Aktualnye problemy agropromyshlennogo kompleksa: Proceedings of the Scientific and Practical Conference of academic staff, postgraduate students, master students and students of Novosibirsk GAU, Novosibirsk, October 20, 2021*. Novosibirsk: Izdatelskiy tsentr NGAU "Zolotoy Kolos", 2021. Pp. 97-101. (In Russ.)
2. Prabhakar S., Anjali S., Anjali S. Study of machine parameters in twin-screw extruder for pulses based extrudate. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2021;23(4):274-282.
3. Peng F., Fang F., Huang Z.G. Development and experimental study on a pilot-scale feed pellet mill. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2020;13(6):201-206. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201306.5826>
4. Афанасьев В., Щеблыкин В. Комплексные интегрированные системы автоматизации комбикормового производства // Комбикорма. 2017. № 10. С. 48-52. EDN: ZOХКІТ
4. Afanasyev V., Shcheblykin V. Complex integrated systems of feed production automation. *Kombikorma*. 2017;10:48-52. (In Russ.)
5. Bulatov S., Nechaev V., Savinykh P., Rucins A. Research results of experimental automated system for dosing bulk materials. *Engineering for Rural Development*. 2021;199-204. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF043>
6. Chkalova M., Shahov V., Pavlidis V., Solovyov S. Application of nanopowders in industrial production of mixed feed. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;771:012065. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/771/1/012065>
7. Карташов С.Г. Использование цифровизации производства при разработке технологии приготовления кормолекарственных смесей // Вестник ВИЭСХ. 2018. № 4. С. 95-100. EDN: MJQUPR
7. Kartashov S.G. Use of production digitalization in the development of the preparation technology of feed-medicinals mixtures. *Vestnik VIESKh*. 2018;4:95-100. (In Russ.)
8. Булатов С.Ю., Нечаев В.Н., Сергеев А.Г., Савиных П.А. Результаты исследований весового дозирования ингредиентов комбикорма // Техника и оборудование для села. 2021. № 1. С. 20-24. EDN: YUQNPU
8. Bulatov S.Yu., Nechaev V.N., Sergeev A.G., Savinykh P.A. Results of research of weight batching of feed compound ingredients. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021;1:20-24. (In Russ.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-1-20-24>
9. Ушаков Ю.А., Пушко В.А., Ягудин А.Р., Тимофеев А.О. Устройство объемного дозирования сыпучих компонентов для производства комбикормов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2020. № 3. С. 226-229. EDN: RMYWFE
9. Ushakov Yu.A., Pushko V.A., Yagudin A.R., Timofeev A.O. The device for volumetric dosing of bulk components for mixed feeds production. *Izvestiya Orenburgskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2020;3:226-229. (In Russ.)
10. Shilin D., Shestov D. Continuous weighing technology with increased energy efficiency of bulk materials with various physical and mechanical properties. *Lecture Notes in Electrical Engineering (LNEE)*. 2021;729:245-254. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71119-1_25
11. Biazzi H.M., Tubin J.S.B., Conte R.A. et al. Different sieving methods for determining the physical characteristics in ground corn. *Acta Scientiarum Animal Sciences*. 2022;44(1):e53382. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v44i1.53382>
12. Благовещенская М.М., Петряков А.Н., Савостин С.Д., Благовещенский И.Г. Применение алгоритмов распознавания формы объектов для автоматизации контроля органолептических показателей качества комбикормового производства // Развитие пищевой и перерабатывающей промышленности России: кадры и наука. 2017. Т. 1. С. 194-196. EDN: WOLCDT
12. Blagoveshchenskaya M.M., Petryakov A.N., Savostin S.D., Blagoveshchenskiy I.G. Use of algorithms of object shape recognition for the automated control of organoleptic quality indicators of mixed fodder production. *Razvitie pishchevoy i pererabatyvayushchey promyshlennosti Rossii: kadry i nauka*. 2017;1:194-196. (In Russ.)
13. Zhang W., Niu Z., Liu J., Liu M. Design and experiments of online automatic identification device for screen breakage of hammer mill. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions*

of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 2021;37(2):61-70. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2021.2.008>

14. Petko V., Rakhimzhanova I., Ushakov Y., Fomin M., Kononets V. Justification of main design parameters of asynchronous electric motor current protection. *Engineering for Rural Development*. 2021. Pp. 1154-1162. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF251>

15. Cao L., Zhang Y., Zhang Y., Li Y. Influence of screen parameters optimization on screening efficiency of feed hammer mill. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2016;32(22):284-288. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2016.22.039>

Информация об авторах

¹ **Пшенов Евгений Александрович**, канд. техн. наук, доцент кафедры механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции; evgen_mex@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6371-456X>, AuthorID: 729838

² **Диденко Александр Александрович**, канд. техн. наук, доцент кафедры механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции; didenkonsau@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8146-9147>, AuthorID: 772798

³ **Блёскин Сергей Сергеевич**, ассистент кафедры механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции; moonlait2510@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8671-6485>, AuthorID: 1145092

⁴ **Годорожа Вячеслав Александрович**, магистрант кафедры механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции; godorozha2001@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-4426-3122>

^{1,2,3,4} Новосибирский государственный аграрный университет; 630039, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 160

Вклад авторов

Е.А. Пшенов – формулирование концепции экспериментальных исследований;

А.А. Диденко – разработка методики проведения исследований;

С.С. Блёскин – представление результатов, обработка полученных результатов;

В.А. Годорожа – проведение экспериментальных исследований, подготовка графических материалов.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 17.10.2024, после рецензирования и доработки 18.02.2025; принята к публикации 02.03.2025

16. Khudher A.Y., Almaliki S.A., Himoud M.S. Effect of hammer shape and impact area on hammer mill performance under different feed rates. *Basrah Journal of Agricultural Sciences*. 2021;34(2):88-99. <https://doi.org/10.37077/25200860.2021.34.2.07>

17. Wang D., He C., Tian H. et al. Parameter optimization and experimental research on the hammer mill. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020;62(3):341-350. <https://doi.org/10.35633/inmateh-62-36>

18. Wang D., He C., Wang H. et al. Design and experimental optimization of airfoil-triangle sieve for hammer mill. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020;61(2):315-322. <https://doi.org/10.35633/inmateh-61-34>

Author Information

Evgeniy A. Pshenov¹, CSc (Eng), Associate Professor, the Department of Mechanization of Animal Husbandry and Processing of Agricultural Products; evgen_mex@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6371-456X>, AuthorID: 729838

Aleksandr A. Didenko², CSc (Eng), Associate Professor, the Department of Mechanization of Animal Husbandry and Processing of Agricultural Products; didenkonsau@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8146-9147>, AuthorID: 772798

Sergey S. Bleskin³, Assistant Professor, the Department of Mechanization of Animal Husbandry and Processing of Agricultural Products; moonlait2510@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8671-6485>, AuthorID: 1145092

Vyacheslav A. Godorozha⁴, MSc student, the Department of Mechanization of Animal Husbandry and Processing of Agricultural Products; godorozha2001@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-4426-3122>.

^{1,2,3,4} Novosibirsk State Agrarian University; 630039, Russia, Novosibirsk, Dobrolyubova Str., 160.

Authors Contribution

Е.А. Pshenov – conceptualization;

А.А. Didenko – methodology;

С.С. Bleskin – results and discussion, data curation, formal analysis;

В.А. Godorozha – investigation, visualization.

Conflict of interests

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

Received 17.10.2024; Revised 18.02.2025; Accepted 02.03.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.363.28:636.085.62:639.3.043.2

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-47-53>

Оптимизация энергоемкости процесса влажного гранулирования корма в корзинном грануляторе

С.В. Брагинец¹, В.И. Пахомов², О.Н. Бахчевников^{3✉}, А.С. Алферов⁴, К.А. Деев⁵^{1,2,3,4,5} Аграрный научный центр «Донской»; г. Зерноград, Россия^{1,2} Донской государственный технический университет; г. Ростов-на-Дону, Россия¹ sbraginet@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>² vniizk30@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>³ oleg-b@list.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>⁴ alfa-8303@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5210-781X>⁵ prosto.deev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4160-0382>

Аннотация. Влажное гранулирование растительного сырья с целью приготовления гранулированного корма малого диаметра для рыб и их мальков целесообразно проводить в корзинном грануляторе. Экспериментальные исследования проведены с целью установления рациональных значений факторов влажного гранулирования, обеспечивающих его низкую удельную энергоемкость. В корзинном грануляторе корм из растительного сырья для мальков рыб гранулировали, получая гранулы диаметром 2 мм и длиной 4 мм. В результате предварительных исследований установлены три наиболее значимых фактора, влияющих на процесс влажного гранулирования растительного сырья и удельную энергоемкость гранулирования: влажность сырья, модуль помола сырья и частота вращения рабочих органов корзинного гранулятора. В качестве критерия оптимизации процесса влажного гранулирования растительного сырья была принята удельная энергоемкость процесса. Эксперимент проводили при следующих значениях факторов: влажность корма – 30, 35 и 40%; модуль его помола – 0,82, 1,24 и 1,66 мм; частота вращения рабочих органов гранулятора – 40, 50 и 60 мин⁻¹. Полученное уравнение регрессии адекватно описывает процесс влажного гранулирования корма. Установленные оптимальные значения удельной энергоемкости влажного гранулирования кормов, равные 1,9...2,3 кВт·ч/т, достигаются при следующих рациональных значениях факторов: влажность сырья – 40...42%; модуль его помола – 1,6...1,7 мм; частота вращения рабочих органов гранулятора – 60...62 мин⁻¹. При соблюдении указанных значений получают водостойкие гранулы и обеспечивается минимальная удельная энергоемкость гранулирования.

Ключевые слова: влажное гранулирование, корзинный гранулятор, гранулы, растительное сырье, корм для рыб, влажность сырья, модуль помола сырья, частота вращения рабочих органов гранулятора, удельная энергоемкость гранулирования

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Аграрный научный центр "Донской"».

Благодарности. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Брагинец С.В., Пахомов В.И., Бахчевников О.Н., Алферов А.С., Деев А.С. Оптимизация энергоемкости процесса влажного гранулирования корма в корзинном грануляторе // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 2. С. 47-53. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-47-53>

ORIGINAL ARTICLE

Optimizing the energy intensity of wet granulation of feed in a basket granulator

S.V. Braginet¹, V.I. Pakhomov², O.N. Bakhchevnikov^{3✉}, A.S. Alferov⁴, K.A. Deev⁵^{1,2,3,4,5} Agricultural Research Centre "Donskoy"; Zernograd, Russia^{1,2} Don State Technical University; Rostov-on-Don, Russia¹ sbraginet@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>² vniizk30@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>³ oleg-b@list.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>⁴ alfa-8303@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5210-781X>⁵ prosto.deev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4160-0382>

Abstract. Wet granulation of plant-based raw materials is necessary to prepare granulated feed of small diameter for fish and their fry. A basket granulator is a feasible solution for this process. The authors performed experimental

studies to establish rational values of factors of wet granulation, providing its low specific energy intensity. Fish fry feed from plant material was pelleted in a basket granulator to get pellets with a diameter of 2 mm and a length of 4 mm. Three most significant factors affecting the process of wet granulation of plant-based raw materials and specific energy intensity of granulation were established after preliminary studies: moisture content of raw materials, grinding modulus of raw materials and rotation speed of the granulator's operating parts. Specific energy intensity of granulation was accepted as a criterion for optimizing the wet granulation process of plant-based raw materials. The experiment was conducted at the following values of factors: a feed moisture content of 30, 35, and 40%; its grinding modulus 0.82, 1.24, and 1.66 mm; a rotation speed of granulator operating parts of 40, 50 and 60 min^{-1} . The obtained regression equation adequately describes the process of wet granulation. The established optimal values of specific energy intensity of wet granulation of feeds, equal to 1.9 to 2.3 $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}$, are achieved at the following rational values of factors: a raw material moisture content of 40 to 42%; a grinding modulus of 1.6 to 1.7 mm; a rotation speed of the granulators operating parts of 60 to 62 min^{-1} . Obtaining waterproof granules at the minimum specific energy intensity of granulation is possible on condition that the specified values of factors are observed.

Keywords: wet granulation, basket granulator, granules, plant-based raw material, fish feed, feed moisture, feed grinding modulus, rotation speed of the granulator's operating elements, specific energy intensity of granulation

Funding. The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the State Assignment of the Agrarian Science Center "Donskoy".

Acknowledgements. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Braginets S.V., Pakhomov V.I., Bakhchevnikov O.N., Alferov A.S., Deev A.S. Optimizing the energy intensity of wet granulation of feed in a basket granulator. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(2):47-53 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-47-53>

Введение

При производстве кормов для аквакультуры проблематичным является приготовление для мальков рыб гранулированного корма с диаметром гранул менее 2 мм [1]. Причиной этого является то, что широко используемые в промышленности пресс-грануляторы с вертикальной кольцевой матрицей не могут изготавливать такие гранулы из растительного сырья с приемлемой энергоемкостью [2].

Гранулы корма для пресноводных рыб изготавливают способом влажного гранулирования при влажности сырья 30...40% [3]. Этот способ позволяет получать водостойкие гранулы, но требует повышенных затрат энергии при использовании грануляторов с вращающейся кольцевой матрицей [4]. Энергоемкость процесса гранулирования значительно увеличивается при уменьшении диаметра фильер, и производство гранул корма диаметром менее 2 мм становится нерентабельным [5].

Решить проблему производства гранул корма диаметром 1...2 мм можно с помощью корзинного гранулятора [6, 7]. Стенка корзины гранулятора служит неподвижной кольцевой матрицей. Внутри корзины вращаются в противоположных направлениях два вида рабочих органов. Рассекатели перемешивают влажное сырье, разбивая агломераты, а размещенные ниже лопасти выдавливают его через фильеры кольцевой матрицы, формируя в горизонтальной плоскости гранулы.

Ранее корзинный гранулятор не применяли для приготовления кормов из растительного сырья, и процесс его работы почти не изучен. В частности, неизвестно влияние различных факторов на энергоемкость гранулирования и их значимость. В связи с этим необходимо провести экспериментальные исследования процесса влажного гранулирования растительного сырья в корзинном грануляторе по уменьшению его энергоемкости.

Цель исследований: выявить факторы, влияющие на удельную энергоемкость процесса влажного гранулирования растительного сырья в корзинном грануляторе, и определить их рациональные значения для оптимизации энергопотребления.

Материалы и методы

Эксперимент выполнили на корзинном грануляторе, разработанном и изготовленном в Аграрном научном центре «Донской» по патенту RU218265 (рис. 1). Диаметр и длина канала фильеры корзинного гранулятора составили 2 мм.

В результате предварительных исследований выделили три наиболее значимых фактора, влияющих на процесс влажного гранулирования растительного сырья: W – влажность сырья, %; M – модуль помола сырья, мм; f – частота вращения рабочих органов корзинного гранулятора, мин^{-1} . В результате экспериментов было установлено, что температура сырья не оказывает существенного влияния на энергоемкость процесса гранулирования.

Для математического описания процесса гранулирования был принят нелинейный полином второго порядка.

При планировании эксперимента применен некомпозиционный трехуровневый план Бокса-Бенкена второго порядка для трех факторов [8, 9]. В результате предварительных экспериментов были выбраны уровни варьирования факторов (табл.).

В качестве критерия оптимизации процесса влажного гранулирования растительного сырья была принята удельная энергоёмкость гранулирования E . Целью оптимизации являлось достижение минимальных значений этого критерия.

Статистическую обработку экспериментальных данных выполнили в программе Statistica 12.0. Значимость коэффициентов уравнения регрессии определяли по критерию Стьюдента. Адекватность полученного уравнения проверяли критерием Фишера [10].

Рациональные значения сочетания факторов, при которых достигается оптимальная (минимальная) удельная энергоёмкость процесса гранулирования, были определены методом «наискорейшего спуска» (Бокса-Уилсона), посредством которого были найдены области экстремума поверхностей отклика уравнения регрессии [11].

Энергоёмкость процесса гранулирования определяли при помощи регистратора параметров электрических сигналов РП-ЭС 1 БМ, который измерял действующие значения фазных токов и линейного напряжения в трехфазной сети при работе гранулятора и передавал их на компьютер. По известным формулам вычисляли потребляемую корзи́нным гранулятором электрическую мощность и, разделив ее на массу гранулированного корма, получали удельную энергоёмкость процесса гранулирования.

В соответствии с планом эксперимента растительное сырье измельчали в молотковой дробилке до получения продуктов с модулем помола 0,82; 1,24; 1,66 мм.

Сырье смешивали в горизонтальном смесителе, получая корм для мальков карпа, в соотношении: 60% – зерно пшеницы; 30% – бобы сои; 10% – белково-минеральные добавки.

При смешивании сырье увлажняли горячей водой (температура – 70°C) для лучшего связывания частиц сырья между собой, желатинизации крахмала и увеличения плотности гранул [12]. Из полученного рассыпного корма влажностью 30, 35 и 40% с помощью корзи́нного гранулятора формировали гранулы

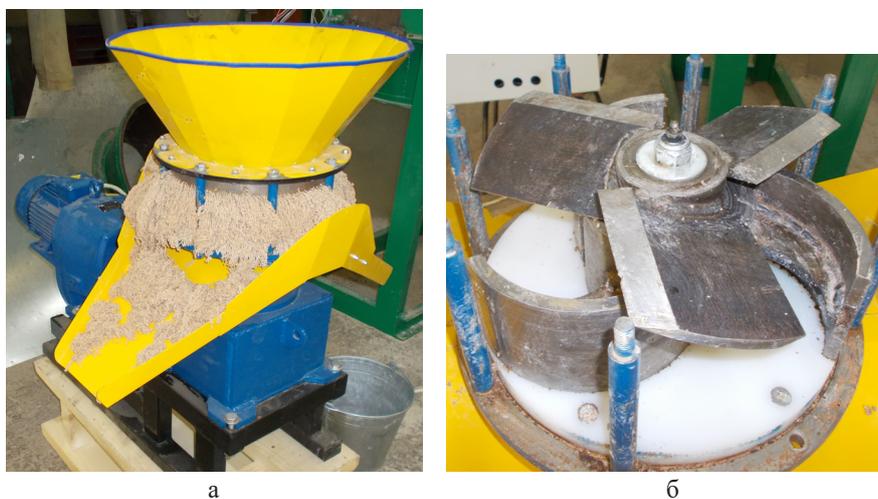


Рис. 1. Корзи́нный гранулятор: а – общий вид; б – рабочие органы

Fig. 1. Basket granulator: a – general view, b – operating elements

Факторы и уровни их варьирования

Таблица

Factors and their variation levels

Table

Фактор, единицы измерения <i>Factor name, units of measurement</i>	Уровень фактора / <i>Factor level</i>		
	-1	0	+1
Влажность сырья, % / <i>Raw material moisture, %</i>	30	35	40
Модуль помола сырья, мм / <i>Raw material grinding modulus, mm</i>	0,82	1,24	1,66
Частота вращения рабочих органов гранулятора, мин ⁻¹ <i>Rotation speed of granulator's operating elements, min⁻¹</i>	40	50	60

диаметром 2 мм. Частота вращения рабочих органов корзиночного гранулятора, изменяемая посредством трехфазного частотного преобразователя, составляла 40, 50 и 60 мин⁻¹.

Выходящие из фильер матрицы стренги корма отрезали при помощи установленного снаружи корзины гранулятора режущего механизма (патент RU218265, который на рисунке 1 не показан), формируя гранулы длиной 4 мм.

Результаты и их обсуждение

После статистической обработки результатов экспериментов было получено уравнение регрессии в закодированном виде, описывающее процесс влажного гранулирования корма, и определен коэффициент корреляции *R*:

$$y = 1,98 + 0,19x_1 + 0,65x_2 - 0,88x_3 + 0,08x_1x_2 + 0,16x_1x_3 + 0,55x_2x_3 + 0,34x_1^2 + 0,48x_2^2 + 0,36x_3^2,$$

$$R = 0,9602,$$

где *y* – удельная энергоёмкость гранулирования, кВт·ч/т; *x*₁ – влажность сырья, %; *x*₂ – модуль помола сырья, мм; *x*₃ – частота вращения рабочих органов гранулятора, мин⁻¹.

Уравнение регрессии адекватно описывает процесс влажного гранулирования корма, так как величина критерия Фишера, равная 2,64, меньше табличного значения, равного 2,66.

Заменяв кодированные значения факторов натуральными, получили математическую

зависимость критерия оптимизации от варьируемых факторов:

$$E = 2,68 + 0,34W + 0,89M - 1,09f + 0,33WM + 0,49Wf + 0,92Mf + 0,54W^2 + 0,71M^2 + 0,91f^2.$$

Данное уравнение регрессии методом канонического преобразования свели к уравнениям с двумя факторами, построив на их основе поверхности отклика и их частные двумерные сечения. При этом значение третьего фактора оставалось на постоянном уровне.

Двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость удельной энергоёмкости гранулирования от влажности сырья и модуля его помола, представлено на рисунке 2. Из графика следует, что наилучший результат, при котором удельная энергоёмкость гранулирования составляет 2,3 кВт·ч/т, достигается при значениях модуля помола сырья 1,6...1,7 мм и его влажности 40...42%. Увеличение значений модуля помола сырья и его влажности до указанных значений снижает удельную энергоёмкость гранулирования.

Двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость удельной энергоёмкости гранулирования от влажности сырья и частоты вращения рабочих органов гранулятора, показано на рисунке 3.

Из графика рисунка 3 следует, что оптимальные значения удельной энергоёмкости процесса гранулирования лежат за пределами области экспериментальных исследований. Данные рисунка 3 показывают, что увеличение влажности сырья и частоты

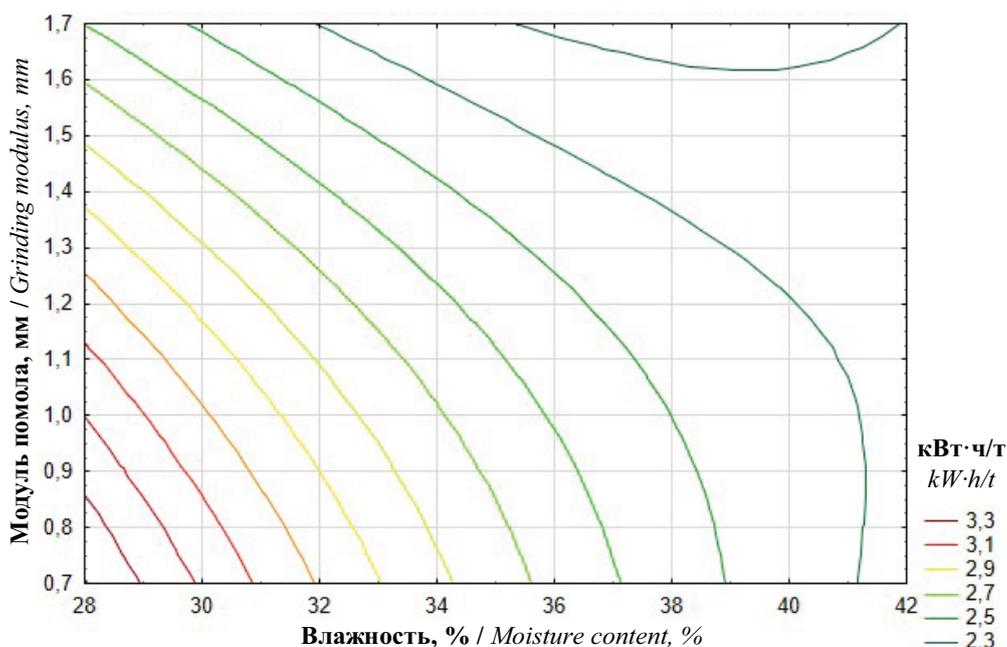


Рис. 2. Влияние влажности сырья и модуля его помола на удельную энергоёмкость процесса влажного гранулирования (частота вращения рабочих органов *f* = 50 мин⁻¹)

Fig. 2. Effect of raw material moisture content and its grinding modulus on the specific energy intensity of wet granulation (rotation speed *f* = 50 min⁻¹)

вращения рабочих органов гранулятора снижает удельную энергоёмкость. При этом частота вращения рабочих органов является более значимым фактором, чем влажность сырья.

Из имеющихся экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что для достижения минимальной удельной энергоёмкости 1,9...2,1 кВт·ч/т

необходимо обеспечить влажность сырья 40...42% и частоту вращения рабочих органов 60...62 мин⁻¹.

Двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость удельной энергоёмкости гранулирования от модуля помола сырья и частоты вращения рабочих органов гранулятора, показано на рисунке 4.

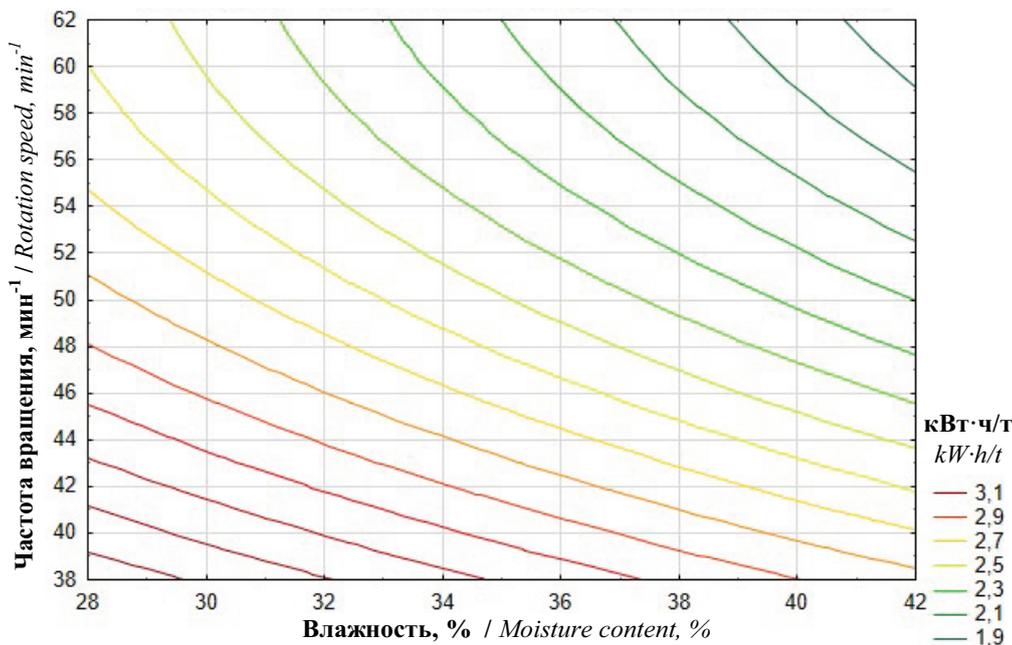


Рис. 3. Влияние влажности сырья и частоты вращения рабочих органов корзинного гранулятора на удельную энергоёмкость процесса влажного гранулирования (модуль помола $M = 1,24$ мм)

Fig. 3. Effect of raw material moisture content and rotation speed of the basket granulator on the specific energy intensity of wet granulation (grinding modulus $M = 1.24$ mm)

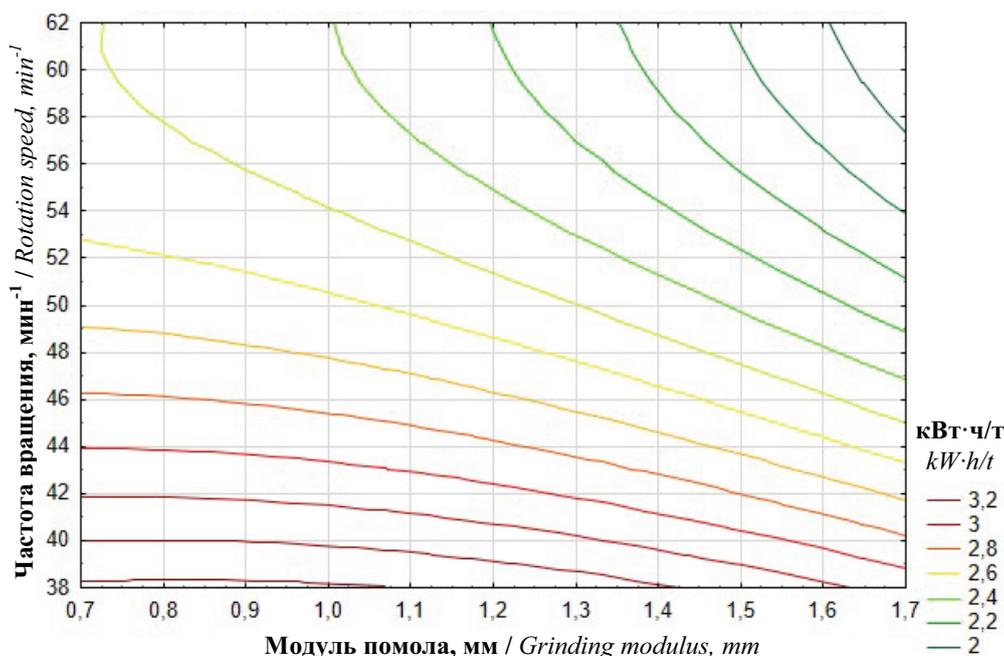


Рис. 4. Влияние модуля помола сырья и частоты вращения рабочих органов корзинного гранулятора на удельную энергоёмкость процесса влажного гранулирования (влажность сырья $W = 35\%$)

Fig. 4. Effect of raw material grinding modulus and rotation speed of the granulator on the specific energy intensity of wet granulation (raw material moisture $W = 35\%$)

Из графика рисунка 4 следует, что и в данном случае оптимальные значения удельной энергоёмкости процесса гранулирования лежат за пределами области экспериментальных исследований. Увеличение модуля помола сырья и частоты вращения рабочих органов снижает удельную энергоёмкость гранулирования влажного корма. При этом частота вращения экструзионных лопастей гранулятора является более значимым фактором, чем модуль помола сырья. Можно сделать вывод о том, что для достижения минимальной удельной энергоёмкости процесса $2 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$ необходимо обеспечить модуль помола сырья $1,6 \dots 1,7 \text{ мм}$ и частоту вращения рабочих органов $58 \dots 62 \text{ мин}^{-1}$.

Таким образом, для снижения удельной энергоёмкости процесса влажного гранулирования необходимо увеличивать влажность сырья, модуль его помола, а также частоту вращения рабочих органов корзинного гранулятора. Однако увеличивать значения этих параметров можно лишь до определенных пределов.

Методом «наискорейшего спуска» (Бокса-Уилсона) нашли оптимальные (минимальные) значения удельной энергоёмкости процесса влажного гранулирования.

Анализ полученных графических зависимостей позволил выявить область рациональных значений параметров процесса влажного гранулирования кормов: влажность сырья – $40 \dots 42\%$; модуль помола сырья – $1,6 \dots 1,7 \text{ мм}$; частота вращения рабочих органов гранулятора – $60 \dots 62 \text{ мин}^{-1}$. При указанных значениях достигаются оптимальные наименьшие значения удельной энергоёмкости процесса, равные $1,9 \dots 2,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$.

Объяснение закономерностей, установленных для процесса влажного гранулирования корма в корзинном грануляторе, может быть аналогичным известным закономерностям процесса гранулирования в пресс-грануляторе. Так, увеличение влажности сырья до рациональных значений способствует снижению удельной энергоёмкости гранулирования

вследствие уменьшения трения материала о стенки канала фильеры гранулятора [13].

В проведенных нами опытах наблюдалось снижение удельной энергоёмкости гранулирования при увеличении модуля помола с $0,7$ до $1,7 \text{ мм}$. Это объясняется выбранным диапазоном варьирования данного фактора, в который не входили слишком малые (менее $0,7 \text{ мм}$) и слишком большие (более $1,7 \text{ мм}$) значения, при которых наблюдается обратная тенденция повышения энергоёмкости [5].

Уменьшение удельной энергоёмкости процесса гранулирования при увеличении частоты вращения рабочих органов гранулятора объясняется сокращением времени, необходимого для гранулирования определенного количества сырья, вследствие увеличения скорости его продавливания через фильеры и образования гранул.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований были определены рациональные значения параметров процесса влажного гранулирования растительного сырья в корзинном грануляторе, позволяющие получать качественный гранулированный корм для рыб и обеспечивающие оптимальную низкую удельную энергоёмкость процесса.

Выводы

1. Для влажного гранулирования растительного сырья с целью приготовления гранулированного корма малого диаметра гранул для рыб и их мальков более всего подходит корзинный гранулятор.

2. На удельную энергоёмкость процесса влажного гранулирования растительного сырья в корзинном грануляторе преимущественно влияют три фактора: влажность сырья, модуль его помола, частота вращения рабочих органов гранулятора.

3. Оптимальные значения удельной энергоёмкости влажного гранулирования кормов, равные $1,9 \dots 2,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$, достигаются при влажности сырья $40 \dots 42\%$, модуле помола $1,6 \dots 1,7 \text{ мм}$ и частоте вращения рабочих органов гранулятора $60 \dots 62 \text{ мин}^{-1}$.

Список источников / References

1. Куликов А.В., Литвинчук А.А., Куликова О.М. и др. Исследование возможности и определение параметров получения микрогранул рыбных комбикормов для выращивания мальков // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2019. Т. 12, № 2. С. 43-51. EDN: XDDUJT

Kulikov A.V., Litvinchuk A.A., Kulikova O.M. et al. Investigation of opportunities and determination of parameters of production of microgranules of fish fodder for fry. *Food Industry: Science and Technologies*. 2019;12(2):43-51. (In Russ.) <https://foodindustry.belar.by/jour/article/view/402>

2. Blagov D.A., Gizatov A.Y., Smakuyev D.R. et al. Overview of feed granulation technology and technical means for its implementation. *IOP Conference*

Series: Earth and Environmental Science. 2020;613:012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/613/1/012018>

3. Kumaraguru Vasagam K.P., Ambasankar K., Dayal J.S. An overview of aquafeed formulation and processing. *Advances in Marine and Brackishwater Aquaculture*. 2015:227-240. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2271-2_21

4. Nielsen S.K., Mando M., Rosenorn A.B. Review of die design and process parameters in the biomass pelleting process. *Powder Technology*. 2020;364:971-985. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.051>

5. Dujmović M., Safran B., Jug M. et al. Biomass Pelletizing Process: A Review. *Drvna Industrija*. 2022;73(1):99-106. <https://doi.org/10.5552/drwind.2022.2139>

6. Zukowski S.R., Kodam M., Khurana S. et al. Performance comparison of dome and basket extrusion granulation. *Chemical Engineering Research and Design*. 2020;160:190-198. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.04.037>

7. Fekete R., Peciar P., Juriga M. et al. Pressure and liquid distribution under the blade of a basket extruder of continuous wet granulation of model material. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2024;8(3):127. <https://doi.org/10.3390/jmmp8030127>

8. Durakovic B. Design of experiments application, concepts, examples: State of the art. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*. 2017;5(3):421-439.

9. Анисимов Н.П. Об использовании методики планирования эксперимента в соответствии с трехуровневыми планами Бокса-Бенкена // Вестник магистратуры. 2017. № 2-2. С. 32-36. (In Russ.) EDN: ZBMSQR

Anisimov N.P. On the use of experiment planning technique according to Box-Benken three-level plans. *Vestnik Magistratury*. 2017;2-2:32-36. (In Russ.)

Информация об авторах

¹ **Брагинец Сергей Валерьевич**, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник; SPIN-код: 4849-0287, AuthorID: 687835; sbraginet@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>

² **Пахомов Виктор Иванович**, д-р техн. наук, директор, член-корреспондент РАН; SPIN-код: 5815-4913, AuthorID: 405383; vniizk30@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>

³ **Бахчевников Олег Николаевич**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; SPIN-код: 3350-9055, AuthorID: 640052; oleg-b@list.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>

⁴ **Алферов Александр Сергеевич**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; SPIN-код: 7803-6092, AuthorID: 698970; alfa-8303@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5210-781X>

⁵ **Деев Константин Александрович**, инженер; SPIN-код: 9005-9443, AuthorID: 1195842; prosto.deev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4160-0382>

^{1,2,3,4,5} Аграрный научный центр «Донской»; 347740, Российская Федерация, Ростовская область, г. Зерноград, ул. Научный городок, 3

^{1,2} Донской государственный технический университет; 344003, Российская Федерация, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

Вклад авторов

С.В. Брагинец – общее руководство экспериментальными исследованиями, проведение критического анализа результатов и формулирование выводов;

В.И. Пахомов – научное руководство, формулирование основной концепции исследований;

О.Н. Бахчевников – анализ данных литературы, подготовка первоначального варианта текста и доработка текста;

А.С. Алферов – выполнение экспериментов и обработка их результатов;

К.А. Деев – выполнение экспериментов и обработка их результатов.

Конфликт интересов

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

Статья поступила в редакцию 14.11.2024; поступила после рецензирования и доработки 22.02.2025; принята к публикации 24.02.2025

10. Szpisják-Gulyás N., Al-Tayawi A.N., Horváth Z.H. et al. Methods for experimental design, central composite design and the Box–Behnken design, to optimise operational parameters: A review. *Acta Alimentaria*. 2023;52(4):521-537. <https://doi.org/10.1556/066.2023.00235>

11. Kleijnen J.P. Response surface methodology for constrained simulation optimization: An overview. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2008;16(1):50-64. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2007.10.001>

12. Gageanu I., Cujbescu D., Persu C. et al. Influence of input and control parameters on the process of pelleting powdered biomass. *Energies*. 2021;14:4104. <https://doi.org/10.3390/en1414104>

13. Ungureanu N., Vladut V., Voicu G. et al. Influence of biomass moisture content on pellet properties – review. *Engineering for Rural Development*. 2018;17:1876-1883. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N449>

Author Information

Sergey V. Braginet¹, DSc (Eng), Lead Research Engineer; sbraginet@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>

Viktor I. Pakhomov², DSc (Eng), Corresponding Member of the RAS, Director; vniizk30@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>

Oleg N. Bakhchevnikov³, CSc (Eng), Senior Research Engineer; oleg-b@list.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>

Aleksandr S. Alferov⁴, PhD (Eng), Senior Researcher; alfa-8303@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5210-781X>

Konstantin A. Deev⁵, Engineer; prosto.deev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4160-0382>

^{1,2,3,4,5} Agricultural Research Centre "Donskoy"; 3, Nauchny Gorodok Str., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russia

^{1,2} Don State Technical University; Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344003, Russia

Author Contribution

S.V. Braginet – project administration, formal analysis, conclusions;

V.I. Pakhomov – research supervision, conceptualization;

O.N. Bakhchevnikov – literature review, writing – original version draft, review and editing;

A.S. Alferov – investigation, data curation, analysis;

K.A. Deev – investigation, data curation, analysis.

Conflict of interests

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

Received 14.11.2024; Revised 22.02.2025; Accepted 24.02.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.436.2:621.4-1/-3

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-54-62>

Использование арахисового и пальмового масел в качестве топлива дизельных двигателей

А.В. Бижаев¹, В.Л. Чумаков^{2✉}, С.М. Гайдар³, А.М. Пикина⁴, А.В. Капустин⁵^{1,2,3,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия⁵ Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого; г. Великий Новгород, Россия¹ a.bizhaev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0807-1255>² valery.chumakov@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-1442-4416>³ techmash@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>⁴ pikina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0237-0534>⁵ kav8kapustin@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0002-7119-8192>

Аннотация. Повышение экологических требований к тракторным дизелям и рост цен нефтяных топлив вызывают необходимость поиска альтернативных топлив, способных частично или полностью заменить традиционные, – например, растительных масел. Арахисовое и пальмовое масла являются наиболее конкурентоспособными и доступными. Исследования проведены с целью оценки возможности использования арахисового и пальмового масел в качестве добавок к дизельному топливу тракторных двигателей. Экспериментальные исследования проводились на тракторном двигателе воздушного охлаждения Д-120 на смесевых топливах, по составу приближенных по физико-химическим свойствам к базовому дизельному топливу. В первой серии опытов смесевое топливо содержало по объему 40% арахисового масла, 30% дизельного топлива и 30% керосина. Во второй серии опытов дизельное топливо смешивалось с 10 и 20% пальмового масла. Анализировали влияние масел на расход топлива, удельный эффективный расход топлива и концентрацию токсичных компонентов отработавших газов. В качестве эталона использовали чистое дизельное топливо. Экспериментально установлено, что добавка 40% арахисового масла приводит к увеличению расхода топлива на 8...10% и концентрации продуктов неполного сгорания (углеводородов – на 25...32%, СО – в 1,55 раза). Концентрация оксидов азота и сажи снижается на 10...25% в зависимости от режима. При добавлении 10% пальмового масла расход топлива увеличивается на 0,1...0,2 кг/ч, при 20% – на 0,2...0,3 кг/ч. На низких и средних нагрузках 20%-ная добавка масла привела к снижению содержания углеводородов на 42% и увеличению СО на 37...49%. При высоких нагрузках снизилось содержание углеводородов на 17% и оксидов азота на 21% (4550 ppm), концентрация СО увеличилась в 6-8 раз (до 65 ppm). Содержание сажи в отработавших газах при 10%-ной добавке снижается на 20...30%, при 20%-ной – на 35...45%. В исследованиях доказано, что добавки к топливу – арахисовое и пальмовое масла – можно применять на дизельном двигателе, но необходима корректировка вязкости и периода задержки воспламенения топлива.

Ключевые слова: арахисовое масло, пальмовое масло, дизельное топливо, смесевое топливо, возобновляемые источники энергии, добавки к топливу, расход топлива

Для цитирования: Бижаев А.В., Чумаков В.Л., Гайдар С.М., Пикина А.М., Капустин А.В. Использование арахисового и пальмового масел в качестве топлива дизельных двигателей // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 2. С. 54-62. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-54-62>

ORIGINAL ARTICLE

Prospects of adding peanut and palm oils to diesel fuel for tractor engines

A.V. Bizhaev¹, V.L. Chumakov²✉, S.M. Gaydar³, A.M. Pikina⁴, A.V. Kapustin⁵^{1,2,3,4}Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia⁵Yaroslav the Wise Novgorod State University; Veliky Novgorod, Russia¹a.bizhaev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0807-1255>²valery.chumakov@gmail.com✉; <https://orcid.org/0000-0002-1442-4416>³techmash@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>⁴pikina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0237-0534>⁵kav8kapustin@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0002-7119-8192>

Abstract. Increased environmental requirements for tractor diesel engines and rising prices for petroleum fuels urge the search for alternative fuels to replace traditional ones, partially or completely. Peanut and palm oils are the most competitive and affordable solutions. The authors conducted the study to assess the possibility of using peanut and palm oils as additives to diesel fuel in tractor engines. Experimental studies were conducted on a D-120 air-cooled tractor engine using mixed fuels with a composition, the physicochemical properties of which were similar to the base diesel fuel. In the first series of experiments, the mixed fuel contained 40% peanut oil, 30% diesel fuel, and 30% kerosene by volume. In the second series of experiments, diesel fuel was mixed with 10 and 20% palm oil. The authors analyzed the effect of oils on fuel consumption, specific effective fuel consumption, and the concentration of toxic components in exhaust gases using pure diesel fuel as a standard. It has been experimentally established that the addition of 40% peanut oil leads to an increase in fuel consumption of 8 to 10% and the concentration of incomplete combustion products (hydrocarbons increases by 25 to 32%, CO – in 1.55 times). The concentration of nitrogen oxides and soot decreases by 10 to 25% depending on the mode. With the addition of 10% palm oil, fuel consumption increases by 0.1 to 0.2 kg/h, with 20% – by 0.2 to 0.3 kg/h. At low and medium loads, a 20% oil addition led to a decrease in the hydrocarbon content of 42% and an increase in CO of 37 to 49%. At high loads, the content of hydrocarbons decreased by 17% and nitrogen oxides by 21% (4550 ppm), the concentration of CO increased in 6-8 times (up to 65 ppm). The soot content in exhaust gases with a 10% additive is reduced by 20 to 30%, with 20% – by 35 to 45%. The study proved that fuel additives – peanut and palm oils – can be used in a diesel engine, but it is necessary to adjust the viscosity and ignition delay period of the fuel.

Keywords: peanut oil, palm oil, diesel fuel, mixed fuel, renewable energy sources, fuel additives, fuel consumption

For citation: Bizhaev A.V., Chumakov V.L., Gaydar S.M., Pikina A.M., Kapustin A.V. Prospects of adding peanut and palm oils to diesel fuel for tractor engines. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(2):54-62 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-54-62>

Введение

Современные экологические требования, предъявляемые к автотракторной технике в АПК, требуют снижения токсичности отработавших газов автотракторных двигателей, так как этот фактор негативно влияет на сельскохозяйственную продукцию и во многих странах ограничивается на законодательном уровне [1]. Рост стоимости дизельного топлива и ограничение нефтяных запасов также являются важными факторами для поиска решений этих проблем.

Существует большое количество способов снижения количества токсичных выбросов отработавших газов тракторного двигателя [2]. Одним из таких методов является использование альтернативных видов топлива и присадок к стандартному дизельному топливу, который применялся в ряде

исследований¹ [3]. В качестве альтернативных видов топлива, относящихся к классу возобновляемых источников энергии, могут использоваться масла, эфиры, спирт [4] и газообразные виды топлива, способные снизить токсичность отработавших газов [5]. Применение альтернативных топлив растительного происхождения обеспечивает необходимые требования к протеканию процессов смесеобразования и сгорания, а также удовлетворительную работу двигателя.

Анализ объемов производства масел растительного происхождения показал наибольшие темпы производства пальмового и соевого масел [6], что дает возможность их использования в качестве топлива для дизелей.

¹Шкаликова В.Н., Патрахальцев Н.Н. Применение нетрадиционных топлив в дизелях: Монография. М.: Изд-во Российского университета дружбы народов, 1993. 64 с.

Для работы дизельного двигателя можно использовать масло не только в чистом виде, но и в виде добавок к дизельному топливу в определенных пропорциях. Использование масел в чистом виде является рациональным в регионах возделывания масличных культур. В Китае, Индии, Нигерии и других странах Африки можно использовать арахисовое масло [7], в Малайзии и Индонезии – пальмовое. Арахисовое масло в отличие от пальмового менее распространено в качестве альтернативного вида топлива, однако при сравнительно низкой цене в странах-производителях актуальность его использования оправдана.

Арахисовое и пальмовое масла в отличие от дизельного топлива в своем составе содержат больше атомов кислорода, что повышает полноту их сгорания даже при худшем смесеобразовании.

Повышенная вязкость растительных масел ухудшает качество смесеобразования в топливной струе, а низкое цетановое число смеси приводит к задержке воспламенения смеси и ухудшению тепловыделения, что сопровождается ухудшением эффективных показателей, повышением содержания продуктов неполного сгорания и снижением концентрации сажи и оксидов азота [8, 9]. Арахисовое масло способно вызвать смолистые отложения на распылителе

форсунок, но при его использовании в качестве добавки к дизельному топливу и керосину этот эффект снижается [10]. Для коррекции вязкости или периода задержки воспламенения можно добавлять в состав растительных масел керосин² и перекись водорода [11]. Введение добавок позволяет избежать дополнительных регулировок топливной аппаратуры.

Использование пальмового масла в качестве топлива в регионах с умеренным климатом является проблематичным в связи с переходом его в твердое агрегатное состояние при пониженных температурах. Подогрев топлива до его подачи в топливную аппаратуру, предварительная его очистка или использование специальных присадок позволяют изменить вязкость топлива [12].

Цель исследований: оценка возможности использования арахисового и пальмового масел в качестве добавок к дизельному топливу тракторных двигателей.

Материалы и методы

Растительные масла, используемые в качестве топлива, имеют схожую тенденцию изменения характеристик работы дизелей [13, 14]. Проведенный анализ справочных и исследовательских данных по свойствам и параметрам арахисового масла (табл. 1)

Таблица 1

Основные характеристики некоторых видов топлива

Table 1

Main characteristics of some fuels

Физико-химические свойства <i>Physical and chemical properties</i>	Тип топлива / Fuel type				
	Дизельное топливо (ДТ) <i>Diesel fuel (DF)</i>	Арахисовое масло (АМ) <i>Peanut oil (PO)</i>	АМ+ДТ 50/50 <i>PO+DT 50/50</i>	Осветительный керосин (ОК) <i>Illuminating kerosene (IK)</i>	АМ+ДТ+ОК (40/30/30) <i>PO+DF+IK (40/30/30)</i>
Плотность при 15°C, кг/м ³ / <i>Density at 15°C, kg/m³</i>	832,4	917,3	877,7	810,5	859,8
Вязкость кинематическая, мм ² /с, при температуре <i>Kinematic viscosity, mm²/s, at temperature:</i>					
20°C	8,10	78,0	-9,27	1,82	7,90
40°C	5,75	12,3	4,87	1,34	5,61
100°C	2,20	9,36		0,71	2,13
Массовое содержание, % / <i>Mass content, %</i>					
С	86,6	78,0	82,1	85,8	82,9
Н	13,4	12,3	12,8	14,2	13,2
О	0,4	9,36	4,98	0,2	3,75
Теплота сгорания, кДж/кг / <i>Heat of combustion, kJ/kg</i>					
низшая / <i>lowest</i>	42967	37023	39829	42900	40569,3
высшая / <i>highest</i>	45776	39638	42558	43100	42518
Цетановое число / <i>Cetane number</i>	48-51	36,6	–	38	–
Температура помутнения, °C / <i>Cloud point, °C</i>	-22	3,3	–	-15	–
Розничная цена в РФ, руб/л / <i>Retail price in Russia, rub/l</i>	62	700*	380	110	330

*По международному биржевому курсу на ноябрь 2023 г. цена на арахисовое масло составила 140 руб/л.

²Савельев Г.С. Технологии и технические средства адаптации автотракторной техники к работе на альтернативных видах топлива: Дис. ... д-ра техн. наук. М.: ГНУ ВИМ, 2010. 315 с. EDN: QFLPBV.

выявил его схожесть с другими растительными маслами и возможность использования в качестве моторного топлива².

При подаче арахисового масла в цилиндры ДВС необходимо учитывать влияние вязкости на процесс топливоподачи и режим работы двигателя. Поэтому для коррекции вязкости арахисового масла использовали в качестве добавки бытовой осветительный керосин (ОК) марки КО-25 (ТУ 38.401-58-10-01). Его вязкость ниже арахисового масла в 2,25 раза при температуре 20°C и в 1,55 раза – при 100°C.

Вязкость пальмового масла меньше арахисового, однако температура его помутнения (20°C) значительно ниже, чем у ДТ, и на 16,7°C выше, чем у арахисового масла [15] (табл. 2).

Экспериментальные исследования проводились на тракторном двигателе воздушного охлаждения Д-120 на смесевых топливах, по составу приближенных по физико-химическим свойствам к базовому дизельному топливу.

В первой серии опытов смесевое топливо содержало по объему 40% арахисового масла (АМ), 30% дизельного топлива (ДТ) и 30% осветительного керосина (ОК) в качестве стабилизатора вязкости. Плотность такого состава практически не отличается от плотности дизельного топлива и составляет порядка 850 кг/м³ при температуре 15°C, низшая теплота сгорания соответствует 40569,3 кДж/кг.

Во второй серии экспериментов смесевое топливо содержало ДТ и пальмовое масло в количестве 10 и 20%.

Эксперименты с добавками арахисового (АМ) и пальмового масел (ПМ) проводились в разные дни

при различных условиях. Для объективной оценки результатов получены также характеристики на чистом дизельном топливе (ДТ).

Результаты и их обсуждение

В двух сериях опытов проведена оценка токсических и экономических показателей двигателя Д-120. Нагрузочные характеристики двигателя при частоте вращения коленчатого вала 1800 мин⁻¹ представлены на рисунках 1-6.

В ходе первого эксперимента на смесевом топливе (ДТ 30% + АМ 40% + ОК 30%) получены значения содержания продуктов неполного сгорания в отработавших газах – углеводородов (СН) и монооксида углерода (СО). Установлено, что практически во всем диапазоне изменения нагрузки добавка 40% АМ вызывает рост продуктов неполного сгорания на 20...30% (рис. 1). Отмечено некоторое снижение концентрации углеводородов в отработавших газах до 38 ppm при нагрузке 14 кВт, что сопоставимо с их содержанием при работе на чистом ДТ.

При работе на смесевом топливе с 40%-ной добавкой арахисового масла концентрация твердых частиц (С) в отработавших газах – практически как у чистого дизельного топлива во всем диапазоне нагрузки и имеет монотонный рост в пределах 0,7...2,5 ед. бош. Содержание оксидов азота (NO_x) снижается на 15...25% в зависимости от нагрузки (рис. 2).

Опыты проводились без корректировки регуляторов топливной аппаратуры. Несмотря на введение добавки 30% керосина (для доведения вязкости смесевое топлива до уровня дизельного), часовой расход топлива увеличился на 10...15% (рис. 3).

Таблица 2

Сравнение параметров пальмового масла и дизельного топлива

Table 2

Comparison of palm oil and diesel fuel parameters

Параметр <i>Parameter</i>	Пальмовое масло (ПМ) <i>Palm oil</i>	Дизельное топливо (ДТ) <i>Diesel fuel</i>
Плотность при 20°C, кг/м ³ / <i>Density at 20°C, kg/m³</i>	918	830
Вязкость при 100°C, мм ² /с / <i>Viscosity at 100°C, mm²/sec</i>	8,6	2,2
Теплотворная способность, МДж/кг / <i>Calorific value, MJ/kg</i>	37,1	42,5
Содержание кислорода, % / <i>Oxygen content, %</i>	11,4	0,4
Температура помутнения, °C / <i>Turbidity temperature, °C</i>	20	-22
Цетановое число / <i>Cetane number</i>	51	48-51
Розничная цена в РФ, руб/л / <i>Retail price in Russia, rubles/liter</i>	500*	62

*По международному биржевому курсу на ноябрь 2023 г. цена на пальмовое масло составила 70 руб/л.

³ О'Брайен Р. Жиры и масла. Производство, состав и свойства, применение: Пер. с англ. 2-го изд. В.Д. Широкова и др. СПб.: Профессия, 2007. 752 с.

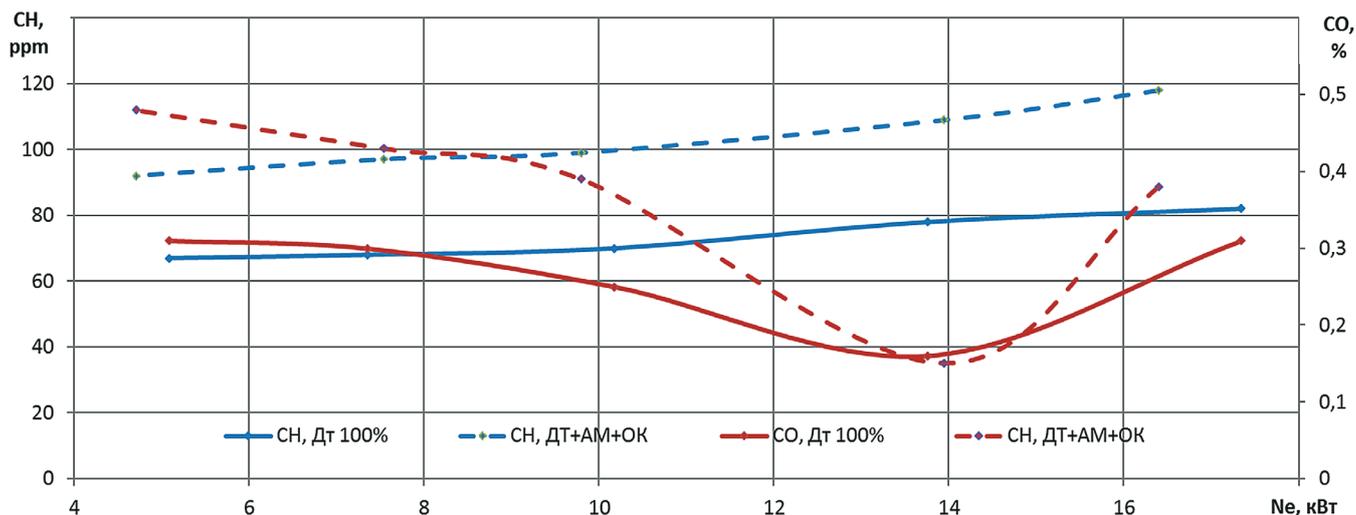


Рис. 1. Концентрация СН и СО при использовании чистого дизельного топлива и с добавкой арахисового масла
 Fig. 1. Concentration of CH and CO when using pure diesel fuel and a blend with peanut oil addition

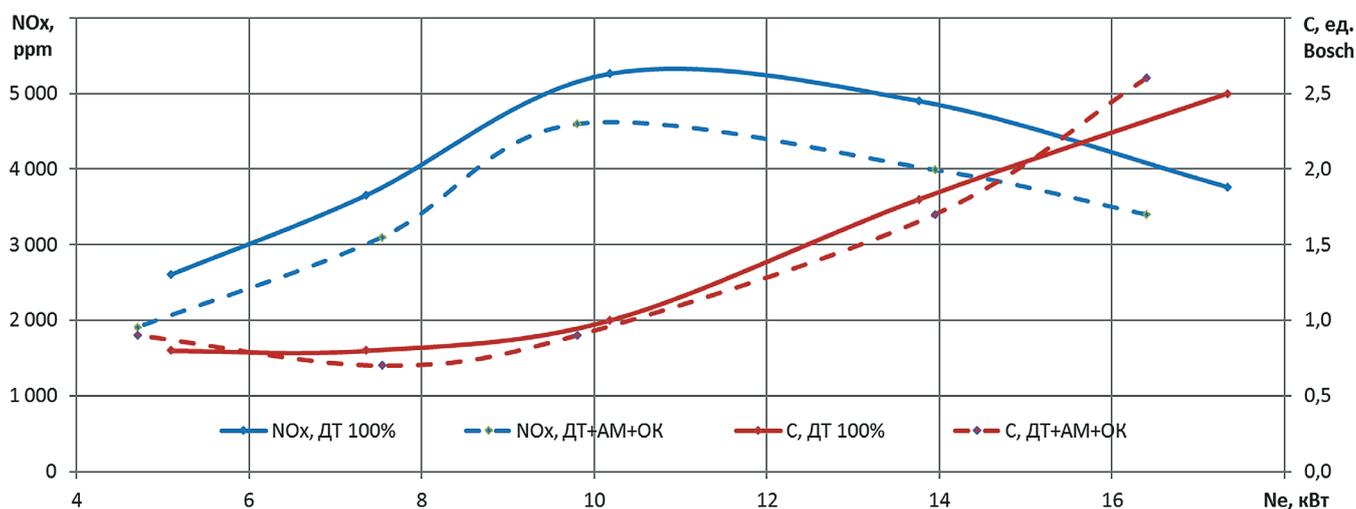


Рис. 2. Концентрация NOx и C при работе на дизельном топливе и с добавкой арахисового масла
 Fig. 2. Concentration of NOx and C when running on diesel fuel and a blend with peanut oil addition

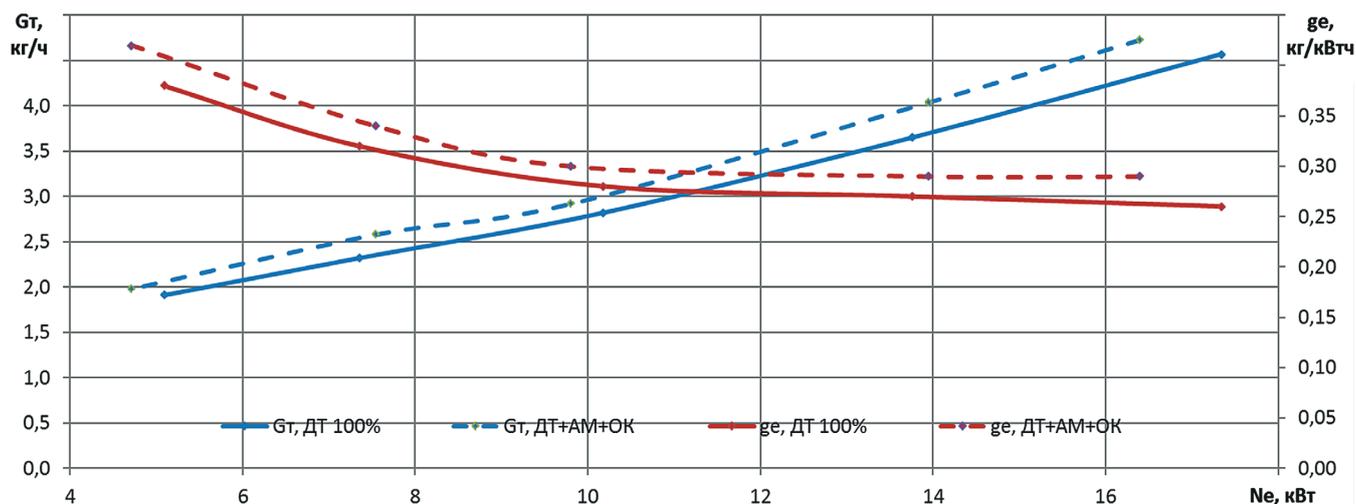


Рис. 3. Удельный эффективный расход топлива (ge) и часовой расход топлива (Gt) при использовании чистого дизельного топлива и с добавкой арахисового масла
 Fig. 3. Specific effective fuel consumption (ge) and hourly fuel consumption (Gt) when using pure diesel fuel and a blend with peanut oil addition

Удельный расход топлива приблизительно в такой же пропорции, как и часовой расход топлива, вырос на всем диапазоне нагрузочной характеристики.

Вторая серия опытов с добавкой пальмового масла (ПМ) показала, что увеличение содержания добавки пальмового масла с 10 до 20% увеличивает концентрацию монооксида углерода в отработавших газах. При добавлении 20% ПМ содержание CO увеличилось в 1,25...2,15 раза по сравнению с базовым дизелем. Наибольшее содержание CO наблюдалось при максимальных нагрузках (рис. 4).

При добавлении 20% пальмового масла содержание углеводородов (CH) снизилось на 60%

при низких нагрузках и на 20% при 16 кВт. Данная тенденция отличается от топлива с добавкой арахисового масла.

Концентрация оксидов азота (NO_x) в отработавших газах остается неизменной на малых и средних нагрузках, а с увеличением нагрузки снижается на 20% (рис. 5). Это объясняется ухудшением смесеобразования при высоких цикловых топливopодачах и снижением пиковой температуры сгорания в цилиндрах двигателя. Подобный эффект наблюдается и при добавках арахисового масла.

При добавлении 20% пальмового масла выброс сажи снижается на 20...30% (пропорционально его доле в ДТ) по сравнению с чистым ДТ.

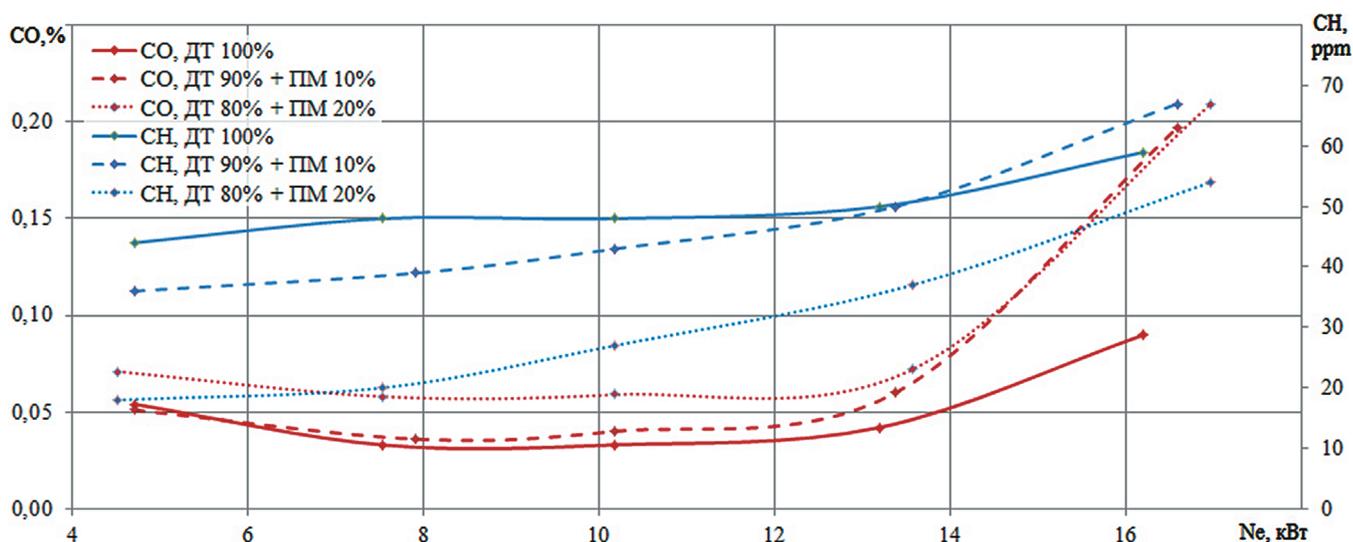


Рис. 4. Концентрация CH и CO при использовании чистого дизельного топлива и с добавкой пальмового масла (10 и 20%)

Fig. 4. Concentration of CH and CO when using pure diesel fuel and a blend with palm oil addition (10 and 20%)

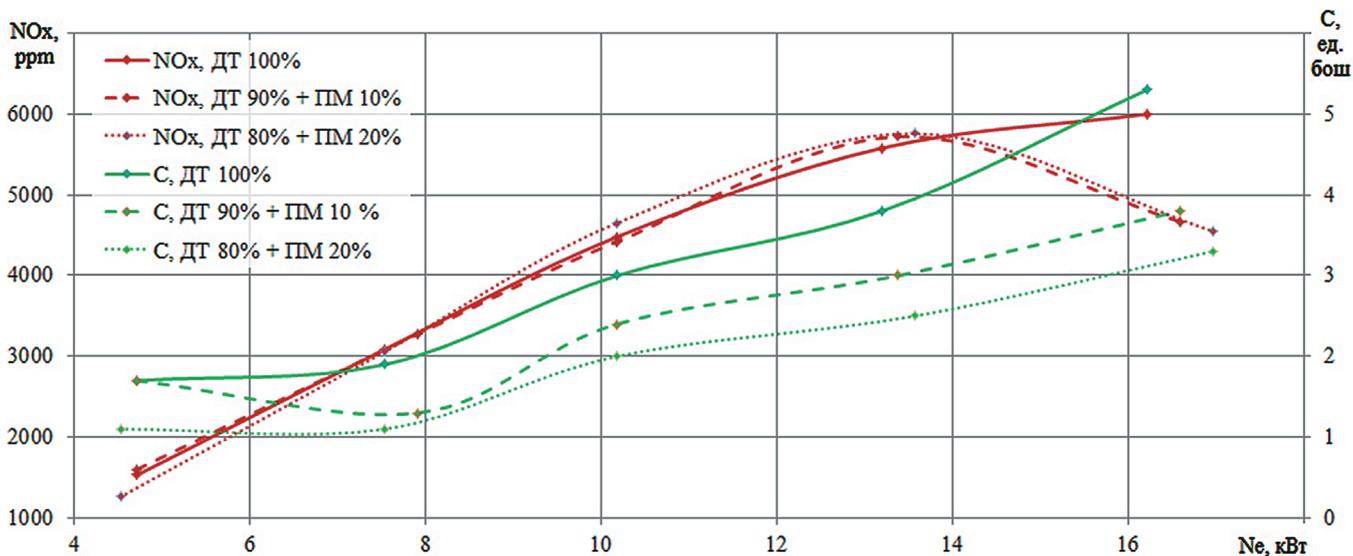


Рис. 5. Концентрация NO_x и C при использовании чистого дизельного топлива и с добавкой пальмового масла (10 и 20%)

Fig. 5. NO_x and C concentration when using pure diesel fuel and a blend with palm oil addition (10 and 20%)

Добавка 20% пальмового масла привела к росту часового расхода топлива от 0 до 10% (рис. 6), что вызвано работой механического регулятора топливного насоса высокого давления. С целью оценки естественной работы топливной системы двигателя настройки регулятора не производились.

Вследствие роста часового расхода топлива увеличился удельный эффективный расход топлива, отличия на высокой нагрузке достигают 12%. Коэффициент избытка воздуха при этом снизился приблизительно на 10%.

Результатами эксперимента показано, что добавки АМ и ПМ незначительно изменяют эффективные

показатели работы двигателя (на 10...12%), что связано с отсутствием настройки топливной системы под добавки различных масел, однако сильнее влияют на содержание токсичных выбросов (20...30%, а в некоторых случаях – до 60%).

Несмотря на ухудшение некоторых показателей, работа на дизельном двигателе может обеспечиваться добавками рассматриваемых масел без серьезных нарушений. В дальнейших исследованиях планируется провести анализ условий образования токсичных продуктов двигателя с целью развития стратегии использования растительных масел в качестве альтернативы существующему дизельному топливу.

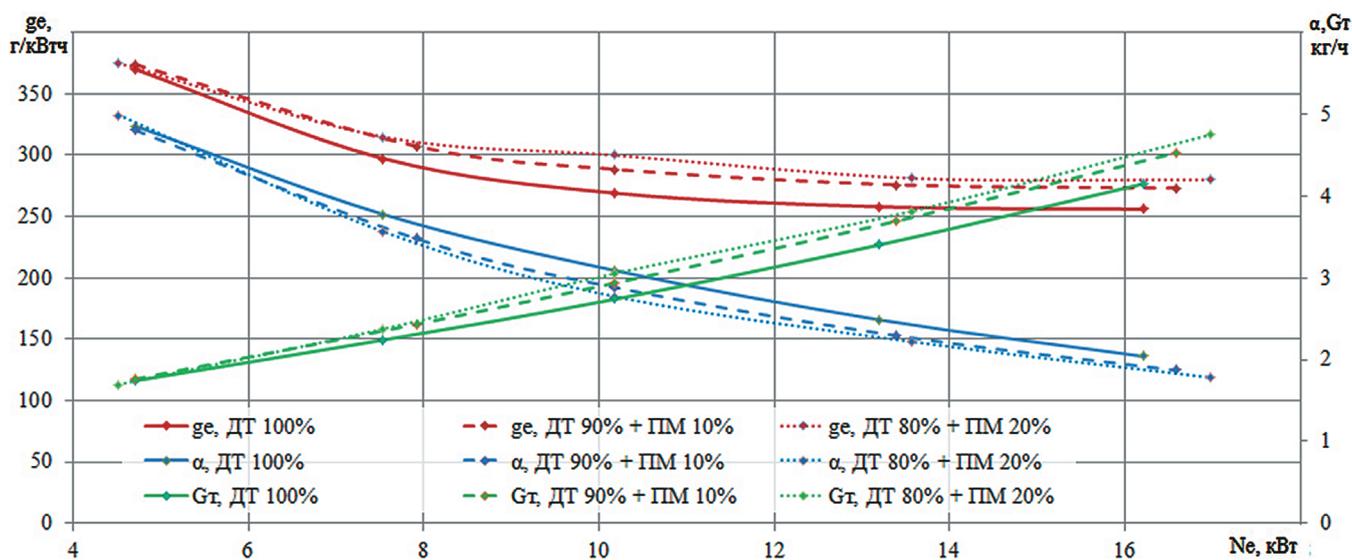


Рис. 6. Удельный эффективный расход топлива (ge), часовой расход топлива (Gt) и коэффициент избытка воздуха (α) при использовании чистого дизельного топлива и с добавкой пальмового масла (10 и 20%)

Fig. 6. Specific effective fuel consumption (ge), hourly fuel consumption (Gt) and excess air ratio (α) when using pure diesel fuel and a blend with palm oil addition (10 and 20%)

Выводы

1. Добавление арахисового масла в объеме 40% к топливу для тракторного дизеля Д-120 приводит к увеличению удельного эффективного расхода топлива на 8...10%, изменению характера сгорания и качества смесеобразования, увеличению концентрации продуктов неполного сгорания. Доля содержания углеводов увеличивается на 25...32%, монооксидов углерода – в 1,55 раза. Концентрация оксидов азота и сажи снижается на 10...25% в зависимости от режима.

2. Увеличение добавки пальмового масла в дизельное топливо с 10 до 20% привело к росту удельного расхода топлива на 6,2 и 8,6% соответственно. Добавка 20% пальмового масла привела к снижению содержания СН в отработавших газах на 42% на низких и средних, на 17% – на высоких нагрузках. Уровень СО возрос на 37...49% на низких и средних нагрузках, на высоких нагрузках показатель увеличился

в 6...8 раз и составил около 65 ppm. Концентрация NO_x снижается на 21% (до 4550 ppm) только при высоких нагрузках. Содержание сажи снижается по мере увеличения доли содержания пальмового масла в топливной смеси: на 20...30% при 10% ПМ, на 35...45% – при 20% ПМ.

3. Использование арахисового и пальмового масел в качестве добавки к топливу тракторных дизелей является аналогичным результатам исследований применения растительных масел на дизельных двигателях и не противоречит общепринятым научным концепциям. Принимая во внимание полученные данные и относительно низкую стоимость арахисового и пальмового масел в регионах их возделывания, а также растущий спрос на возобновляемые источники энергии, можно говорить о том, что в ближайшем будущем такая технология может стать актуальным вариантом для автотракторной техники.

Список источников

1. Бижаев А.В., Девянин С.Н. Снижение токсичности отработавших газов дизеля путем подачи топлива с водой в камеру сгорания // АвтоГАЗоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. 2019. Т. 18, № 12. С. 586-588. EDN: QIUPAC
2. Анфилатов А.А. Применение альтернативного топлива в автотракторном дизеле для снижения вредных веществ в отработавших газах // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. 2018. № 20. С. 493-497. EDN: YLBHTV
3. Чибанда Э.К., Славущий В.М., Курапин А.В. и др. Анализ возможностей использования пальмового масла как возобновляемого энергоресурса в качестве топлива для дизелей // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2016. № 5 (17). С. 51-56. EDN: WYRABZ
4. Патрахальцев Н.Н., Петруня И.А., Никишин И.А. Применение альтернативных топлив для регулирования рабочего процесса дизеля изменением физико-химических и моторных свойств топлива // Автогазозаправочный комплекс + Альтернативное топливо. 2013. № 2 (71). С. 8-13. EDN: RFYDWX
5. Чумаков В.Л., Бижаев А.В., Путан А.А. Снижение выбросов оксидов азота с отработавшими газами газодизеля // Чтения академика В.Н. Болтинского (115 лет со дня рождения): Сборник статей семинара. М.: ООО «Мегаполис», 2019. С. 118-122. EDN: ZCFNTR
6. Barsic N.J., Humke A.L. Performance and emissions characteristics of a naturally aspirated diesel engine with vegetable oil fuels. *SAE Technical Paper Series*. 1981;810262. <https://doi.org/10.4271/810262>
7. Бижаев А.В., Девянин С.Н., Соо С. и др. Использование арахисового масла в качестве присадки к дизельному топливу // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2018. Т. 12, № 6. С. 45-50. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-6-45-50>
8. Бижаев А.В., Симеон А.А. Применение пальмового масла в качестве присадки к топливу тракторных дизельных двигателей // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2017. № 6. С. 41-46. EDN: YLSVMV
9. Кириллов Н.Г., Лазарев А.Н. Анализ перспективности различных видов альтернативных моторных топлив: сжиженный природный газ – моторное топливо XXI века // Двигателестроение. 2010. № 1 (239). С. 26-33. EDN: MRMKIF
10. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Исследование токсичности дизелей на скоростных режимах, работающих на различных альтернативных топливах // Строительные и дорожные машины. 2019. № 5. С. 47-50. EDN: CWTDET
11. Sanjid A., Masjuki H.H., Kalam M.A. et al. Impact of palm, mustard, waste cooking oil and calophyllum inophyllum biofuels on performance and emission of CI engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;27:664-682. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.059>
12. Rashid M.M., Kalam M.A., Masjuki H. et al. Performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with palm, jatropha and moringa oil methyl ester. *Industrial Crops and Products*. 2016;79:70-76. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.10.046>
13. Mosarof M.H., Kalam M.A., Masjuki H.H. et al. Implementation of Palm biodiesel based on economic aspects, performance, emission, and wear characteristics. *Energy Conversion and Management*. 2015;105:617-629. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.020>
14. Ощепков П.П., Заев И.А., Смирнов С.В., Бижаев А.В. Исследование биодизельного топлива с добавками пальмового масла и перекиси водорода // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2019. Т. 13, № 3. С. 48-53. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2019-13-3-48-53>
15. Шумков А.П., Чиркова Ю.Н., Земский Д.Н. Присадки к дизельному топливу // Современные научные исследования и разработки. 2018. № 7 (24). С. 238-241. EDN: YOSKGT

References

1. Bizhaev A.V., Devyanin S.N. Diesel exhaust gas toxicity reduction by supplying fuel with water to the combustion chamber. *Autogas Filling Complex+Alternative Fuel*. 2019;18(12):586-588. (In Russ.)
2. Anfilatov A.A. Application of alternative fuel in auto-tractor diesel engine to reduce harmful substances in exhaust gases. *Aktualnye voprosy sovershenstvovaniya tekhnologii proizvodstva i pererabotki produktsii selskogo khozyaystva*. 2018;20:493-497. (In Russ.)
3. Tshibanda E.K., Slavutsky V.M., Kurapin A.V. et al. Analysis of the possibility of using palm oil as a renewable energy resource as a fuel for diesel engines. *Energy and Resource Saving: Industry and Transport*. 2016;5(17):51-56. (In Russ.)
4. Patrakhaltsev N.N., Petrunya I.A., Nikishin I.A. Application of alternative fuels for regulation of diesel working processes by variation of physical – chemical and motor qualities of fuel. *Autogas Filling Complex+Alternative Fuel*. 2013;2(71):8-13. (In Russ.)
5. Chumakov V.L., Bizhaev A.V., Putan A.A. Reducing emission of nitrogen oxides from gasodiesel exhaust gas. *Proceedings of "Chteniya akademika V.N. Boltinskogo (115 let so dnya rozhdeniya)"*. Moscow, Megapolis, 2019:118-122. (In Russ.)
6. Barsic N.J., Humke A.L. Performance and emissions characteristics of a naturally aspirated diesel engine with vegetable oil fuels. *SAE Technical Paper Series*. 1981;810262. <https://doi.org/10.4271/810262>
7. Bizhaev A.V., Devyanin S.N., Soo S., Fomin V.M., Ibrahim A., Khodyakov A.A. Using peanut oil as a fuel additive in tractor diesel engines. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018;12(6):45-50. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-6-45-50>
8. Bizhaev A.V., Simeon A.A. Palm oil use as additive to fuel for tractor diesels. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017;(6):41-46. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-6-41-46>
9. Kirillov N.G., Lazarev A.N. Alternative fuels: liquefied natural gas – motor fuel of xxi century. *Engines Construction*. 2010;1:26-33. (In Russ.)
10. Likhanov V.A., Lopatin O.P. Study on the toxicity of high-speed modes of diesel engines operating on different alternative fuels. *Stroitelnye i Dorozhnye Mashiny*. 2019;5:47-50. (In Russ.)
11. Sanjid A., Masjuki H.H., Kalam M.A. et al. Impact of palm, mustard, waste cooking oil and calophyllum inophyllum biofuels on performance and emission of CI engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;27:664-682. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.059>
12. Rashid M.M., Kalam M.A., Masjuki H. et al. Performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with palm, jatropha and moringa oil methyl ester. *Industrial Crops and Products*. 2016;79:70-76. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.10.046>
13. Mosarof M.H., Kalam M.A., Masjuki H.H. et al. Implementation of Palm biodiesel based on economic aspects, performance, emission, and wear characteristics. *Energy Conversion and Management*. 2015;105:617-629. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.020>
14. Oshchepkov P.P., Zaev I.A., Smirnov S.V., Bizhaev A.V. Study of biodiesel fuel with palm oil and hydrogen peroxide additives. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2019;13(3):48-53. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2019-13-3-48-53>
15. Shumkov A.P., Chirkova Yu.N., Zemskij D.N. Additives to diesel fuel. *Sovremennye Nauchnye Issledovaniya i Razrabotki*. 2018;7:238-241. (In Russ.)

Информация об авторах

- ¹ **Бижаев Антон Владиславович**, канд. техн. наук, доцент; a.bizhaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0807-1255>; SPIN-код: 9728-8666, AuthorID: 853239
- ² **Чумаков Валерий Леонидович**, канд. техн. наук, профессор; valery.chumakov@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-1442-4416>; SPIN-код: 8443-2880, AuthorID: 850305.
- ³ **Гайдар Сергей Михайлович**, д-р техн. наук, профессор; techmash@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>; SPIN-код: 6714-3698, AuthorID: 574130
- ⁴ **Пикина Анна Михайловна**, канд. техн. наук, доцент; pikina@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0237-0534>; SPIN-код: 3187-8973, AuthorID: 1093671
- ⁵ **Капустин Александр Васильевич**, канд. техн. наук, доцент; kav8kapustin@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0002-7119-8192>; SPIN-код: 4981-5158, AuthorID: 1118834
- ^{1,2,3,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49
- ⁵ Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого; 173003, Российская Федерация, Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 41

Вклад авторов

А.В. Бижаев – методология, проведение исследований, руководство исследованиями;
В.Л. Чумаков – верификация данных; создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
С.М. Гайдар – концептуализация, ресурсы;
А.М. Пикина – формальный анализ;
А.В. Капустин – обработка результатов, формальный анализ, визуализация

Конфликт интересов

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

Статья поступила в редакцию 01.10.2024; поступила после рецензирования и доработки 26.02.2025; принята к публикации 27.02.2025

Author Information

- Anton V. Bizhaev**¹, CSc (Eng), Associate Professor, a.bizhaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0807-1255>
- Valery L. Chumakov**², CSc (Eng), Professor, valery.chumakov@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-1442-4416>
- Sergey M. Gaydar**³, DSc (Eng), professor, techmash@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>
- Anna M. Pikina**⁴, CSc (Eng), Associate Professor, pikina@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0237-0534>
- Alexander V. Kapustin**⁵, CSc (Eng), Associate Professor, kav8kapustin@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7119-8192>
- ^{1,2,3,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russia, Moscow, Timiryazevskaya st., 49
- ⁵ Yaroslav the Wise Novgorod State University; 173003, Russia, Veliky Novgorod, Bolshaya Sankt-Peterburgskaya Str., 41

Author Contribution

A.V. Bizhaev – methodology, investigation, supervision;
V.L. Chumakov – data verification; writing – review and editing;
S.M. Gaidar – conceptualization, resources;
A.M. Pikina – formal analysis;
A.V. Kapustin – data curation, formal analysis, visualization

Conflict of interests

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

Received 01.10.2024; Revised 26.02.2025; Accepted 27.02.2025

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.45.038.72

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-63-69>

Исследование свойств продуктов взаимодействия этаноламина и борной кислоты в качестве летучих ингибиторов коррозии при защите черных и цветных металлов

С.М. Гайдар¹, Х.Д. Куанг², В.Е. Коноплев³, А.М. Пикина^{4✉}, А.Ю. Алипичев⁵^{1,3,4,5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия² Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и технологический центр; г. Хошимин, Вьетнам^{1,4} 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 quanghoang1510@gmail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782>³ konoplev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1835-1805>⁴ pikina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7116-3526>⁵ alipichev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>

Аннотация. Летучие ингибиторы коррозии, проникая в зазоры и адсорбируясь на поверхности, обеспечивают лучшую, чем другие виды ингибиторов, защиту металлических изделий. В частности, антикоррозионное действие аминоспиртов объясняется образованием комплексных соединений между азотом или кислородом и ионом металла. Борные эфиры образуют на поверхности металла труднорастворимые защитные пленки. Этанолламин с борной кислотой может образовывать различные продукты, но их свойства в качестве летучих ингибиторов коррозии пока не изучены. Целью исследований стали синтез продуктов взаимодействия этаноламина и борной кислоты и исследование антикоррозионных свойств полученных веществ на черных и цветных металлах. Для определения состава и условий получения ингибитора с высокими антикоррозионными свойствами авторы провели эксперименты, в которых варьировалось соотношение реагентов и температура реакции, в результате чего разработаны методики получения летучих ингибиторов коррозии. Синтезировали 4 продукта: аддукт этаноламина и борной кислоты, аминоэтилборат, ди(аминоэтил)борат и три(аминоэтил)борат. Антикоррозионные свойства ингибиторов изучали при ускоренных испытаниях. Оценку защитной способности определяли гравиметрическим методом, после чего рассчитали скорость коррозии, коэффициент торможения коррозии и степень защиты. Антикоррозионное действие летучих ингибиторов коррозии испытывали на образцах-пластинах из стали Ст3, меди М1 и сплавов Д16, Л63. В результате испытаний полученных ингибиторов наилучшие защитные свойства показал ди(аминоэтил)борат. Его максимальный защитный эффект (89,9%) наблюдали на стали, минимальный эффект (30,3%) – на меди. Полученные результаты позволят существенно увеличить степень защиты изделий из черных и цветных металлов от коррозии в процессе эксплуатации, транспортировки и хранения при сокращении затрат на их техническое обслуживание.

Ключевые слова: летучие ингибиторы коррозии, этаноламин, борная кислота, аминоэтилборат, ди(аминоэтил)борат, три(аминоэтил)борат, антикоррозионные свойства ингибиторов, скорость коррозии, коэффициент торможения коррозии, степень защиты

Для цитирования: Гайдар С.М., Куанг Х.Д., Коноплев В.Е., Пикина А.М., Алипичев А.Ю. Исследование свойств продуктов взаимодействия этаноламина и борной кислоты в качестве летучих ингибиторов коррозии при защите черных и цветных металлов // *Агроинженерия*. 2025. Т. 27, № 2. С. 63-69. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-63-69>

ORIGINAL ARTICLE

Study of the properties of ethanolamine and boric acid interaction products as volatile corrosion inhibitors used to protect ferrous and non-ferrous metals

S.M. Gaidar¹, H.D. Kuang², V.E. Konoplev³, A.M. Pikina^{4✉}, A.Yu. Alipichev⁵

^{1,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

² Russian-Vietnamese Tropical Research and Technological Center; Ho Chi Minh City, Vietnam

^{1,4} Kosygin Russian State University (Technology. Design. Art); Moscow, Russia

¹ techmash@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>

² quanghoang1510@gmail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782>

³ konoplev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1835-1805>

⁴ pikina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7116-3526>

⁵ alipichev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>

Abstract. Volatile corrosion inhibitors, penetrating into gaps and adsorbing on the surface, provide better protection of metal products than other types of inhibitors. In particular, the anticorrosive effect of amino alcohols is due to the formation of complex compounds between nitrogen or oxygen and the metal ion. Boron esters form hard-to-solubilize protective films on the metal surface. Ethanolamine with boric acid can form various products, but there have not been any comprehensive studies on their properties as volatile corrosion inhibitors. The aim of this study was to synthesize products of interaction between ethanolamine and boric acid and to analyze anticorrosion properties of the obtained substances on ferrous and non-ferrous metals. To determine the composition and conditions for obtaining an inhibitor with high anticorrosion properties, the authors conducted experiments with a variable ratio of reagents and reaction temperature. As a result, they developed methods for obtaining volatile corrosion inhibitors. Four products were synthesized: ethanolamine and boric acid adduct, aminoethylborate, di(aminoethyl)borate and tri(aminoethyl)borate. The anticorrosion properties of the inhibitors were checked in accelerated tests. The evaluation of the protective ability was determined by gravimetric method, after which the corrosion rate, corrosion inhibition coefficient and degree of protection were calculated. Anticorrosive effect of volatile corrosion inhibitors was tested on specimen plates made of steel St3, copper M1 and alloys D16, L63. As a result of tests of the obtained inhibitors, di(aminoethyl)borate showed the best protective properties. Its maximum protective effect of 89.9% was observed on steel, the minimum one of 30.3% – on copper. The obtained results will significantly increase the degree of protection of ferrous and non-ferrous metal products from corrosion during operation, transportation and storage while reducing the cost of their maintenance.

Keywords: volatile corrosion inhibitors, ethanolamine, boric acid, aminoethylborate, di(aminoethyl)borate, tri(aminoethyl)borate, anticorrosion properties of inhibitors, corrosion rate, corrosion inhibition coefficient, degree of protection

For citation: Gaidar S.M., Kuang H.D., Konoplev V.E., Pikina A.M., Alipichev A.Yu. Study of the properties of ethanolamine and boric acid interaction products as volatile corrosion inhibitors used to protect ferrous and non-ferrous metals. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(2):63-69 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-63-69>

Введение

Металлические изделия под действием различных природных, физико-химических и биологических факторов корродируют и теряют свои функциональные свойства. Выбор оптимального способа защиты металлов в зависимости от области применения изделия позволяет значительно снизить материальный ущерб, вызванный коррозией [1, 2]. Одним из наиболее распространенных методов защиты металлов от коррозии, значительно замедляющим коррозионные процессы при небольших затратах, является использование ингибиторов [3-7]. Многочисленные исследования в области защиты металлов от коррозии связаны с поиском новых и изучением уже существующих ингибирующих составов.

Наиболее перспективными и эффективными в изолированном пространстве считаются летучие ингибиторы коррозии (ЛИК). Молекулы газообразного ЛИК, проникая в зазоры, недоступные другим видам ингибиторов, адсорбируются на поверхности металла и образуют защитную пленку, замедляющую коррозионные процессы.

В качестве летучих ингибиторов коррозии металлов используются органические соединения различных классов: азотсодержащие (амины, азолы, нитросоединения), кислородсодержащие (спирты, сложные эфиры органических и неорганических кислот) и др. [8].

Высокую антикоррозионную активность по отношению к черным и цветным металлам показали

Контрольные образцы в эксикатор с ингибитором не помещали.

Антикоррозионные свойства ингибиторов определяли при ускоренных испытаниях. Эксперимент проводили при относительной влажности $98 \pm 2\%$, поддерживаемой введением 10%-ного раствора глицерина в соотношении к объему эксикатора 1/100. Антикоррозионные испытания включали в себя 15 последовательных циклов, каждый из которых длился 24 ч. В течение первых 10 ч каждого цикла эксикатор нагревали в течение 3 ч от комнатной температуры (25 ± 2) °С до (40 ± 2) °С и выдерживали при этой температуре в течение 7 ч. Затем эксикатор охлаждали до комнатной температуры в течение 3 ч и выдерживали при этой температуре в течение следующих 11 ч, чтобы влага из резервуара конденсировалась на испытуемом образце (рис. 2в). По окончании 15 циклов образец вынимали из эксикатора, промывали этанолом, ацетоном и сушили.

Защитную способность определяли гравиметрическим методом согласно ГОСТ Р 9.907-2007¹, после чего рассчитали скорость коррозии, степень защиты и коэффициент торможения коррозии.

Скорость коррозии образцов-пластинок площадью поверхности $[(50,0 \times 50,0) \pm 0,2]$ мм² и толщиной 3,0...5,5 мм рассчитывали по формуле:

$$K = \Delta m / (S \cdot t),$$

где Δm – потеря массы, г; S – площадь поверхности образца, м²; t – время испытаний, сут.

Степень защиты определяли по формуле:

$$Z = (K_1 - K_i) \cdot 100 / K_1,$$



а



б



в

Рис. 2. Исследование антикоррозионных свойств:

а – размещение образцов; б – адсорбция ингибитора на образцах; в – антикоррозионные испытания

Fig. 2. Study of anticorrosion properties:

а – placement of samples; б – adsorption of inhibitor on samples; в – anticorrosion tests

¹ ГОСТ Р 9.907-2007. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, покрытия металлические. Методы удаления продуктов коррозии после коррозионных испытаний: введ. 1 января 2009 г.

Результаты испытаний летучих ингибиторов коррозии на черных и цветных металлах

Test results of volatile corrosion inhibitors on ferrous and non-ferrous metals

№ серии Series no.	Металл, сплав Metal, alloy	Ингибитор Inhibitor	Скорость коррозии, K, г/м ² ·сут. Corrosion rate K, g/m ² ·day	Защитный эффект, Z, % Protective effect Z, %	Коэффициент торможения коррозии, γ Corrosion inhibition coefficient, γ
1	Сталь Ст3	Аддукт этаноламина и борной кислоты	10,23	52,2	2,09
		Аминоэтилборат	4,37	79,6	4,90
		Ди(аминоэтил)борат	2,16	89,9	9,91
		Три(аминоэтил)борат	9,58	55,3	2,23
		Этаноламин	14,61	31,8	1,47
		Без ингибитора (контрольный образец)	21,41	–	–
2	Алюминий Д16	Аддукт этаноламина и борной кислоты	163,40	44,4	1,80
		Аминоэтилборат	113,20	61,5	2,60
		Ди(аминоэтил)борат	62,40	78,8	4,71
		Три(аминоэтил)борат	78,20	73,4	3,76
		Этаноламин	102,10	65,3	2,88
		Без ингибитора (контрольный образец)	294,10	–	–
3	Медь М1	Аддукт этаноламина и борной кислоты	6,56	11,0	1,12
		Аминоэтилборат	6,01	18,5	1,23
		Ди(аминоэтил)борат	5,14	30,3	1,43
		Три(аминоэтил)борат	6,42	12,9	1,15
		Этаноламин	6,93	6,0	1,06
		Без ингибитора (контрольный образец)	7,37	–	–
4	Латунь Л63	Аддукт этаноламина и борной кислоты	14,29	17,4	1,21
		Аминоэтилборат	9,34	46,0	1,85
		Ди(аминоэтил)борат	8,33	51,9	2,08
		Три(аминоэтил)борат	11,73	32,2	1,48
		Этаноламин	15,38	11,1	1,13
		Без ингибитора (контрольный образец)	17,31	–	–

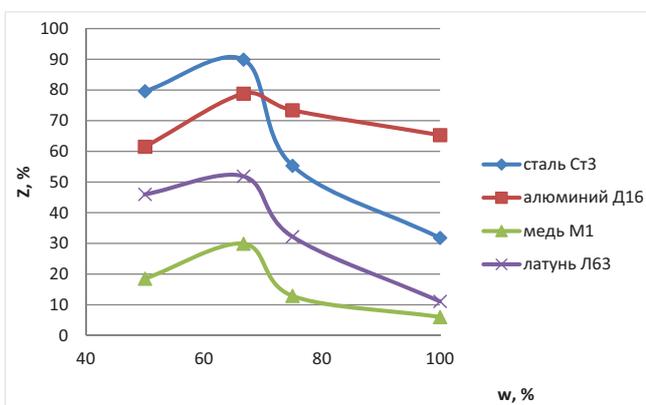


Рис. 3. Зависимость защитного эффекта летучего ингибитора коррозии Z, %, от мольной доли этаноламина w, %

Fig. 3. Relationship between the protective effect of volatile corrosion inhibitor Z (%) and the mole fraction of ethanolamine w (%)

способных образовать хелатный комплекс с ионом металла. Это позволяет молекулам ди(аминоэтанол)бората более прочно удерживаться на поверхности образца в отличие от других ингибиторов с менее устойчивыми комплексами. Молекулы три(аминоэтанол)бората имеют 3 аминогруппы, однако данный ингибитор не проявляет самых лучших антикоррозионных свойств, что обусловлено геометрией молекулы. Атом бора в своих соединениях проявляет sp^2 -гибридизацию, что соответствует геометрии плоского треугольника. Углы между связями В-О составляют 120° , и это стерически затрудняет участие в комплексообразовании третьей аминогруппы. Кроме того, появление в борате третьего радикала увеличивает массу молекулы и уменьшает ее летучесть, что может приводить к недостаточному насыщению поверхности металла молекулами ингибитора.

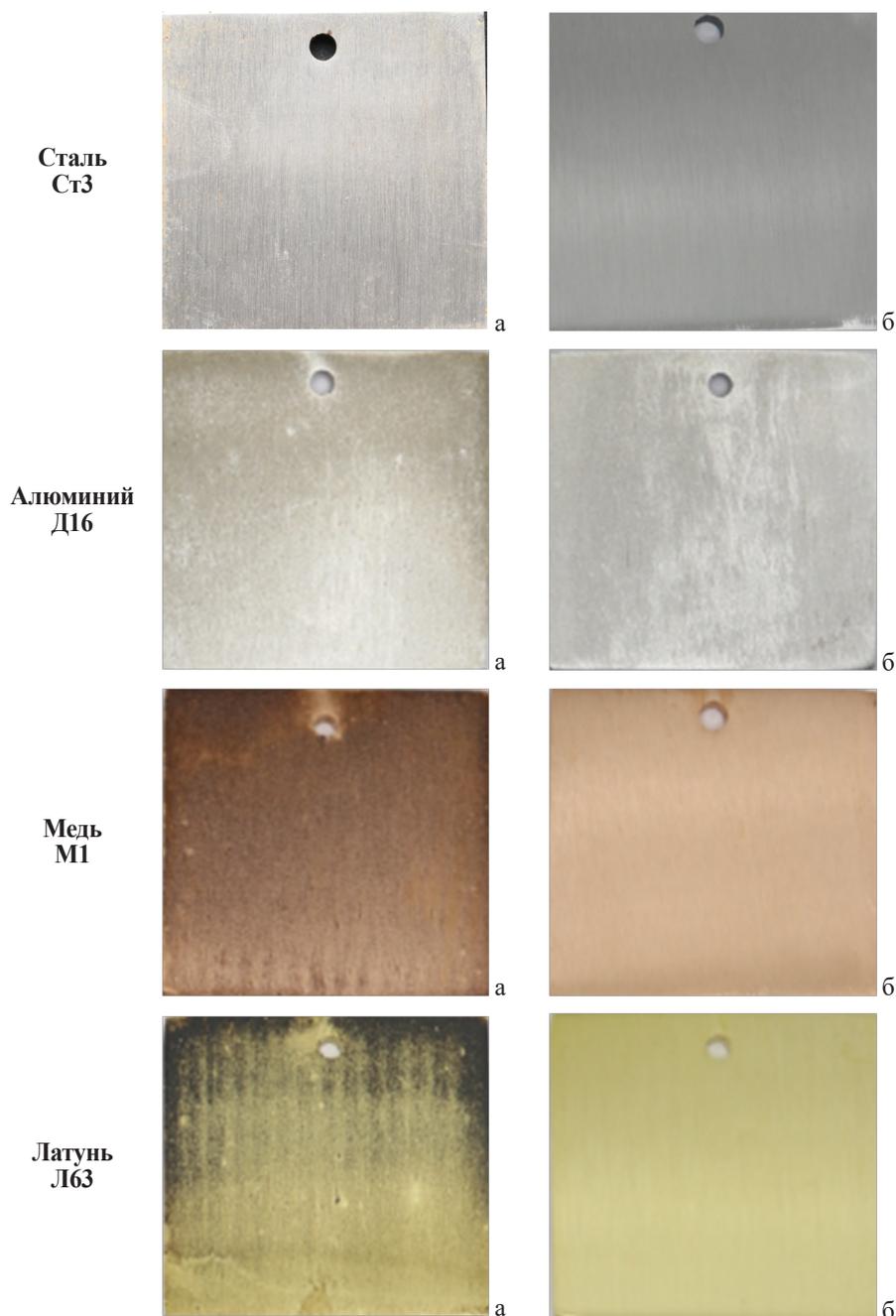


Рис. 4. Образцы после проведения коррозионных испытаний:
контрольные (а) и в присутствии ЛИК ди(аминоэтил)бората (б)

Fig. 4. Samples after corrosion tests:
control (a) and when using a volatile corrosion inhibitor – di(aminoethyl)borate (b)

Выводы

1. Полученные в результате синтеза этаноламина и борной кислоты летучие ингибиторы коррозии (аддукт, аминоэтилборат, ди(аминоэтил)борат и три(аминоэтил)борат) и этаноламин оказывают различный защитный эффект для черных и цветных металлов.

2. Ди(аминоэтил)борат по сравнению с другими ЛИК показал наивысшую степень защиты: по отношению к стали Ст3 его защитный эффект составил 89,9%, по отношению к алюминию – 78,8%, к латуни – 51,9%, к меди – 30,3%.

Список источников / References

1. Guo Y., Rogov A., Hird A. et al. Plasma electrolytic oxidation of magnesium by sawtooth pulse current. *Surface and Coatings Technology*. 2022;429:127938. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127938>

2. Jiang L., Dong Y., Yuan Y. et al. Recent advances of metal-organic frameworks in corrosion protection: From synthesis to applications. *Chemical Engineering Journal*. 2022;430:132823. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132823>

3. Al-Amiery A.A., Rubaye A.Y.I., Kadhum A.A.H., Al-Azzawi W.K. Thiosemicarbazide and its derivatives as promising corrosion inhibitors: a mini-review. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2023;12(2):597-620. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-2-12>

4. Talat N.T., Dahadha A.A., Abunuwar M. et al. Polyethylene glycol and polyvinylpyrrolidone: potential green corrosion inhibitors for copper in H₂SO₄ solutions. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2023;12(1):215-243. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-1-13>

5. Osipenko M.A., Kasach A.A., Adamiec J. et al. Corrosion inhibition of magnesium alloy AZ31 in chloride-containing solutions by aqueous permanganate. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2023;27:1847-1860. <https://doi.org/10.1007/s10008-023-05472-3>

6. Abdulhadi S., Mohammed A., Al-Azzawi W.K. et al. The corrosion inhibition abilities of PVA and PVP against the corrosion of mild steel in hydrochloric acid. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2023.12(2):645-663. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-2-14>

7. Gao H., Li Q., Dai Y. et al. High efficiency corrosion inhibitor 8-hydroxyquinoline and its synergistic effect with sodium dodecylbenzenesulphonate on AZ91D magnesium alloy. *Corrosion Science*. 2010.52(5):1603-1609. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.01.033>

8. Кузнецов Ю.И., Андреев Н.Н., Маршаков А.И. Физико-химические аспекты ингибирования коррозии металлов // Журнал физической химии. 2020. Т. 94, № 3. С. 381-392. <https://doi.org/10.31857/S0044453720030152>

Kuznetsov Y.I., Andreev N.N., Marshakov A.I. Physicochemical aspects of metal corrosion inhibition. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2020;94;3:505-515. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0044453720030152>

9. Левашова В.И., Янгирова И.В., Казакова Е.В. Обзор ингибиторов коррозии на основе борорганических соединений // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 21. <https://science-education.ru/ru/article/view?id=15408>

Levashova V.I., Yangirova I.V., Kazakova E.V. Review of corrosion inhibitor on the based of organoboron compounds. *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya*. 2014;6:21. (In Russ.) <https://science-education.ru/ru/article/view?id=15408>

10. Гайдар С.М., Коноплев В.Е., Петровский Д.И. и др. Исследование синергетического эффекта контактных ингибиторов анодного и катодного действия при защите стали от коррозии // Коррозия: материалы, защита. 2021. № 12. С. 10-14. EDN: NCBAXN

Gaidar S.M., Konoplev V.E., Petrovsky D.I. Investigation of synergistic effect of contact inhibitors of anodic and cathodic action in protection of steel against corrosion. *Korroziya: Materialy, Zashchita*. 2021;12:10-14. (In Russ.) EDN: NCBAXN

Информация об авторах

¹ Гайдар Сергей Михайлович, д-р техн. наук, профессор; techmash@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>; ScopusAuthorID: 57191589797; ResearcherID: I-4723-2018

² Хоанг Дык Куанг, канд. хим. наук; quanghoang1510@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782>, Scopus ID: 57201699580

³ Коноплев Виталий Евгеньевич, канд. хим. наук, доцент; konoplev@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1835-1805>

⁴ Пикина Анна Михайловна, канд. техн. наук, доцент; pikina@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7116-3526>

⁵ Алипичев Алексей Юрьевич, канд. пед. наук, доцент; alipichev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>

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

² Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и технологический центр; 727010, Вьетнам, г. Хошимин, район 10, ул. 3/2³

^{1,4} 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; Д.К. Хоанг – проведение эксперимента, обработка результатов исследований;

Коноплев В.Е. – научное руководство, формулирование основных направлений исследований, формулирование общих выводов;

А.М. Пикина – литературный анализ, обработка результатов исследований, подготовка рукописи;

Алипичев А.Ю. – англоязычный перевод.

Статья поступила 31.10.2024, после рецензирования и доработки 04.03.2025; принята к публикации 07.03.2025

Author Information

Sergey M. Gaidar¹, DSc (Eng), Professor; techmash@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>; ScopusAuthorID: 57191589797; ResearcherID: I-4723-2018

Hoang Duc Quang², PhD (Chem); quanghoang1510@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782>, Scopus ID: 57201699580

Vitaly E. Konoplev³, CSc (Chem), Associate Professor; konoplev@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1835-1805>

Anna M. Pikina⁴, CSc (Eng), Associate Professor; pikina@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7116-3526>

Aleksey Yu. Alipichev⁵, CSc (Ed), Associate Professor; alipichev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>

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

² Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Center; 727010, Vietnam, Ho Chi Minh City, District 10^{3/2} St., 3

^{1,4} Kosygin Russian State University (Technology. Design. Art); 1, Malaya Kaluzhskaya Str., Moscow, 119071, Russia

Author Contribution

S.M. Gaidar – research supervision, conceptualization, conclusions; D.K. Hoang – investigation, formal analysis, validation; V.E. Konoplev – research supervision, conceptualization, conclusions;

A.M. Pikina – literature review, data curation, formal analysis, writing – original draft;

A.Yu. Alipichev – writing – English translation and editing.

Received 31.10.2024; Revised 04.03.2025; Accepted 07.03.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 62-229.42

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-70-76>

Исследование параметров рассеяния натягов в соединении выходного конца вала КПП ЯМЗ с манжетой

О.А. Леонов¹, Н.Ж. Шкаруба², Ю.Г. Вергазова³, Л.А. Гринченко⁴^{1,2,3,4} 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 vergazova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7564-7656>⁴ grinchenko@rgau-msha.ru

Аннотация. Долговечность работы соединения «Вал-уплотнение» сельскохозяйственной техники влияет на ресурс работы агрегата. Анализ факторов, влияющих на долговечность работы соединения «Вал-уплотнение», выявил необходимость исследования качества формирования первоначального диапазона натягов в соединении «Вал-уплотнение» и их соответствия параметрам размерной взаимозаменяемости, заложенным в конструкторской документации на этапе проектирования агрегата. Цель исследований – оценка вероятностных характеристик рассеяния соединений внутреннего диаметра манжеты и наружного диаметра фланца КПП ЯМЗ-239. Исследовались 100 фланцев и 100 манжет 1.2-100×125-12. Измерение диаметров концов валов проводилось с помощью скобы рычажной СРП 100-0,001. Внутренний диаметр манжет определялся на приборе ДИП-6 с системой НИИК-890. Оценка параметров рассеяния размеров поверхности выходного вала КПП ЯМЗ-239 под манжету 100/10 показала, что при изготовлении вала обеспечивается точность технологического процесса выше требуемой с удовлетворительной настроенностью, имеется сдвиг в сторону исправимого брака. Исследование внутреннего диаметра манжет показало, что точность процесса формирования внутреннего диаметра манжет хорошая, настроенность процесса удовлетворительная, имеется небольшой сдвиг в сторону неисправимого брака, но сам брак отсутствует. Проведенный анализ рассеяния натягов показал, что вероятный процент бракованных соединений, как характеристики долговечности, составил 0,01%. В результате исследований установлено, что точность изготовления деталей, образующих соединение «Фланец-манжета», отвечает заданным требованиям, а возникающие проблемы с утечками смазочного материала из уплотнений следует искать, исходя из параметров износостойкости указанных деталей, а также из анализа износа влияющих размеров, образующих размерную цепь, где в качестве исходного замыкающего звена будут выступать отклонение от соосности и радиальное биение вала по отношению к диаметру манжеты.

Ключевые слова: вал, уплотнение, натяг, точность, брак, рассеяние натягов, манжета, фланец

Для цитирования: Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Гринченко Л.А. Исследование параметров рассеяния натягов в соединении выходного конца вала КПП ЯМЗ с манжетой // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 2. С. 70-76. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-70-76>

ORIGINAL ARTICLE

Study of interference dispersion parameters in the joint of the YAMZ gearbox shaft output end and a seal

O.A. Leonov¹, N.Zh. Shkaruba², Yu.G. Vergazova³, L.A. Grinchenko⁴^{1,2,3,4} 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 vergazova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7564-7656>⁴ grinchenko@rgau-msha.ru

Abstract. Durable operation of the “shaft-seal” joint in agricultural machines affects their service life. The analysis of factors affecting the durability of the “shaft-seal” joint has revealed the need to study the quality of the initial tension range in the “shaft-seal” joint and their compliance with the parameters of dimensional

interchangeability, preset in the design documentation. The research purpose is to evaluate the probabilistic characteristics of the dispersion of joints of the inner diameter of the seal and the outer diameter of the flange of the transmission gearbox YAMZ-239. The study involved 100 flanges and 100 seals 1.2-100×125-12. The diameters of shaft ends were measured using a lever bracket SRP 100-0,001. The inner diameter of the seals was determined with a DIP-6 instrument and the NIK-890 system. The conducted estimation of the dispersion parameters of the surface dimensions of the gearbox output shaft of YAMZ-239 under the 100h10 seal showed that shaft manufacturing provides a technological accuracy above the required level with satisfactory adjustment. However, there is a growing probability of a correctable defect. The study of the inner diameter of the seals showed that the accuracy of forming the inner diameter of the seals is good, the process adjustment is satisfactory; there is a slight shift towards a probability of an uncorrectable defect, but the defect itself is absent. The conducted analysis of tension dispersion showed that the probable percentage of defective joints, as a durability indicator, was 0.01%. The study found that the accuracy of manufacturing the “flange-seal” joint parts meets the specified requirements. The problems with the lubricant leakage from the seals should be solved based on the parameters of wear resistance of these parts, as well the wear analysis of the influencing dimensions that form a dimensional chain. In this chain, the initial closing link is the deviation from alignment and radial runout of the shaft in relation to the seal diameter.

Keywords: shaft, seal assembly, interference fits, accuracy, defects, size dispersion, seal, flange

For citation: Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Grinchenko LA. Study of interference dispersion parameters in the joint of the YAMZ gearbox shaft output end and a seal. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(2):70-76 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-70-76>

Введение

Долговечность работы соединения «Вал-уплотнение» сельскохозяйственной техники влияет на ресурс работы агрегата, в котором оно установлено [1, 2], и зависит от различных факторов жизненного цикла агрегата.

При проектировании соединения «Вал-уплотнение» должны быть учтены факторы, обеспечивающие его надежность [3-5]: физические и химические свойства материалов вала и уплотнения; особенности поверхностного слоя вала, находящегося в контакте с уплотнением; конструктивные и геометрические параметры вала и уплотнения; параметры нагружения в виде давления уплотнения на вал и давления уплотняемой жидкости; параметры размерной взаимозаменяемости (отклонения формы и расположения поверхностей в виде отклонения от соосности и радиальное биение вала относительно манжеты, которые должны компенсироваться натягом в соединении).

На стадии изготовления соединения «Вал-уплотнение» долговечность определяется точностью обработки поверхности вала под манжету и точностью технологического процесса изготовления манжет. На этом этапе возможно формирование заданной и повышенной долговечности манжеты путем внесения модификаторов в ее материал [6]. Долговечность вала можно повысить путем нанесения специальных износостойких покрытий [7, 8].

На стадии эксплуатации долговечность соединения «Вал-уплотнение» зависит от качества

и состава применяемых смазочных материалов, режимов эксплуатации и запыленности внешней и внутренней среды.

Исследования, проведенные инженерами Ярославского моторного завода, выявили, что в процессе эксплуатации силовых агрегатов ЯМЗ (двигатель в сборе с КПП) при наработке свыше 8000-10000 тыс. ч на поверхности вала под рабочей кромкой манжет появляется износ на глубину до 0,2 мм, приводящий к утечкам смазочного материала. Замена старой манжеты на новую в такой ситуации течь масла не устраняет [9]. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости исследования формирования первоначального диапазона натягов в соединении «Вал-уплотнение» и их соответствия параметрам размерной взаимозаменяемости, заложенным в конструкторской документации на этапе проектирования агрегата. При выполнении требований проводится анализ отклонений от соосности и радиального биения вала относительно манжеты. Необходимо исследовать и новые, и изношенные соединения путем составления размерных цепей, формирующих данные отклонения.

Цель исследований: оценка вероятностных характеристик рассеяния соединений внутреннего диаметра манжеты и наружного диаметра фланца КПП ЯМЗ-239.

Материалы и методы

При проведении исследований были использованы основы теории вероятности и математической статистики, а также элементы теории точности.

При обработке результатов (прямые измерения с многократными наблюдениями) использованы стандартные методики.

В качестве объекта исследований выбран фланец коробки передач ЯМЗ-239 (рис. 1). Предмет исследований – соединение «Вал-уплотнение». Были отобраны 100 фланцев и 100 манжет 1.2-100×125-12. Параметры точности фланцев и манжет представлены в таблице 1.

Выбор средств контроля диаметра уплотнения и вала осуществлялся по ГОСТ 8.051-81¹. Выбор номенклатуры средств измерений для отверстия манжеты и вала с учетом метрологических характеристик проводился из условия:

$$\pm\Delta_{lim} \leq \pm\delta, \tag{1}$$

где Δ_{lim} – предельная погрешность средства измерений; δ – допускаемая погрешность измерения.

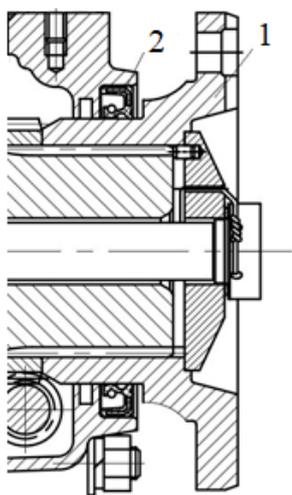


Рис. 1. Эскиз соединения фланца с манжетой коробки передач ЯМЗ: 1 – фланец; 2 – манжета

Fig. 1. Draft view of the flange joint with the seal of the YaMZ gearbox: 1 – flange; 2 – seal

Для наружного диаметра фланца (выходной вал коробки перемены передач) $d_n = \varnothing 100h10_{(-0,14)}$ имеем допуск $T = 140$ мкм и $d = \pm 30$ мкм.

Для измерения диаметров концов валов выбрано средство измерений максимально возможной точности – скоба рычажная СРП 100-0,001 с диапазоном показаний $\pm 0,07$ мм и погрешностью измерений $\pm 0,0014$ мм.

Для измерения внутреннего диаметра манжеты в исследованиях использовался двухкоординатный измерительный прибор ДИП-6 с оптико-электронной измерительной системой НИИК-890, дискретность отсчета 0,01 мм (рис. 2).

Результаты и их обсуждение

В процессе работы агрегата происходит изнашивание поверхности вала и манжеты и уменьшение натягов, что приводит к началу утечек и отказу соединения. Величины натягов, формируемые в соединении вала с манжетой, должны компенсировать отклонения формы и расположения поверхностей и гарантировать отсутствие утечек уплотняемой жидкости.



Рис. 2. Контроль внутреннего диаметра манжеты
Fig. 2. Checking the inner diameter of the seal

Параметры точности фланцев и манжет 1.2-100×125-12 выходного вала коробки передач ЯМЗ-239

Таблица 1

Accuracy parameters of flanges and seals 1.2-100×125-12 of the output shaft of the YaMZ-239 gearbox

Table 1

Объект измерения <i>Name of the measured part</i>	Номинальный размер с отклонениями, мм <i>Nominal size with deviations, mm</i>	Допуск, мм <i>Tolerance, mm</i>	Размер, предельно допустимый, без ремонта, мм <i>Maximum permissible size without repair, mm</i>
Фланец / Flange	100h10 _(-0,14)	0,14	99,7
Отверстие манжеты / Seal hole	100 ^{-2,0} _{-3,0}	1,0	*

* При ремонте все манжеты заменяются на новые.

¹ ГОСТ 8.051-81 (СТ СЭВ 303-76). Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров, до 500 мм. М.: Изд-во стандартов, 1986. 84 с.

Проведены измерения поверхности под манжету у новых фланцев и внутренних диаметров отверстий манжет. По результатам измерений были рассчитаны параметры распределения рассеяния диаметров посадочных поверхностей под манжету фланцев и внутренних диаметров отверстий манжет (табл. 2).

По данным, представленным в таблице 2, построим гистограммы и графики распределения рассеяния контролируемых параметров (рис. 3, 4).

Для оценки точности и настроенности технологического процесса обработки поверхности фланца

под манжету и внутреннего диаметра манжеты рассчитаем коэффициент точности технологического процесса

$$K_T = \frac{T}{6 \cdot \sigma} \tag{2}$$

и коэффициент настроенности технологического процесса

$$K_C = \frac{X_{cp} - \bar{X}}{2 \cdot T}, \tag{3}$$

где X_{cp} – середина поля допуска контролируемого параметра.

Таблица 2

Параметры распределения рассеяния диаметров посадочных поверхностей под манжету фланцев и внутренних диаметров отверстий манжет

Table 2

Parameters of the dispersion distribution of the diameters of the seating surfaces under the flange seal and the internal diameters of the seal holes

Параметры распределения рассеяния <i>Parameters of the dispersion distribution</i>	Усл. обозначение <i>Designation</i>	Манжеты <i>Seals</i>	Фланцы <i>Flanges</i>
Среднее арифметическое, мм / <i>Arithmetic mean, mm</i>	\bar{X}	97,578	99,956
Среднее квадратическое отклонение, мм / <i>Standard square deviation, mm</i>	σ	0,176	0,018
Зона рассеяния, мм / <i>Dispersion zone, mm</i>	ω^*	1,056	0,108

*Зона рассеяния определяется как квантиль, равный 6 (вероятность – 0,9973), умноженный на среднее квадратическое отклонение.



Рис. 3. Распределение внутренних диаметров манжет

Fig. 3. Distribution of internal diameters of seal

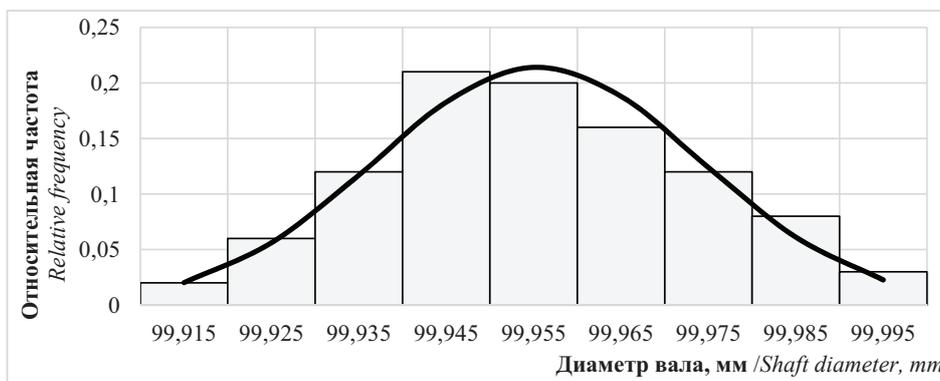


Рис. 4. Распределение поверхности фланца под манжету

Fig. 4. Distribution of the flange surface under the seal

Результаты расчетов коэффициентов точности и настроенности технологического процесса обработки поверхности фланцев под манжету и внутренних диаметров манжет, рассчитанные по формулам (2), (3), представлены в таблице 3.

Из данных таблицы 3 и рисунка 3 можно сделать вывод о том, что точность процесса формирования внутреннего диаметра манжет является хорошей, настроенность процесса – удовлетворительной; имеется небольшой сдвиг в сторону неисправимого брака.

Данные таблицы 3 и рисунка 4 свидетельствуют о том, что при изготовлении фланца обеспечивается точность технологического процесса выше требуемой с удовлетворительной настроенностью, имеется сдвиг в сторону исправимого брака, вероятность появления неисправимого брака равна нулю. Такие параметры распределения обуславливают необходимость обеспечения шероховатости поверхности вала под манжету $Ra = 0,32$ мкм, которую можно сформировать тонким шлифованием (это будет 6-й или 7-й квалитеты точности), алмазным обтачиванием продольной подачи (6-й квалитет

точности) и обычным полированием (6-й квалитет точности).

С использованием данных таблицы 2 выполнена оценка рассеяния вероятных натягов в соединении «Фланец-манжета». Результаты расчетов представлены в таблице 4.

Используя данные таблицы 4, построим схему рассеяния действительных натягов в посадке «Фланец-манжета» (рис. 5).

Анализ рассеяния натягов позволил сделать следующие выводы. Вероятный процент бракованных соединений по наименьшему натягу, как характеристики долговечности, составил 0,01%. Вероятный процент бракованных соединений по наибольшему натягу, который характеризует границу допустимого износа материала манжеты до пружины, составил 0,17%. Полученное значение свидетельствует о том, что качество изготовления манжет и фланцев находится на высоком уровне, качество обработки поверхности фланца под манжету обеспечивает запас по требуемой точности, а рассеяние размеров отверстий манжет показывает практически полное совпадение с требуемыми характеристиками.

Таблица 3
Параметры точности и настроенности технологического процесса обработки поверхности фланцев под манжету и внутренних диаметров манжет

Table 3
Parameters of accuracy and adjustment of technological processing the surface of flanges under the seal and the internal diameters of the seals

Коэффициент / Coefficient	Манжеты / Sealse	Фланцы / Flanges
Точности технологического процесса, K_T / Accuracy of the technological process, K_T	0,95	1,27
Настроенности технологического процесса, K_C / Tuning of the technological process, K_C	0,06	-0,09

Таблица 4
Вероятностные характеристики рассеяния натягов в соединении «Фланец-манжета»

Table 4
Probability characteristics of interference dispersion in the flange-to-seals joint

Характеристика рассеяния натягов / Characteristic of interference dispersion in the flange-to- seal joint	Значение / Value
Среднее квадратическое отклонение зазоров (натягов), мм / Standard deviation of gaps (interference), mm	0,177
Средний действительный натяг, мм / Average actual interference, mm	2,378
Коэффициент риска по наибольшему натягу / Risk coefficient for the greatest interference	2,92
Коэффициент риска по наименьшему натягу / Risk coefficient for the least interference	3,51
Предельный наибольший натяг, мм / Limiting greatest interference, mm	2,91
Предельный наименьший натяг, мм / Limiting least interference, mm	1,843
Вероятный процент бракованных соединений по наибольшему натягу, % Probable percentage of defective joints for the greatest interference, %	0,17
Вероятный процент бракованных соединений по наименьшему натягу, % Probable percentage of defective joints for the least interference, %	0,01
Суммарный вероятный процент брака, % / Total probable percentage of defect, %	0,18

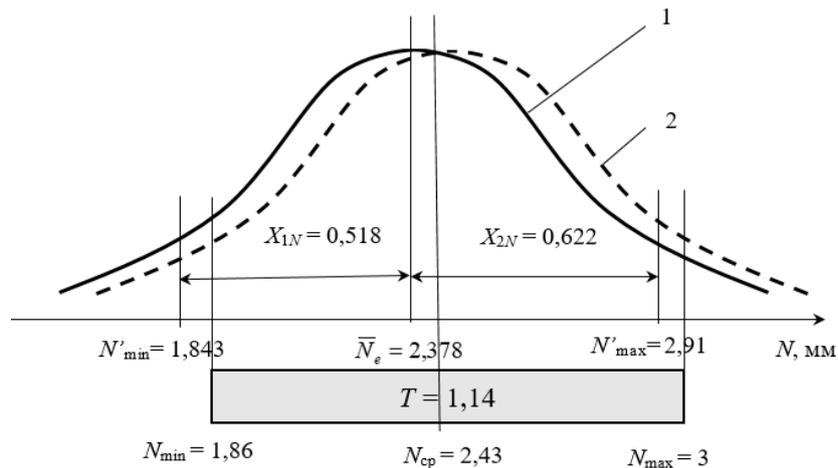


Рис. 5. Схема к расчету брака при сборке соединения «Манжета-вал»:

1 – реальное рассеяние натягов в посадке; 2 – идеальное рассеяние натягов в посадке

Fig. 5. Analytical model for calculating the defectiveness during assembling the “seal-to-shaft” joint:

1 – actual dispersion of the interference fit; 2 – ideal dispersion of the interference fit

Выводы

Точность изготовления деталей, образующих соединение «Фланец-манжета», отвечает заданным требованиям, а возникающие проблемы с утечками смазочного материала из уплотнений следует искать, исходя из параметров износостойкости

указанных деталей, а также из анализа износа влияющих размеров, образующих размерную цепь, где в качестве исходного замыкающего звена будут выступать отклонение от соосности и радиальное биение вала по отношению к диаметру манжеты.

Список источников

1. Мельников О.М., Казанцев С.П., Игнаткин И.Ю. и др. Совершенствование уплотнительных устройств подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24, № 3. С. 68-72. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-68-72>
2. Мельников О.М. Работоспособность соединений «вал-манжета» и повышение их надежности // *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина»*. 2018. № 2 (84). С. 50. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-50-54>
3. Журавлева С.Н., Денисов М.В. Исследование влияния конструктивной формы рабочей кромки манжетного уплотнения на обеспечение гарантированной герметизации // *Новые материалы и технологии в машиностроении*. 2023. № 37. С. 21-25. EDN: AQJAMW
4. Ерохин М.Н., Белов М.И., Мельников О.М. Методика расчета контактного давления манжеты на вал // *Вестник машиностроения*. 2020. № 11. С. 39-45. EDN: PLAAFT
5. Ерохин М.Н., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. и др. Применение размерного анализа для расчета суммарного отклонения от соосности манжеты относительно вала // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2021. № 6. С. 61-67. <https://doi.org/10.31857/S0235711921060067>
6. Мухаметшина А.И., Буторин И.В., Нурлыева Г.Д. и др. Влияние состава резины манжет на их работоспособность // *Автомобильная промышленность*. 2015. № 2. С. 34-36. EDN: TQTGHH
7. Пучков П.В., Зарубин В.П., Киселев В.В. и др. Повышение износостойкости валов дифференциалов за счет применения технологии алмазного выглаживания // *Современные*

References

1. Melnikov O.M., Kazantsev S.P., Ignatkin I.Yu., Skorohodov D.M., Belov M.I. Improving sealing elements of the bearing assembly of agricultural machinery. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(3):68-72. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-68-72>
2. Melnikov O.M. Operability of “shaft-cup” couplings and their reliability enhancement. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2018;2:50-54. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-50-54>
3. Zhuravleva S.N., Denisov M.V. Investigation of the influence of the constructive from the working edge of the lip seal on ensuring guaranteed sealing. *Novye Tekhnologii i Materialy v Mashinostroeni*. 2023;3:21-25. (In Russ.)
4. Erokhin M.N., Belov M.I., Melnikov O.M. Method of calculating the contact pressure of the cuff on the shaft. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2020;11:39-45.
5. Erokhin M.N., Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. et al. Application of dimensional analysis for calculating the total misalignment between a seal and a shaft. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2021;6:61-67. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0235711921060067>
6. Mukhametshina A.I., Butorin I.V., Nurlyeva G.D. et al. Study of rubber compounds on the performance of the cuff used in vehicle. *Avtomobilnaya Promyshlennost*. 2015;2:34-36. (In Russ.)
7. Puchkov P.V., Zarubin V.P., Kiselyov V.V. et al. Increasing the wear resistance of differential shafts through the application of diamond burning technology. *Sovremennye Naukoemkie Tekhnologii. Regionalnoe Prilozhenie*. 2022;4(72):55-61. (In Russ.)
8. Vodiakov V.N., Kuznetsov V.V., Berezin M.A., Borisov V.I. Increasing resource of active type sealing connections by modification of mounting places. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2009;8:33-37. (In Russ.)

наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2022. № 4 (72). С. 55-61. EDN: URSHOF

8. Водяков В.Н., Кузнецов В.В., Березин М.А., Борисов В.И. Повышение ресурса уплотнительных соединений активного типа модификацией посадочных мест // Тракторы и сельхозмашины. 2009. № 8. С. 33-37. EDN: NBOLKF

9. Антропов Б.С., Бодров В.А., Басалов И.С. Методы обеспечения работоспособности уплотнений коленчатого вала на автотракторных двигателях ЯМЗ // Вестник АПК Верхневолжья. 2014. № 4 (28). С. 80-81. EDN: TOKUDN

Информация об авторах

¹ **Леонов Олег Альбертович**, д-р техн. наук, профессор; oaleonov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>; Scopus Autor ID: 57209748174; Researcher ID: ABC-5873-2020; SPIN-код: 9399-5650, AuthorID: 367093

² **Шкаруба Нина Жоровна**, д-р техн. наук, профессор; shkaruba@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>; Scopus Autor ID: 57210255441; ResearcherID: AAF-6340-2019; SPIN-код: 4773-0700, AuthorID: 482487

³ **Вергазова Юлия Геннадьевна**, канд. техн. наук, доцент; vergazova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7564-7656>; Scopus Autor ID: 57210258726; Researcher ID: AAD-5899-2022; SPIN-код: 1867-1420, AuthorID: 780919

⁴ **Гринченко Лаврентий Александрович**, аспирант, ассистент; grinchenko@rgau-msha.ru; SPIN-код: 1654-9555, AuthorID: 1097244

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

Вклад авторов

О.А. Леонов – руководство исследованиями; формулирование основной концепции исследований и задач;

Н.Ж. Шкаруба – разработка методологии исследований, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование; Ю.Г. Вергазова – верификация данных; разработка программного обеспечения;

Л.А. Гринченко – подготовка начального варианта текста, визуализация данных, формирование выводов, представление, описание результатов и формирование выводов исследований

Конфликт интересов

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

Статья поступила в редакцию 12.12.2024; поступила после рецензирования и доработки 12.02.2025; принята к публикации 13.02.2025

9. Antropov B.S., Bodrov V.A., Basalov I.S. Methods for ensuring of working capacity of crankshaft oil seals of automobile and tractor engines by Yaroslavl motor plant (YAMZ). *Vestnik APK Verkhnevolzhya = Agroindustrial Complex of Upper Volga Region Herald*. 2014;4:80-81. (In Russ.)

Author Information

Oleg A. Leonov¹, DSc (Eng), Professor; oaleonov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>; Scopus Autor ID: 57209748174; Researcher ID: ABC-5873-2020

Nina Zh. Shkaruba², DSc (Eng), Professor; shkaruba@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>; Scopus Autor ID: 57210255441; ResearcherID: AAF-6340-2019

Yuliya G. Vergazova³, CSc (Eng), Associate Professor; vergazova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7564-7656>; Scopus Autor ID: 57210258726; Researcher ID: AAD-5899-2022

Lavrenty A. Grinchenko⁴, postgraduate student, Assistant Professor; grinchenko@rgau-msha.ru
^{1,2,3,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russia

Author Contribution

O.A. Leonov – research supervision; conceptualization; N.Zh. Shkaruba – research methodology, writing – finalizing (review and editing) of the manuscript;

Yu.G. Vergazova – data verification; software development;

L.A. Grinchenko – writing – original draft, visualization, results and discussion, conclusions.

Conflict of interests

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

Received 12.12.2024; Revised 12.02.2025; Accepted 13.02.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.793

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-77-83>**Выбор метода поверхностного упрочнения ремонтной тонкостенной втулки***А.В. Лапаев*^{1✉}, *О.М. Мельников*²¹Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»; г. Москва, Россия²Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ a9162968177@yandex.ru ✉² ommelnikov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3202-8799>

Аннотация. Одним из эффективных способов восстановления работоспособности соединения «Вал-манжета» является использование ремонтных тонкостенных втулок. Установка их на валы обеспечивает восстановление герметичности соединения без разборки агрегата в минимальные сроки и в полевых условиях. Коллектив авторов изготовил ремонтные тонкостенные втулки с толщиной стенки 0,25 мм. Исследования проведены с целью выбора способа упрочнения поверхности тонкостенной втулки до микротвердости выше 21000 МПа, превышающей микротвердость кварцевого абразива и оксида алюминия, входящих в основной состав пыли. Проанализировав методы поверхностного упрочнения, авторы сделали заключение о применимости для тонкостенных ремонтных втулок методов электролитического хромирования и физического осаждения покрытий (PVD). Поверхностное упрочнение тонкостенных втулок электролитическим хромированием (Хтв 21) провели при температуре 45...55°C, покрытие нитридом титана (TiN) получили методом PVD при температуре 200...450°C. Толщину покрытия измеряли электромагнитным толщиномером защитных покрытий Константа К5. Микротвердость полученной упрочненной поверхности определили на приборе ПМТ-3М. Шероховатость упрочненных рабочих поверхностей тонкостенных ремонтных втулок измеряли профилометром MarSurf M400. В результате поверхностного упрочнения тонкостенных втулок толщина хромового покрытия составила 21...30 мкм, а нитрида титана – 4,2...5,2 мкм. Установили, что при электролитическом хромировании микротвердость поверхности втулки достигала 11000...12000 МПа, а метод PVD обеспечил микротвердость 18900...21700 МПа. Профилограмма упрочненной рабочей поверхности втулки показала уменьшение шероховатости на один класс чистоты поверхности. Результаты исследований доказывают применимость выбранных методов упрочнения ремонтных тонкостенных втулок толщиной от 0,25 мм.

Ключевые слова: вал-манжета, уплотнения, ремонтная тонкостенная втулка, электролитическое хромирование, метод PVD, покрытие хрома, покрытие нитридом титана, микротвердость

Для цитирования: Лапаев А.В., Мельников О.М. Выбор метода поверхностного упрочнения ремонтной тонкостенной втулки // *Агроинженерия*. 2025. Т. 27, № 2. С. 77-83. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-77-83>

ORIGINAL ARTICLE

Selecting a method of surface hardening for thin-walled repair bushings*A.V. Lapaev*¹, *O.M. Melnikov*²¹ Moscow State Technological University “STANKIN”; Moscow, Russia² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ a9162968177@yandex.ru² melnikov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3202-8799>

Abstract. One of the effective ways to restore the serviceability of the “shaft-seal” joint is the use of thin-walled repair bushings. When installed on shafts, they restore the joint tightness without disassembling the unit in shortest time and field conditions. The team of authors have produced thin-walled repair bushings with a wall thickness of 0.25 mm. They have made research to choose a surface hardening method for thin-walled bushing to achieve a microhardness of above 21,000 MPa. This value exceeds that of quartz abrasive and aluminum oxide, which are the main components of dust. Having analyzed the methods of surface hardening, the authors approved the applicability of electrolytic chromium plating and physical vapor deposition of coatings (the PVD method) for thin-walled repair bushings. Thin-walled bushings were surface hardened by electrolytic chromium plating (Хтв

21 (Cr hard)) at a temperature of 45 to 55°C, titanium nitride (TiN) coating was obtained by the PVD method at a temperature of 200 to 450°C. The coating thickness was measured with a Konstanta K5 electromagnetic thickness gauge used for protective coatings. The microhardness of the hardened surface was determined with a PMT-3M device. The roughness of hardened working surfaces of thin-walled repair bushings was measured with a MarSurf M400 profilometer (a surface finish gauge). After surface hardening of thin-walled bushings, the thickness of chrome coating was 21 to 30 microns, and that of titanium nitride – 4.2 to 5.2 microns. Electrolytic chromium plating resulted in a microhardness of bushing surface of 11,000 to 12,000 MPa, while the PVD method provided a microhardness of 18,900 to 21,700 MPa. The profile diagram of the hardened working surface of a bushing showed that the roughness value decreased by one degree of fineness. The research results have proved the applicability of the chosen methods of hardening thin-walled repair bushings with a thickness from 0.25 mm.

Keywords: shaft-seal joint, seal assemblies, thin-walled repair bushing, electrolytic chromium plating, PVD method, chromium coating, titanium nitride coating, microhardness

For citation: Lapaev A.V., Melnikov O.M. Selecting a method of surface hardening for thin-walled repair bushings. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(2):77-83 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-77-83>

Введение

Обеспечение качества изготовления и ремонта машин и агрегатов для сельского хозяйства является сложной инженерной задачей [1, 2]. В сельскохозяйственном производстве машинно-тракторные агрегаты часто работают в условиях повышенной запыленности.

При эксплуатации сельскохозяйственная техника подвержена воздействию твердых абразивных частиц. В своих исследованиях С.П. Казанцев утверждает: «Механическое разрушение поверхностей деталей машинно-тракторных агрегатов происходит в результате микрорезания и царапания их абразивными частицами. Абразивное изнашивание является наиболее распространенным и быстро протекающим видом изнашивания деталей сельскохозяйственной техники вследствие высокой степени концентрации контактных напряжений на локальных участках рабочих поверхностей деталей»¹.

Износ деталей в соединении «Вал-манжета» ведет к потере герметичности, что является одной из самых распространенных причин выхода агрегатов техники из строя [3, 4]. В энергонагруженных тракторах до 30% отказов происходит по причине утечек в уплотнениях и потери масел и жидкостей в гидросистемах, для гидроагрегатов количество отказов составляет более 40% [5]. Дефектация деталей агрегатов сельскохозяйственной техники при капитальном ремонте показывает, что более 70% валов требуют восстановления рабочих поверхностей в зоне контакта с уплотнениями [6] и все уплотнительные

устройства требуют замены. Нарушение работоспособности уплотнений является основной причиной аварийных разрушений подшипниковых узлов.

Одним из эффективных способов восстановления работоспособности соединения «Вал-манжета» без разборки агрегата является использование ремонтных тонкостенных втулок [7, 8]. Также втулки можно устанавливать на валы при сборке нового агрегата с целью обеспечения необходимых характеристик ответной с манжетой поверхности, отличной от характеристик материала, из которого изготовлен вал.

Преимущества ремонтных тонкостенных втулок:

- восстановление оптимального натяга в соединении «Вал-манжета» при изношенной манжете и выработке на валу;
- продление жизненного цикла уплотнительного узла;
- совместимость втулки с оригинальным уплотнением;
- отсутствие необходимости шлифования, металлизации или других видов обработки вала;
- снижение трудозатрат на ремонт техники, так как восстановление работоспособности уплотнительных устройств валов происходит без разборки агрегатов;
- возможность устранения неисправности в полевых условиях.

Цель исследований: выбор способа упрочнения поверхностного слоя ремонтной тонкостенной втулки для повышения работоспособности уплотнительного соединения подшипниковых узлов сельскохозяйственных машин.

Материалы и методы

Выбор оптимального способа упрочнения поверхности тонкостенных втулок осуществляли на основании теоретических исследований способов

¹ Казанцев С.П. Разработка комбинированной технологии получения железоборидных покрытий при восстановлении и упрочнении деталей сельскохозяйственной техники: Дис. ... д-ра техн. наук. М.: Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина, 2006. 301 с. EDN: NOANMR.

упрочнения деталей. Разработанным авторами способом удалось изготовить тонкостенные втулки² из низколегированной и высоколегированной коррозионно-стойких сталей 40X и 12X18H10T (рис. 1).

Для вала диаметром $D = 45h10$ ($45_{-0,1}$ мм) изготовили втулки толщиной 0,25 мм. Эта минимальная толщина ремонтной втулки обусловлена сложностью изготовления детали. При изготовлении втулок применили способ высокоскоростной токарной обработки.

Для манжет с внутренним диаметром $D_0 = 45_{-4,58}^{-2,75}$ мм и валом с диаметром $D = 45h10$ ($45_{-0,1}$ мм) на основании расчетов [9] определили оптимальные размеры толщины тонкостенной втулки $S_B = 0,25 \dots 0,8$ мм.

Поверхностное упрочнение образцов ремонтных тонкостенных втулок проводили методами электролитического хромирования и физического осаждения покрытий (PVD). Электролитическое покрытие хрома микротвердостью поверхности 11000...16000 МПа наносили в диапазоне температур 45...55°C. Покрытие нитридом титана микротвердостью 18900...21700 МПа наносили при 200...450°C методом PVD.

Толщину покрытия измеряли многофункциональным электромагнитным толщиномером защитных покрытий «Константа К5». Принцип работы прибора основан на использовании комбинации импульсного индукционного и вихретокового частотного (параметрического) методов получения первичной информации.

Микротвердость полученной упрочненной поверхности определили на приборе ПМТ-3М по стандартной методике в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007. Измеряли по одной втулке из партии, насчитывающей 10 шт. Для обеспечения точности измерений тонкостенная втулка была разрезана.

Измерения толщины и микротвердости покрытия на основе нитрида титана проводили в трех точках для одной втулки из партии.

Шероховатость упрочненных рабочих поверхностей тонкостенных ремонтных втулок измеряли профилометром MarSurf M400.

Результаты и их обсуждение

Преимуществом тонкостенной ремонтной втулки является ее толщина. Установка ее на вал позволяет восстановить герметичность соединения «Вал-манжета» без разборки агрегата в минимальные сроки даже в полевых условиях. Минимальные размеры стенки втулки ставят перед разработчиками ряд задач по выбору способа упрочнения.

Анализ состава пыли в различных регионах России показывает, что содержание кварца, имеющего микротвердость 10500...11300 МПа, составляет 70...80%, оксида алюминия (21000 МПа) – до 14% [10, 11]. Соответственно микротвердость поверхностного слоя втулки должна быть не менее 11000 МПа, а по возможности превышать 21 000 МПа.

Износостойкость и коррозионная стойкость изделий увеличиваются с применением электролитических покрытий (Cu, Cr, Ni и т.д.). Твердое хромирование дает микротвердость поверхности до 16000 МПа. Покрытия, обладающие повышенной износостойкостью (карбиды, нитриды, карбонитриды тугоплавких металлов), можно получить методами физического осаждения (PVD), химического осаждения покрытий (CVD) или химико-термической обработкой – в частности, методом диффузионной металлизации.

Для протекания реакций химического осаждения из газовой фазы (CVD метод) требуется температура до 1100°C. Поверхностное насыщение стали металлами при диффузионной металлизации происходит при температуре 900...1200°C,

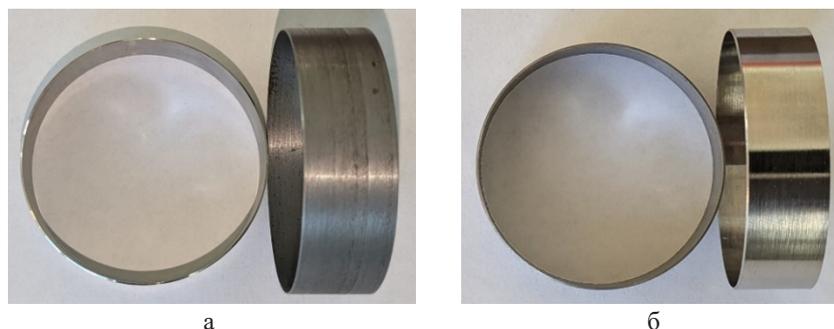


Рис. 1. Ремонтная тонкостенная втулка из сталей 40X (а) и 12X18H10T (б)

Fig. 1. Thin-walled repair bushing made of 40X(a) and 12X18H10T (b) steels

²Способ ноу-хау находится на этапе оформления (примеч. авт.).

что ведет к росту внутренних напряжений, и как следствие – к изменению геометрической формы детали (короблению).

Другие высокотемпературные методы нанесения износостойких покрытий также неприемлемы для ремонтной тонкостенной втулки в связи с неизбежным ее короблением при высоком нагреве.

Метод PVD применим для различных материалов, нанесение покрытий осуществляют при температуре до 450°C. При этом создаваемая небольшая толщина покрытия (1,5...10 мкм) является несомненным преимуществом в случае упрочнения поверхностного слоя тонкостенной втулки. Кроме того, PVD-покрытия обладают более высокой трещиностойкостью, повышенной износостойкостью и коррозионной стойкостью.

В результате анализа методов поверхностного упрочнения выявлено, что для тонкостенных ремонтных втулок с толщиной стенки 0,25...0,8 мм применимы два метода низкотемпературного упрочнения поверхности: электролитическое хромирование и физическое осаждение покрытий (PVD) (рис. 2).

Поверхностное упрочнение тонкостенной втулки реализовано с помощью двух выбранных методов упрочнения (рис. 3, 4). После испытаний по определению микротвердости на приборе ПМТ-3М провели анализ параметров микротвердости поверх-

ностного слоя тонкостенных ремонтных втулок. Лучшие результаты оказались у нитрида титана (табл. 1). Структура поверхности втулки, упрочненной TiN, показана на рисунке 5.

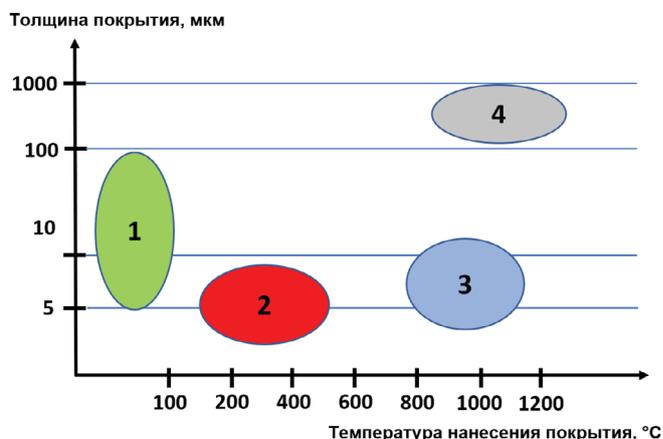


Рис. 2. Толщина покрытий в зависимости от методов нанесения:

- 1 – электролитическое хромирование;
- 2 – физическое осаждение покрытий (PVD);
- 3 – химическое осаждение покрытий (CVD);
- 4 – химико-термическая обработка

Fig. 2. Thickness of coatings depending on methods of application:

- 1 – electrolytic chromium plating;
- 2 – physical vapor deposition of coatings (PVD);
- 3 – chemical vapor deposition of coatings (CVD);
- 4 – chemical heat treatment

Характеристики покрытий тонкостенных ремонтных втулок

Таблица 1

Characteristics of coatings of thin-walled repair bushings

Table 1

Метод упрочнения <i>Method of hardening</i>	Обозначение покрытия <i>Designation of the coating</i>	Толщина покрытия, мкм <i>Thickness of the coating, μm</i>	Микротвердость покрытия, МПа <i>Microhardness of a coating, MPa</i>
Электролитическое покрытие (хромирование твердое) <i>Electrolytic coating (hard chromium plating)</i>	Xтв 21	21...30	11000...12000
Физическое осаждение покрытий (PVD) <i>Physical vapor deposition of coatings (PVD)</i>	TiN	4,2-4,9-5,2 (в трех точках) <i>(in three points)</i>	18900-19500-21700 (в трех точках) <i>(in three points)</i>



Рис. 3. Ремонтная тонкостенная втулка (Xтв 21)

Fig. 3. Thin-walled repair bushing (Xtv 21)



Рис. 4. Ремонтная тонкостенная втулка (TiN)

Fig. 4. Thin-walled repair bushing (TiN)

Определение микротвердости поверхности TiN вдавливанием алмазного пирамидального индентора с последующим измерением длин диагоналей восстановленного отпечатка изображено на рисунке 6.

Проведены замеры шероховатости упрочненных рабочих поверхностей тонкостенных ремонтных втулок с использованием профилометра MarSurf M400. Полученные данные (табл. 2) свидетельствуют

об улучшении чистоты поверхности на один класс при выбранных способах упрочнения рабочей поверхности втулки.

Профилограммы поверхностей (рис. 7) показывают, что нанесение упрочняющих покрытий позволило уменьшить шероховатости рабочих поверхностей втулки на 0,19 мкм по параметру Ra с хромым покрытием и на 0,22 мкм с покрытием нитридом титана.

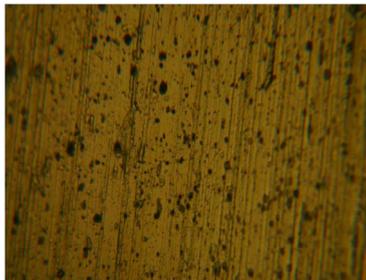


Рис. 5. Изображение поверхности ремонтной тонкостенной втулки (TiN). Увеличение – 400х

Fig. 5. Surface image of thin-walled repair bushing (TiN). Magnification – 400x

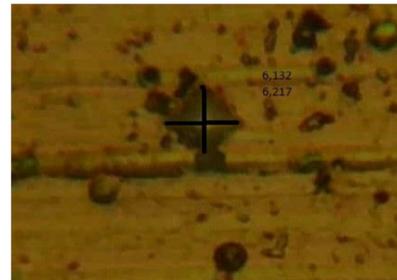


Рис. 6. След индентора на поверхности TiN. Увеличение – 800х

Fig. 6. Indenter trace on the TiN surface. Magnification – 800x

Шероховатость рабочих поверхностей втулок

Таблица 2

Roughness of the working surfaces of bushings

Table 2

Метод упрочнения <i>Hardening method</i>	Обозначение покрытия <i>Designation of the coating</i>	Шероховатость рабочей поверхности заготовки, Ra_{cp} <i>Roughness of the working surface of a workpiece, Ra_{cp}</i>	Шероховатость рабочей поверхности детали, Ra_{cp} <i>Roughness of the working surface of a part, Ra_{cp}</i>
Электролитическое покрытие (хромирование твердое) <i>Electrolytic plating (hard chromium plating)</i>	ХТВ 21	0,47	0,28
Физическое осаждение покрытий (PVD) <i>Physical vapor deposition of coatings (PVD)</i>	TiN	0,47	0,25

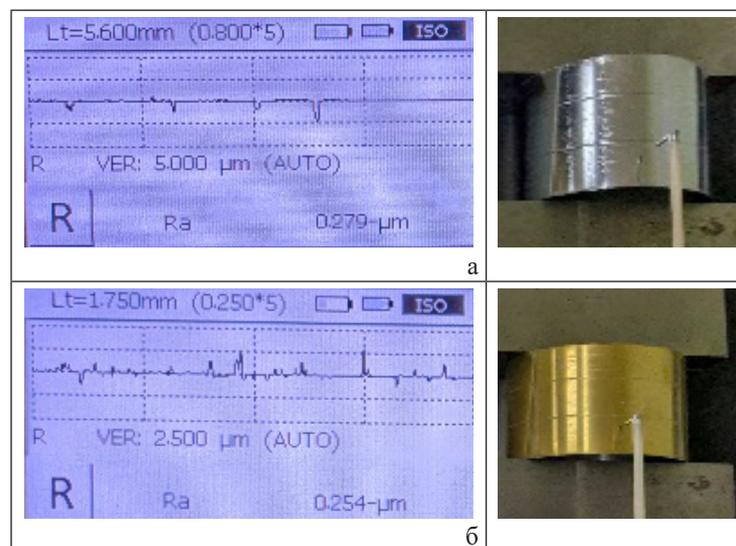


Рис. 7. Измерение шероховатости и профилограмма поверхности при твердом хромировании (а) и PVD (б)

Fig. 7. Roughness measuring and a surface profile diagram for hard chrome plating (a) and PVD (b)

Результаты измерений позволяют сделать вывод о том, что при изготовлении заготовок тонкостенных ремонтных втулок можно снизить требования к чистоте рабочей поверхности до 7 класса.

Выводы

1. Микротвердость поверхностного слоя втулки в уплотнительном соединении подшипниковых узлов сельскохозяйственных машин должна превышать микротвердость кварцевого абразива (11000 МПа), а по возможности – оксида алюминия (21 000 МПа).

2. Для поверхностного упрочнения втулок с толщиной стенки 0,25...0,8 мм выбраны два метода низкотемпературного упрочнения поверхности: электролитическое покрытие на основе хрома

и физическое осаждение покрытий (PVD) нитридом титана.

3. Метод электролитического упрочнения поверхности позволил получить на тонкостенной втулке покрытие на основе хрома Хтв 21 толщиной 21...30 мкм и микротвердостью 11000...12000 МПа. Полученное физическим осаждением покрытие из нитрида титана TiN имеет толщину 4,2...5,2 мкм и микротвердость 18900...21700 МПа. Выбранные способы упрочнения рабочей поверхности втулки улучшают чистоту поверхности на один класс.

4. Применение упрочненной выбранными методами тонкостенной втулки позволит повысить работоспособность уплотнительного соединения подшипниковых узлов сельскохозяйственных машин, работающих в пылевом облаке.

Список источников

1. Ерохин М.Н., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. и др. Производство и ремонт отечественных машин для агропромышленного комплекса с позиции принципа 5М // Вестник машиностроения. 2023. Т. 102, № 8. С. 701-704. EDN: BUMPSG
2. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г. и др. Оценка и анализ внутренних потерь при производстве продукции на машиностроительных предприятиях // Вестник машиностроения. 2023. Т. 102, № 5. С. 421-426. EDN: PYNKRC
3. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Гринченко Л.А. и др. Исследование влияния параметров макрогеометрии на герметичность соединений вала с манжетой // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2023. № 6. С. 40-47. <https://doi.org/10.31857/S0235711923060111>
4. Мельников О.М., Казанцев С.П., Игнаткин И.Ю. и др. Совершенствование уплотнительных устройств подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 3. С. 68-72. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-68-72>
5. Белов М.И., Ерохин М.Н., Мельников О.М. Оценка давления уплотнения на вал // Агроинженерия. 2020. № 2 (96). С. 29-33. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-2-29-33>
6. Игнаткин И.Ю., Дроздов А.В. Способ восстановления вала редуктора с применением упрочненной ремонтной детали // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 9. С. 13-17. EDN: LRSMGN
7. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г. и др. Расчет и выбор посадок с натягом для восстановления поверхности вала под манжету запрессовкой тонкостенных втулок // Вестник машиностроения. 2023. Т. 102, № 12. С. 990-994. EDN: HWTEJU
8. Мельников П.О. Повышение ресурса уплотнительных устройств валов сельскохозяйственной техники // Реинжиниринг и цифровая трансформация эксплуатации транспортно-технологических машин и робототехнических комплексов: Сборник статей Московской Международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 100-летию со дня рождения ветерана Великой Отечественной войны, заслуженного деятеля науки и техники, заслуженного изобретателя РФ, доктора технических наук, профессора Николая Федоровича Тельнова, Москва, 19-20 декабря 2023 г. М.: Российский

References

1. Erokhin M.N., Leonov O.A., Shkaruba N.Z. et al. Production and repair of domestic machines for agroindustrial complexes from the position of the 5m principle. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2023;102(8):701-704. (In Russ.)
2. Leonov O.A., Shkaruba N.Z., Vergazova Yu.G. et al. Assessment and analysis of internal losses in the manufacturing of products at machine-building enterprises. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2023;102(5):421-426. (In Russ.)
3. Leonov O.A., Shkaruba N.Z., Grinchenko L.A. et al. Study of the influence of macrogeometry parameters on the tightness of shaft-seal joints. *Problemy Mashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin*. 2023;6:40-47. <https://doi.org/10.31857/S0235711923060111> (In Russ.)
4. Melnikov O.M., Kazantsev S.P., Ignatkin I.Yu., Skorodov D.M., Belov M.I. Improving sealing elements of the bearing assembly of agricultural machinery. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(3):68-72. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-68-72>
5. Belov M.I., Yerokhin M.N., Melnikov O.M. Evaluation of seal pressure on the shaft. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2020;2:29-33. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-2-29-33>
6. Ignatkin I.Yu., Drozdov A.V. Renewal method of gearbox shaft with use of strengthened repair part *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*. 2020;9:13-17. (In Russ.)
7. Leonov O.A., Shkaruba N.Z., Vergazova Yu.G. et al. Calculation and selection of interference fits for restoring the shaft surface under the sealing ring by pressing thin-walled bushings. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2023;102(12):990-994. (In Russ.)
8. Melnikov P.O. Increasing the service life of sealing assemblies of agricultural machinery shafts. *Reinzhiniring i tsifrovaya transformatsiya ekspluatatsii transportno-tekhnologicheskikh mashin i robototekhnicheskikh kompleksov*: Proceedings of the Moscow International Interuniversity Scientific and Technical Conference of students, undergraduates, graduate students and young scientists (Moscow, December 19-20, 2023), dedicated to the 100th anniversary of Prof. Nikolai Telnov, Doctor of Engineering, Veteran of the Great Patriotic War, Honored Scientist and Technician, Honored Inventor of the Russian Federation. M.: Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2024. Pp. 245-249.

государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2024. С. 245-249. EDN: JFWBOM

9. Лапаев А.В., Мельников О.М. Методика расчета толщины ремонтной тонкостенной втулки для восстановления оптимального натяга в соединении «вал-манжета» // Техника и оборудование для села. 2025. № 1 (331). С. 31-34. EDN: LUBFOR

10. Ерохин М.Н., Чупяттов Н.Н. Повышение работоспособности гидравлических систем с применением CVD-метода металлоорганических соединений // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2013. № 3 (59). С. 39-41. EDN: TEFXML

11. Мельников О.М. Увеличение работоспособности соединений «вал-манжета» // Сборник статей по итогам II Международной научно-практической конференции «ГОРЯЧКИНСКИЕ ЧТЕНИЯ», посвященной 150-летию со дня рождения академика В.П. Горячкина, Москва, 18 апреля 2018 г. М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2019. С. 346-349. EDN: RIBRFV

Информация об авторах

¹ **Лапаев Андрей Валентинович**, преподаватель, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»; 127994, Российская Федерация, ГСП-4, г. Москва, Вадковский пер., 1; a9162968177@yandex.ru[✉]; SPIN-код: 3820-5721, AuthorID: 1112306

² **Мельников Олег Михайлович**, канд. техн. наук, доцент, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; melnikov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3202-8799>; Scopus Author ID: 57209744643; Researcher ID: AAE-5857-2022; SPIN-код: 3684-2856, AuthorID: 770153

Статья поступила 05.09.2024, после рецензирования и доработки 12.03.2025; принята к публикации 14.03.2025

9. Lapaev A.V., Melnikov O.M. Method for calculating the thickness of a thin-walled repair bushing to restore optimal tension in the shaft-seal connection. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2025;1:31-34. (In Russ.).

10. Yerokhin M.N., Chupyatov N.N. Improving efficiency of hydraulic systems using CVD-method of organometallic compounds. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2013;3:39-41. (In Russ.).

11. Melnikov O.M. Increasing the serviceability of the “shaft-seal” joints. Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference “Goryachkinskie Chteniya”, dedicated to the 150th anniversary of Academician V.P. Goryachkin, Moscow, April 18, 2018. M.: Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2019. Pp. 346-349.

Author Information

Andrey V. Lapaev¹, Lecturer; Moscow State Technological University «STANKIN»; 127994, Russia, Moscow, Vadkovsky Side-Str., 1; a9162968177@yandex.ru

Oleg M. Melnikov², CSc (Eng); Associate Professor; Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russia, Moscow, Timiryazevskaya Str, 49; melnikov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3202-8799>; Scopus Author ID: 57209744643; Researcher ID: AAE-5857-2022

Received 05.09.2024; Revised 12.03.2025; Accepted 14.03.2025

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.311.86:631.462:621.384.3

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-84-91>



Исследование работы устройства для обеззараживания ИК-излучением почвосмеси в тонком слое на конвейере

И.Г. Поспелова¹, М.Н. Ерохин², П.В. Дородов³, С.П. Казанцев⁴, И.В. Возмищев⁵

^{1,3} Удмуртский государственный аграрный университет; г. Ижевск, Россия

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

⁵ Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова; г. Ижевск, Россия

¹ pospelovaig@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-6458-9774>

² er.mihn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>

³ pvd80@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1478-5876>

⁴ kazansev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7158-1709>

⁵ vozm-ivan@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0005-9316-8252>

Аннотация. Обработку почвы от вредителей и возбудителей болезней сельскохозяйственных культур с целью обеззараживания проводят альтернативными методами, к которым относят электромагнитное излучение различного спектра: ультрафиолетовое, инфракрасное, сверхвысокочастотное и высокочастотное. Авторами разработано устройство для обеззараживания ИК-излучением почвосмеси в тонком слое на конвейере. С целью оптимизации процесса обеззараживания почвосмеси ИК-излучением поставлена задача получить уравнения регрессии режимов работы установки. Авторы исследовали различные режимы обработки ИК-излучением слоя почвосмеси на конвейере при толщине слоя 10...50 мм, высоте подвеса ИК излучателя 50...250 мм, мощности ИК излучателя 9,5...47,5 Вт. Получили три основные зависимости рабочего процесса: 1. Зависимость температуры почвосмеси от толщины слоя при постоянной мощности ИК-излучателя, постоянной высоте подвеса ИК-излучателя и постоянной скорости движения ленты конвейера. 2. Зависимость скорости движения ленты конвейера от высоты подвеса ИК-излучателя при постоянной мощности ИК-излучателя, постоянной толщине почвосмеси и фиксированном диапазоне температуры ($T = 95 \pm 5^\circ\text{C}$). 3. Зависимость скорости движения ленты конвейера от мощности ИК-излучателя при постоянной высоте подвеса ИК-излучателя, постоянной толщине почвосмеси и фиксированном диапазоне температуры ($T = 95 \pm 5^\circ\text{C}$). Полученные уравнения регрессии с точностью аппроксимации 0,976...0,999 позволяют рассчитать рабочие режимы установок разных типоразмеров, выполнить оптимизацию процесса обеззараживания почвосмеси ИК-излучением и реализовать его в техническом исполнении с системой автоматического управления.

Ключевые слова: обеззараживание, ИК-излучение, почвосмесь, нагрев, конвейер, высота подвеса ИК-излучателя, мощность ИК-излучателя, скорость движения ленты конвейера, слой почвосмеси

Для цитирования: Поспелова И.Г., Ерохин М.Н., Дородов П.В., Казанцев С.П., Возмищев И.В. Исследование работы устройства для обеззараживания ИК-излучением почвосмеси в тонком слое на конвейере // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 2. С. 84-91. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-84-91>

ORIGINAL ARTICLE

Study of the operation of an IR irradiator to disinfect the soil mixture placed in a thin layer on a conveyor belt

I.G. Pospelova^{1✉}, M.N. Erokhin², P.V. Dorodov³, S.P. Kazantsev⁴, I.V. Vozmishchev⁵

^{1,3} Udmurt State Agrarian University; Izhevsk, Russia

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

⁵ Kalashnikov Izhevsk State Technical University; Izhevsk, Russia

¹ pospelovaig@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0009-0003-6458-9774>

² er.mihn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>

³ pvd80@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1478-5876>

⁴ kazantsev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7158-1709>

⁵ vozm-ivan@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0005-9316-8252>

Abstract. It is a common practice to treat soil against pests and pathogens of agricultural crops to ensure its disinfection using alternative methods, which include electromagnetic radiation of various spectrums: ultraviolet (UV), infrared (IR), microwave (microwave), and high frequency (HF). The authors have developed an IR irradiator to disinfect soil mixtures placed in a thin layer on a conveyor belt. In order to optimize soil mixture disinfection with IR irradiation, the task was set to obtain regression equations of the irradiator operation modes. The authors studied different modes of the IR irradiation of soil mixture layer placed on the conveyor belt at the layer thickness of 10 to 50 mm, the IR irradiator hanger height of 50 to 250 mm, and the IR irradiator power of 9.5 to 47.5 W. The authors studied three main relationships describing the working process. 1. Dependency of soil mixture temperature on layer thickness at the constant IR irradiator power, constant height of the IR irradiator hanger, and constant speed of the conveyor belt. 2. Dependency of the travel speed of the conveyor belt on the hanger height of the IR irradiator at its constant power, constant soil mixture thickness, and fixed temperature range ($T = 95 \pm 5^\circ\text{C}$). 3. Dependency of the conveyor belt travel speed on the IR irradiator power at a constant height of its hanger, constant soil mixture thickness, and fixed temperature range ($T = 95 \pm 5^\circ\text{C}$). The obtained regression equations with an approximation accuracy of 0.976 to 0.999 can facilitate the calculation of the operating modes of various-size irradiators, optimizing the disinfection of soil mixtures with IR irradiation and integrate it with an automatic control system.

Keywords: disinfection, IR irradiation, soil mixture, heating, conveyor, IR irradiator hanger height, IR irradiator power, conveyor belt speed, soil mixture layer

For citation: Pospelova I.G., Erokhin M.N., Dorodov P.V., Kazantsev S.P., Vozmishchev I.V. Study of the operation of an IR irradiator to disinfect the soil mixture placed in a thin layer on a conveyor belt. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(2):84-91 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-84-91>

Введение

Одной из главных задач ресурсосберегающего земледелия является разработка технологий оптимального возделывания и обработки почвы с целью эффективного использования ее биологического потенциала. Современные технологии обработки почвы включают в себя химические методы борьбы с вредителями, болезнями и сорной растительностью. Использование химикатов приводит к насыщению почвы, растений и плодов вредными для человека и природы химическими соединениями. Для уменьшения влияния химии на почву, растения и плоды актуальным является использование альтернативных методов их обработки, к которым относят электромагнитное излучение различного спектра: ультрафиолетовое (УФ), инфракрасное (ИК), сверхвысокочастотное (СВЧ) и высокочастотное (ВЧ) [1-3].

Нами разработана установка для обеззараживания ИК-излучением почвосмеси в тонком слое

на конвейере [4-6]. Для ее эффективного функционирования необходимо провести на опытном образце ряд экспериментов.

Цель исследований: получить уравнения регрессии режимов работы установки на основе экспериментальных исследований, которые позволят выполнить оптимизацию процесса обеззараживания ИК-излучением почвосмеси в тонком слое на конвейере.

Материалы и методы

Объектом исследований является почвосмесь, предназначенная для защищенного грунта, состоящая из торфа (~20%), компоста (~60%) и песка (~20%). Средняя массовая доля влаги составляет $40 \pm 5\%$, средняя объемная плотность – $1,1 \text{ г/см}^3$. В работе применена стандартная методика определения физических параметров почвы с использованием лабораторного оборудования. Из источников литературы известно, что температура почвы, при которой происходит ее

обеззараживание, составляет $95 \pm 5^\circ\text{C}$. Превышение температуры заданного диапазона приводит к уничтожению полезных свойств, почва становится «мертвой» [4, 5].

Обработка и термометрия почвосмеси проводились на экспериментальной установке, схема которой показана на рисунке 1.

Чтобы не допустить перегрева почвосмеси и обеспечить ее обеззараживание ИК-излучением, близкое к равномерному, обработку проводили в тонком слое (менее 50 мм). Почвосмесь из бункера насыпали на ленту конвейера равномерным тонким слоем разной толщины (10...50 мм). Включали привод конвейера и ИК-излучатель и наблюдали за процессом обработки почвосмеси, контролируя ее температуру термометром с термощупом. Площадь обработки почвосмеси на конвейере ИК-излучателем, размером $0,6 \times 0,25$ м, расположенным над лентой на высоте до 0,25 м, составляла $0,2 \text{ м}^2$.

Методика исследований состоит из трех этапов:

1. Экспериментальное исследование зависимости температуры (T , $^\circ\text{C}$), почвосмеси от толщины (L , м) слоя $T = f_1(L)$ при постоянной мощности ИК-излучателя ($P = \text{const}$), постоянной высоте подвеса ИК-излучателя ($H = \text{const}$) и постоянной скорости движения ленты конвейера ($V = \text{const}$).

2. Экспериментальное исследование зависимости скорости (V , м/с), движения ленты конвейера от высоты (H , м) подвеса ИК-излучателя $V = f_2(H)$ при постоянной мощности ИК-излучателя ($P = \text{const}$), постоянной толщине почвосмеси ($L = \text{const}$) и средней температуре ($T = 95 \pm 5^\circ\text{C}$).

3. Экспериментальное исследование зависимости скорости (V , м/с) движения ленты конвейера

от мощности (P , Вт) ИК-излучателя $V = f_3(P)$ при постоянной высоте подвеса ИК-излучателя ($H = \text{const}$), постоянной толщине почвосмеси ($L = \text{const}$) и средней температуре ($T = 95 \pm 5^\circ\text{C}$) [7, 8].

Результаты и их обсуждение

Для определения оптимальной толщины слоя на ленту конвейера насыпали слой почвосмеси 10...50 мм и проводили замеры температуры в срединном слое термометром с термощупом по истечении 30 с после включения ИК-излучателя. Замеры проводили с трехкратным повторением (табл. 1).

Графическое изображение табличных данных в относительных величинах показано на рисунке 2. Относительная температура почвосмеси в безразмерных единицах –

$$t = \frac{T}{T_0}, \tag{1}$$

где T – температура почвосмеси, $^\circ\text{C}$; T_0 – номинальная температура почвосмеси ($T_0 = 95 \pm 5^\circ\text{C}$).

Относительная толщина слоя почвосмеси в безразмерных единицах –

$$l = \frac{L}{L_{\text{max}}}, \tag{2}$$

где L – толщина слоя почвосмеси, м; L_{max} – максимальная толщина слоя почвосмеси ($L_{\text{max}} = 0,05$ м).

Представленная зависимость позволила получить уравнение регрессии с инвариантными коэффициентами

$$t = 4,791l^3 - 9,214l^2 + 3,965l + 0,672 \tag{3}$$

и достоверностью аппроксимации, близкой к 1 ($R^2 = 0,976$)¹ [9].

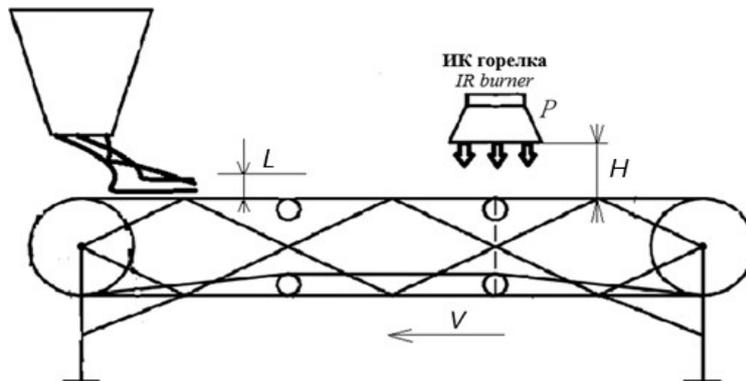


Рис. 1. Схема устройства для обеззараживания почвы и субстрата в тонком слое ИК-излучением:

P – мощность источника излучения (ИК-излучатель); H – высота подвеса ИК-излучателя;

L – толщина слоя почвосмеси; V – скорость движения ленты конвейера

Fig. 1. Schematic diagram of the IR irradiator for disinfecting soil and substrate placed in a thin layer:

P – radiation source (IR irradiator); H – IR irradiator hanger height; L – soil mixture layer thickness; V – conveyor belt speed

¹Микаелян Г.А., Нурметов Р.Д. Основы оптимального проектирования производственных процессов в овощеводстве. Способы и методы обеззараживания почвы в теплицах: Монография. М.: Росинформагротех, 2005. С. 443-448. EDN: QKXKUZ.

Результаты измерений показали, что слой почвосмеси толщиной 10 мм перегревается, а слой 30...50 мм не достигает номинальной температуры обеззараживания. Оптимальную толщину можно найти из уравнения (3) при $t = 1$, однако предварительно необходимо исследовать остальные параметры процесса.

Таблица 1
Зависимость температуры почвосмеси от толщины ее слоя

Table 1
Relationship between soil mixture temperature and the thickness of its layer

№ опыта Experiment No.	Температура, $T, ^\circ\text{C}$ Temperature, $T, ^\circ\text{C}$	Среднее значение температуры, $T, ^\circ\text{C}$ Average temperature value, $T, ^\circ\text{C}$	Толщина слоя почвосмеси, $L, \text{м}$ Layer of soil mixture, L, m
1	110	$109,7 \pm 1,2$	0,01
	108		
	111		
2	100	$98,3 \pm 1,2$	0,02
	98		
	97		
3	82	$81,3 \pm 1,4$	0,03
	83		
	79		
4	31	$32,7 \pm 1,6$	0,04
	35		
	32		
5	20	$22,3 \pm 1,6$	0,05
	23		
	24		

Результаты исследования скорости движения ленты конвейера от высоты подвеса ИК излучателя показаны в таблице 2.

Графическое представление табличных данных в относительных величинах и их линия тренда показаны на рисунке 3. Относительная скорость движения ленты конвейера в безразмерных единицах –

$$v = \frac{V}{V_{\max}}, \tag{4}$$

где V – скорость движения ленты конвейера, мм/с; V_{\max} – максимальная скорость движения ленты конвейера ($V_{\max} = 9,3 \text{ мм/с}$).

Относительная высота подвеса ИК излучателя в безразмерных единицах –

$$h = \frac{H}{H_{\max}}, \tag{5}$$

где H – высота подвеса ИК-излучателя, м; H_{\max} – максимальная высота подвеса ИК излучателя ($H_{\max} = 0,25 \text{ м}$).

Представленная зависимость позволила получить уравнение регрессии с инвариантными коэффициентами

$$v = -0,937h^3 + 1,330h^2 - 0,946h + 1,142 \tag{6}$$

и достоверностью аппроксимации, близкой к 1 ($R^2 = 0,998$)² [9].

Результаты исследования скорости движения ленты конвейера от мощности ИК-излучателя представлены в таблице 3.

Табличные данные в графической форме в относительных величинах показаны на рисунке 4.

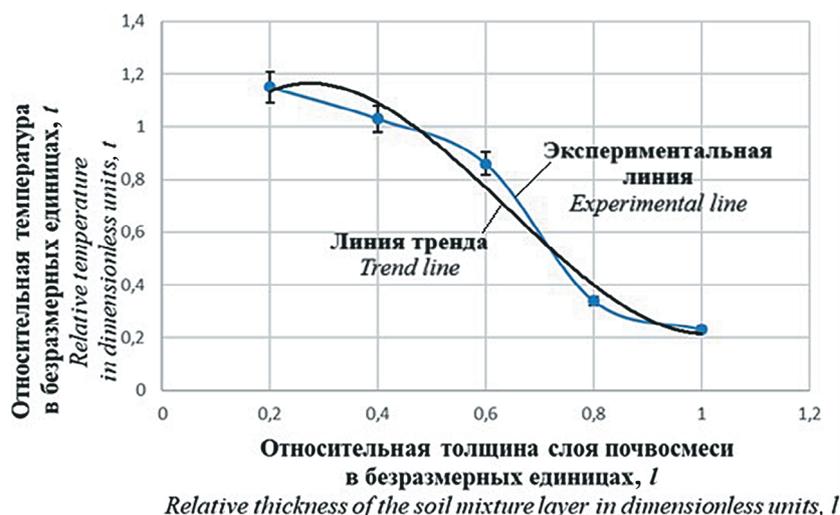


Рис. 2. Зависимость относительной температуры от относительной толщины слоя почвосмеси

Fig. 2. Relationship between the relative temperature and the relative thickness of the soil mixture layer

²Микаелян Г.А., Нурметов Р.Д. Основы оптимального проектирования производственных процессов в овощеводстве. Способы и методы обеззараживания почвы в теплицах: Монография. М.: Росинформагротех, 2005. С. 443-448. EDN: QKXKUZ.

Таблица 2

Зависимость скорости движения ленты конвейера от высоты подвеса ИК-излучателя (при $T = 95 \pm 5^\circ\text{C}$)

Table 2

Dependency curve of the conveyor belt speed on the IR irradiator hanger height (at $T = 95 \pm 5^\circ\text{C}$)

№ опыта <i>Experiment No.</i>	Скорость движения ленты конвейера, v , мм/с <i>Conveyor belt speed, v, mm/c</i>	Среднее значение скорости движения ленты конвейера, v , м/с <i>Average value of conveyor belt speed, v, m/c</i>	Высота подвеса ИК-излучателя, h , м <i>IR irradiator hanger height, h, m</i>
1	0,0095	0,0093 \pm 0,0006	0,05
	0,0100		
	0,0085		
2	0,0090	0,0085 \pm 0,0004	0,10
	0,0085		
	0,0079		
3	0,0075	0,0080 \pm 0,0003	0,15
	0,0080		
	0,0085		
4	0,0068	0,0070 \pm 0,0002	0,20
	0,0071		
	0,0072		
5	0,0057	0,0055 \pm 0,0003	0,25
	0,0055		
	0,0054		

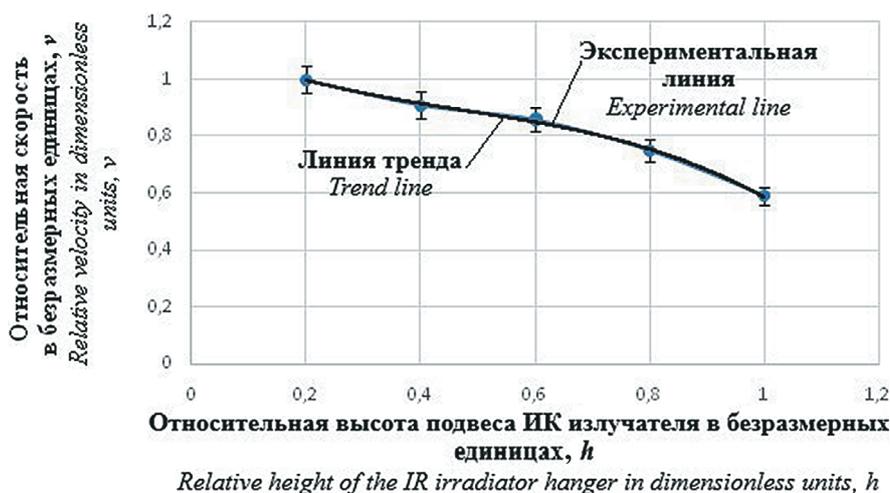


Рис. 3. Зависимость относительной скорости движения ленты конвейера от относительной высоты подвеса ИК-излучателя

Fig. 3. Relationship between the relative speed of the conveyor belt and the relative height of the IR irradiator hanger

Таблица 3

Зависимость скорости движения ленты конвейера от мощности ИК-излучателя (при $T = 95 \pm 5^\circ\text{C}$)

Table 3

Dependency curve of the conveyor belt speed on the IR irradiator power (at $T = 95 \pm 5^\circ\text{C}$)

№ опыта <i>Experiment No.</i>	Скорость движения ленты конвейера, v , м/с <i>Conveyor belt speed, v, m/c</i>	Среднее значение скорости движения ленты конвейера, v , м/с <i>Average value of conveyor belt speed, v, m/c</i>	Мощность ИК-излучателя, P , Вт <i>IR irradiator power, P, W</i>
1	0,0083	0,0080 \pm 0,0003	9,5
	0,0076		
	0,0081		
2	0,0180	0,0160 \pm 0,0015	19
	0,0160		
	0,0140		
3	0,0270	0,0250 \pm 0,0015	28,5
	0,0250		
	0,0230		
4	0,0310	0,0330 \pm 0,0015	38
	0,0350		
	0,0330		
5	0,0460	0,0430 \pm 0,0031	47,5
	0,0390		
	0,0440		

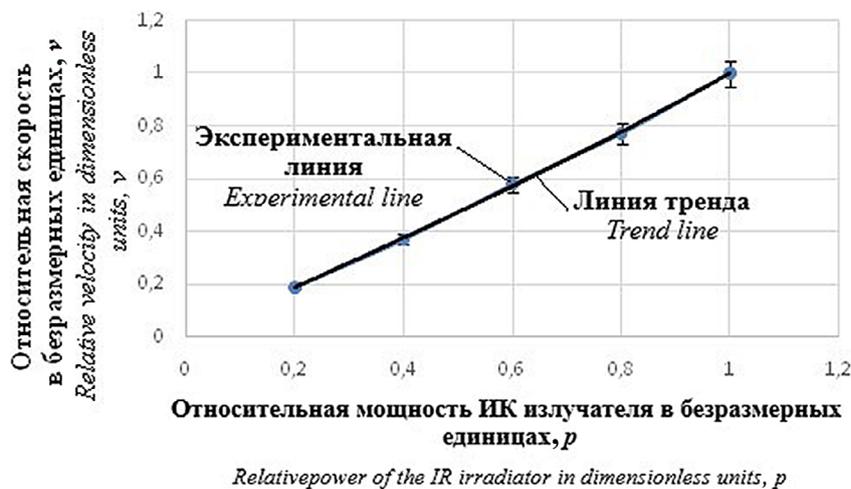


Рис. 4. Зависимость относительной скорости движения ленты конвейера от относительной мощности ИК-излучателя

Fig. 4. Relationship between the relative speed of the conveyor belt and the relative power of the IR irradiator

Относительная скорость движения ленты конвейера в безразмерных единицах –

$$v = \frac{V}{V_{\max}}, \quad (7)$$

где V – скорость движения ленты конвейера, мм/с; V_{\max} – максимальная скорость движения ленты конвейера ($V_{\max} = 43$ мм/с).

Относительная мощность ИК излучателя в безразмерных единицах –

$$p = \frac{P}{P_{\max}}, \quad (8)$$

где P – текущая мощность ИК-излучателя, Вт; P_{\max} – максимальная мощность ИК-излучателя ($P_{\max} = 47,5$ Вт).

Представленная зависимость позволила получить уравнение регрессии с инвариантными коэффициентами

$$v = 0,104p^3 - 0,044p^2 + 0,936p + 0,002 \quad (9)$$

и достоверностью аппроксимации, близкой к 1 ($R^2 = 0,999$) [9, 10].

Список источников

1. Воложанинов С.С., Алдошин Н.В., Завалий А.А. и др. Применение физических методов обработки для обеззараживания почвы // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 32-37. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-32-37>
2. Воложанинов С.С., Алдошин Н.В., Завалий А.А., Волобуев Д.Д. Экспериментальное исследование температурного поля в слое почвы при нагреве сверхвысокочастотным излучением // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 6. С. 28-35. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-28-35>
3. 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>
4. Устройство для обеззараживания почвосмеси в тонком слое ИК-излучением на конвейере: Патент на полезную модель RU227192 U1, МПК А01М 17/00. Заявка № 2024108138; заявл. 28.03.2024; Оpubл. 11.07.2024 / И.Г. Поспелова, И.В. Возмищев, Т.А. Широкова и др. EDN: ADWMMME
5. Устройство для обеззараживания почвы: Патент на полезную модель RU208747 U1, МПК А01М 17/00. Заявка № 2021129373; заявл. 08.10.2021; Оpubл. 11.01.2022 / А.А. Завалий, Н.В. Алдошин, С.С. Воложанинов и др. EDN: RLEWNQ
6. Поспелова И.Г., Дородов П.В., Возмищев И.В. и др. Методика исследования обеззараживания ИК-излучением почвосмеси в тонком слое на конвейере // АгроЭкоИнфо. 2023. № 6 (60). С. 34. EDN: ZDOSWO.
7. Дородов П.В., Поспелова И.Г., Возмищев И.В., Титов И.В. Применение инфракрасного нагрева при обеззараживании почвы в защищенном грунте и механизм распространения тепла // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69, № 2 (47). С. 59-64. EDN: VTKZNA
8. Кабалоев Т.Х., Гатуева К.К., Гокоев Т.М., Никколова Л.С. Температурное поле тепличной почвы при термоэлектрическом способе нагрева // Известия Горского государственного

Из данных рисунков 2, 3, 4 следует, что линии тренда находятся в доверительном интервале $\pm 5\%$ экспериментальных данных и с точностью аппроксимации 0,976...0,999.

Выводы

1. Обработка ИК-излучением почвосмеси в тонком слое на конвейере должна обеспечивать равномерный ее нагрев, не превышающий температуру $95 \pm 5^\circ\text{C}$ и максимальное обеззараживание. Для этого исследованы различные режимы обработки при толщине слоя 10...50 мм, высоте подвеса ИК-излучателя 50...250 мм, мощности ИК-излучателя 9,5...47,5 Вт.
2. Полученные на основе экспериментальных исследований уравнения регрессии с точностью аппроксимации 0,976...0,999 позволяют рассчитать рабочие режимы установок разных типоразмеров, в дальнейшем выполнить оптимизацию процесса обеззараживания почвосмеси ИК-излучением и реализовать его в техническом исполнении с системой автоматического управления.

References

1. Volozhaninov S.S., Aldoshin N.V., Zavaliiy A.A. et al. Application of physical treatment methods for soil disinfection. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(6):32-37. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-32-37>
2. Volozhaninov S.S., Aldoshin N.V., Zavaliiy A.A. et al. Experimental study of the temperature field in the soil layer when heated by ultrahigh frequency radiation. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(6):28-35. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-28-35>
3. Storchevoy V.F., Sudnik Yu.A., Manuilenko 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>
4. Pospelova I.G., Voymishchev I.V., Shirobokova T.A. et al. IR irradiator for disinfecting soil mixture placed in a thin layer on a conveyor belt: Patent for Utility Model No. 227192 U1 Russian Federation, IPC A01M 17/00. No. 2024108138, 2024.
5. Zavaliiy A.A., Aldoshin N.V., Volozhaninov S.S. et al. Soil disinfection device: Patent for Utility Model No. 208747 U1 Russian Federation, IPC A01M 17/00. No. 2021129373, 2022.
6. Pospelova I.G., Dorodov P.V., Voymishchev I.V. et al. Methodology for studying the disinfection of a soil mixture in a thin layer on a conveyor using IR radiation. *AgroEcoInfo*. 2023;6(60). (In Russ.)
7. Dorodov P.V., Pospelova I.G., Voymishchev I.V. et al. The use of infrared heating in soil disinfection in protected ground and the mechanism of heat propagation. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2022;69(2):59-64. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2022-69-2-59-64>
8. Kabaloev T.Kh., Gatuева K.K., Gokoev T.M. et al. Temperature field of greenhouse ground with thermoelectric method of heating. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2018;55(4):148-152. (In Russ.)
9. Dzanagov S.Kh., Kabaloev T.Kh. Soil disinfection in protected ground. *Zemledelie*. 2004;2:36-37. (In Russ.)

аграрного университета. 2018. Т. 55, № 4. С. 148-152. EDN: YRLMVN

9. Дзанагов С.Х., Кабалоев Т.Х. Обеззараживание почвы в защищенном грунте // Земледелие. 2004. № 2. С. 36-37. EDN: PJNRAZ

Информация об авторах

- ¹ **Поспелова Ирина Геннадиевна**, канд. техн. наук, доцент; pospelovaig@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0009-0003-6458-9774>; SPIN-код: 1625-0307, AuthorID: 547047
- ² **Ерохин Михаил Никитьевич**, д-р техн. наук, профессор, академик РАН; er.mihn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>; Scopus Author ID: 572092705884; SPIN-код: 3499-4405, AuthorID: 626708
- ³ **Дородов Павел Владимирович**, д-р техн. наук, профессор; pvd80@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1478-5876>; SPIN-код: 9058-8125, AuthorID: 313983
- ⁴ **Казанцев Сергей Павлович**, д-р техн. наук, профессор; kazansev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7158-1709>; Scopus Author ID: 57209268547; Researcher ID: GZL-6443-2022; SPIN-код: 4175-7998, AuthorID: 756509
- ⁵ **Возмищев Иван Владимирович**, старший преподаватель кафедры электротехники, vozm-ivan@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0005-9316-8252>; SPIN-код: 6045-9160, AuthorID: 1064122
- ^{1,3} Удмуртский государственный аграрный университет; 246069, Российская Федерация, Удмуртская республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, 11
- ^{2,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49
- ⁵ Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова; 246069, Российская Федерация, Удмуртская республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7

Вклад авторов

И.Г. Поспелова – формулирование основной концепции исследований;
 М.Н. Ерохин – разработка методологии исследований;
 П.В. Дородов – описание результатов и формирование выводов исследований, подготовка начального варианта текста;
 С.П. Казанцев – представление результатов, подготовка графических материалов;
 И.В. Возмищев – проведение экспериментов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 27.01.2025, после рецензирования и доработки 26.02.2025; принята к публикации 03.03.2025

Author Information

- Irina G. Pospelova**¹, DSc (Eng), Associate Professor; pospelovaig@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0009-0003-6458-9774>
- Mikhail N. Erokhin**², Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor; er.mihn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>, Scopus Author ID: 572092705884
- Pavel V. Dorodov**³, DSc (Eng), Professor, pvd80@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1478-5876>
- Sergey P. Kazantsev**⁴, DSc (Eng), Professor; kazansev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7158-1709>; Scopus Author ID: 57209268547; Researcher ID: GZL-6443-2022
- Ivan V. Vozmishchev**⁵, Senior Lecturer, Department of Electrical Engineering; vozm-ivan@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0005-9316-8252>
- ^{1,3} Udmurt State Agrarian University; 246069, Russia, Udmurt Republic, Izhevsk, Studencheskaya Str., 11.
- ^{2,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russia, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49.
- ⁵ Kalashnikov Izhevsk State Technical University, 246069, Russia, Udmurt Republic, Izhevsk, Studencheskaya Str., 7.

Author Contribution

I.G. Pospelova – conceptualization;
 M.N. Erokhin – research methodology;
 P.V. Dorodov – formal analysis, validation, conclusions, writing – original draft;
 S.P. Kazantsev – results and discussion, visualization;
 I.V. Vozmishchev – investigation.

Conflict of interests

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

Received 27.01.2025; Revised 26.02.2025; Accepted 03.03.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.3

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-92-99>

Коэффициенты сезонности по количеству и продолжительности отключений в сельских электрических сетях с учетом их причин

А.В. Виноградова^{1,2}¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия²Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина; г. Орёл, Россия^{1,2}alinawin@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8935-7086>

Аннотация. При прогнозировании электропотребления и недоотпуска электроэнергии в сельских сетях необходимо учитывать сезонность аварийных отключений. Однако необходимые данные для учета сезонности на показатели надежности электрических сетей отсутствуют, и в нормативно-технической документации вопросы сезонности в электроэнергетике не раскрываются в достаточной мере. Исследования проведены с целью определения коэффициентов сезонности по потоку отказов и времени восстановления с учетом причин отключений в сельских электрических сетях 0,4 кВ. Используя статистические данные одного из центральных регионов России за период 2018-2023 гг., выявили наиболее значимые причины аварийных отключений сельских электрических сетей 0,4 кВ: отключения по вине потребителя, перегорание предохранителей, схлестывание проводов, обрыв проводов и др. По каждой причине рассчитаны коэффициенты сезонности по потоку отказов и времени восстановления отключений. Установлено, что наибольшая вероятность возникновения аварийного отключения прослеживается с мая по август, коэффициент сезонности для этого периода варьируется в диапазоне 1,15...1,83. В другие периоды коэффициенты ниже: с сентября по декабрь – 0,71...1,06; с января по апрель – 0,54...0,67. Наибольшее значение коэффициента сезонности по времени восстановления наблюдали в период с мая по август (1,27...2,03), минимальные – в январе-феврале (0,44...0,52). Учет коэффициентов сезонности по конкретным причинам позволит прогнозировать показатели надежности электроснабжения потребителей и более качественно и эффективно подбирать мероприятия по повышению надежности сетей.

Ключевые слова: сельские электрические сети, статистические данные, надежность электроснабжения, коэффициент сезонности, отключения, причины отключений, прогноз, вероятность возникновения аварийного отключения

Для цитирования: Виноградова А.В. Коэффициенты сезонности по количеству и продолжительности отключений в сельских электрических сетях с учётом их причин // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 2. С. 92-99. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-92-99>

ORIGINAL ARTICLE

Seasonality coefficients for the number and duration of outages in rural power grids, taking into account their causes

A.V. Vinogradova^{1,2}¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia²Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin; Orel, Russia^{1,2}alinawin@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8935-7086>

Abstract. When predicting power consumption and power shortages in rural power grids, it is necessary to take into account the seasonality of emergency outages. However, the necessary data on the effect of seasonality on the reliability indicators of power grids are not available. Moreover, the regulatory and technical documentation fails to cover the issues of seasonality in the electric power industry. The study aimed to determine the seasonality coefficients for the failure flow and restoration time, taking into account the causes of outages in rural 0.4 kV power grids. Using statistical data from one of the central regions of Russia for the period between 2018 and 2023, the author identified the most significant causes of emergency outages in rural 0.4 kV power grids: consumer-caused outages, fuse blowing, wire splicing, wire breakage, and others. For each cause, the seasonality coefficients for the flow of failures and restoration time were calculated. The study found that the highest probability

of emergency outage falls on the period from May to August; the seasonality coefficient for this period ranges between 1.15 and 1.83. In other periods, the coefficients are lower: from September to December – 0.71 to 1.06, from January to April – 0.54 to 0.67. The highest value of the seasonality coefficient by the restoration time was recorded in the period from May to August (1.27 to 2.03), the minimum – in January-February (0.44 to 0.52). Taking into account the seasonality coefficients for specific reasons will make it possible to forecast indicators of power supply reliability and plan better and more efficient measures to improve power grid reliability.

Keywords: rural power grids, statistical data, reliability of power supply, seasonality coefficient, outages, reasons for outages, forecast, probability of emergency outages

For citation: Vinogradova A.V. Seasonality coefficients for the number and duration of outages in rural power grids, taking into account their causes. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(2):92-99 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-92-99>

Введение

Системы электроснабжения имеют выраженную сезонность по месяцам и времени суток, связанную с периодичностью природно-климатических факторов и нагрузок потребителей. Например, в работе А.В. Могиленко¹ сезонное влияние на величину коммерческих потерь рассматривается с точки зрения отопительного и неотопительного периодов. В работе [1] отражена сезонность при прогнозировании электропотребления. Авторами [2] выделяются циклические факторы в разрезе анализа методов прогнозирования электропотребления в распределительных сетях. Зачастую сезонность влияет на управление спросом на электроэнергию при выравнивании посуточных, месячных, годовых графиков реального электропотребления в масштабах региональных и объединенных электроэнергетических систем, что ведет к снижению затрат на всех уровнях энергосистемы страны [3]. С учетом сезонных факторов рассмотрены, например, вопросы оптимизации надежности крымской энергосистемы на период до 2025 г. [4].

При сравнении статистических данных причин отключений в разных регионах отмечается схожесть их по составу и процентному соотношению [5], что отражает закономерность влияния сезонных факторов на количество отключений. Основываясь на результатах многолетних статистических данных, некоторые авторы [6, 7] также отмечают сезонный характер, определенную периодичность и закономерность интенсивности потока аварийных отключений в электрических сетях. Так, для энергосистемы Нижегородской области отмечены основные внешние факторы, влияющие на надежную работу линий электропередач и индексы сезонности отключений по месяцам

¹ Могиленко А.В. Потери электроэнергии в сетях 0,4-10 кВ. Влияние сезонного фактора // Новости ЭлектроТехники. 2010. № 2(62) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://news.elteh.ru/arh/2010/62/12.php> (дата обращения 10.10.2024 г.).

за период 2016-2019 гг. [8]. В ряде работ [9-11] выявлена зависимость причин аварийных отключений в разных регионах и странах и величины недоотпуска электроэнергии от времени года. В работе [12] представлен прогноз количества аварийных отключений и анализ сезонности для электрических сетей 35-220 кВ путем сравнения действительных и спрогнозированных значений. Разработано программное обеспечение для прогноза количества аварийных отключений.

Несмотря на интерес к проблеме аварийных отключений, нормативные и правовые документы практически не регламентируют учет сезонности при прогнозировании и расчетах показателей надежности электроснабжения.

Актуальной является задача получения коэффициентов сезонности по количеству (потоку отказов) и продолжительности (времени восстановления) отключений, других показателей надежности для систем электроснабжения сельских потребителей по регионам страны и классам напряжения электрических сетей. Следует определять коэффициенты сезонности и в привязке к причинам отключений, что позволит более качественно планировать мероприятия по повышению надежности, прогнозировать ущерб от недоотпуска электроэнергии, решать другие практические задачи.

Цель исследований: определение коэффициентов сезонности по потоку отказов и времени восстановления с учетом причин отключений в сельских электрических сетях 0,4 кВ.

Материалы и методы

В ходе исследований анализировали статистические данные по количеству аварийных отключений в сельских электрических сетях 0,4 кВ по Орловской области за период 2018-2023 гг. Общая протяженность анализируемых сетей составляет более 10 тыс. км. Использовали дескриптивные и диагностические (в частности, анализ количества

отключений и времени восстановления с учетом причин отключений), предиктивные (получение коэффициентов сезонности по потоку отказов и времени восстановления) методы анализа. Метод исследования включал в себя анализ журналов отключений по исследуемым сетям с целью сбора статистических данных и структурирования причин отключений. При упорядочивании причин близкие формулировки, приведенные в журналах, объединялись, и количество отключений по ним суммировалось. Исследовали количество и продолжительность отключений с учетом их причины, произвели расчет коэффициентов сезонности по потоку отказов и времени восстановления и выполнили анализ полученных результатов.

Результаты и их обсуждение

В распределительных электрических сетях данные по всем видам отключений заносят в программный комплекс «Аварийность ЭСК», содержащий

формы, соответствующие журналам отключений. В журналах отмечены факты отключений с указанием времени возникновения и окончания, количества и мощности отключенных потребителей, выявленных причин отключений. Подробно количественные характеристики количества отключений по годам приведены в работе [13]. Отключения на более чем 12 тыс. воздушных линий (ВЛ) общей протяженностью порядка 10 тыс. км были классифицированы по причинам и количеству по каждому месяцу каждого рассматриваемого года (табл. 1).

Прослеживается сезонность количества отключений. В летний период количество отключений увеличивается, демонстрируя почти двукратный рост в мае по отношению к апрелю и достигая пика в июле. Это связано с началом грозовой активности, с периодом отпусков и разгаром дачного сезона. В октябре, перед началом отопительного сезона и началом холодов, наблюдается увеличение количества отключений,

Таблица 1

Причины отключений ВЛ 0,4 кВ за 2018-2023 гг.

Table 1

Causes of 0.4 kV overhead line outages for 2018-2023

№ п/п	Причина отключения	Месяц												Σ за год
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	Потребитель	220	234	211	218	424	591	663	549	342	455	292	319	4518
2	Перегорание предохранителя	38	35	53	51	109	185	189	110	87	91	65	96	1109
3	Не выявлено	33	32	81	69	88	62	83	80	40	76	58	93	795
4	Схлестывание проводов	36	26	36	33	68	80	97	39	43	34	28	41	561
5	Обрыв провода	16	35	27	25	43	88	84	62	43	26	12	16	477
6	Падение деревьев, веток	11	14	18	45	38	70	57	34	29	8	7	17	348
7	Гололедно-ветровые нагрузки, ветер, гололед	13	25	16	17	21	33	31	37	17	45	34	44	333
8	Перекрытие проводов по стороннему предмету	4	3	5	7	10	35	31	17	11	14	4	11	152
9	Атмосферные перенапряжения / гроза	5	2	2	7	9	31	67	45	16	10	0	5	60
10	Повреждение проводов и опор техникой	4	1	1	0	1	1	3	27	5	1	3	1	48
11	Внутреннее повреждение автоматического выключателя	5	0	3	2	4	4	4	4	1	2	1	4	34
12	Падение опоры	0	1	4	7	7	4	4	2	0	2	1	0	32
13	Пробой изолятора	1	0	1	2	2	3	2	1	1	2	3	5	23
14	Окисление контактных соединений	2	8	1	0	2	1	2	2	0	0	0	1	19
15	Превышение стрелы провеса	3	1	0	0	0	3	3	0	0	1	0	0	11
16	Деятельность сторонних лиц	0	0	0	0	1	2	0	1	1	0	1	2	8
17	Деятельность животных и птиц	0	0	0	3	0	0	0	1	1	1	1	0	7
18	Пожар	1	0	0	1	2	0	1	0	0	0	1	0	6
19	Ремонт трансформатора	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	2
Всего		392	417	459	488	829	1193	1322	1011	637	768	511	655	8682

связанное с повышением нагрузки на электрические сети.

Проанализирована длительность перерывов электроснабжения с учетом причин отключений. Диаграмма Парето (рис.) позволила выделить наиболее значимые причины по времени восстановления. Причины, имеющие значимость менее 5%, объединены как «прочие» (позиция 10 на рисунке 1). Структуры причин аварийных отключений по длительности перерывов электроснабжения и количеству отключений практически совпадают.

На рисунке 1 даны значения времени восстановления для соответствующих причин и линий, показана нарастающая сумма времени восстановления по причинам, выраженная в процентах. Все причины в сумме составляют 100%. Суммарное время восстановления с учетом всех причин отключений соответствует 13321,53 ч.

На отключения по вине потребителя приходится примерно 41,4% времени восстановления. Также значимыми являются перегорание предохранителя (12,2%), обрывы проводов (11,8%), схлестывание проводов (8,7%), невыявленные причины (7,5%) и ряд других.

Коэффициенты сезонности по потоку отказов в рассматриваемых сельских электрических сетях 0,4 кВ определялись по методике расчета показателей надежности электроснабжения с учетом сезонности [14].

Согласно методике расчетное количество часов перерыва от аварий на каждом участке сети на заданный сезон определяется как

$$T_{\text{пер ав учіС}} = \frac{T_{\text{Всрі}} \cdot \omega_{0i} \cdot l_i}{100} \cdot \sum_1^{n_{\text{ма}}} \left(\frac{k_{\text{ГТј}} \cdot k_{\text{Гѳј}} \cdot n_{\text{дмај}}}{n_{\text{дмј}}} \right), \quad (1)$$

где l_i – длина участка i , км, или количество оборудования, шт.; $n_{\text{ма}}$ – количество анализируемых месяцев, ед.; $n_{\text{дмај}}$ – количество анализируемых дней в анализируемом конкретном месяце, ед.; $n_{\text{дмј}}$ – количество дней в анализируемом конкретном месяце, ед.; ω_{0i} – параметр потока отказов на 100 км ЛЭП, или на 100 шт. оборудования, год⁻¹; $T_{\text{Всрі}}$ – среднее время восстановления, ч; $k_{\text{ГТј}}$ – коэффициент учета сезонности по времени восстановления, безразм.; $k_{\text{Гѳј}}$ – коэффициент учета сезонности по потоку отказов, безразм. [14].

Вероятность безотказной работы участков сети в течение заданного сезона определяется как

$$P_{\text{безотк ав учіС}} = \frac{t_{\text{чс}} - T_{\text{пер ав учіС}}}{t_{\text{чс}}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{чс}}$ – число часов в сезоне, ч [14].

Сезонные колебания показателей описываются коэффициентами сезонности по потоку отказов и по времени восстановления, которые рассчитываются как отношение фактического значения показателя в конкретном месяце к суммарному количеству отключений за год.

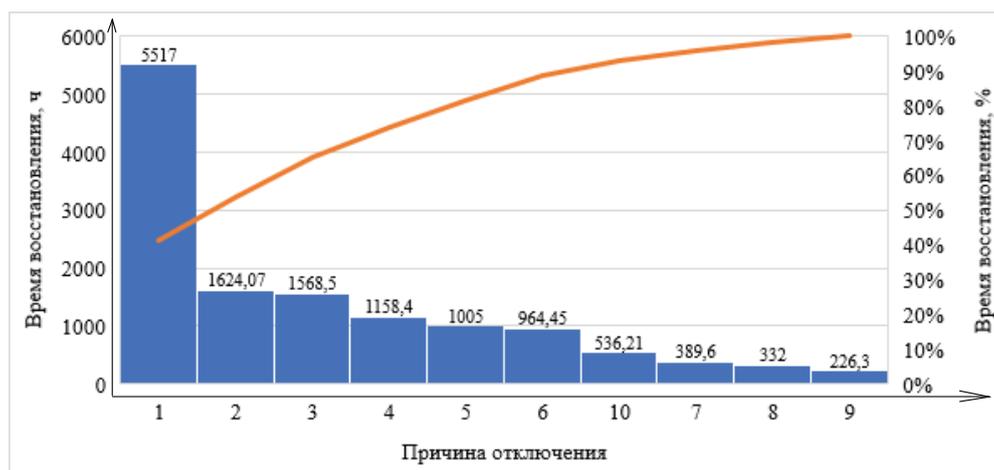


Рис. Диаграмма Парето для определения основных причин аварийных отключений ВЛ 0,4 кВ за период 2018-2023 гг.:

- 1 – потребитель; 2 – перегорание предохранителя; 3 – обрыв провода; 4 – схлестывание проводов; 5 – не выявлено; 6 – падение деревьев, веток; 7 – перекрытие проводов по стороннему предмету; 8 – гололедно-ветровые нагрузки, ветер, гололед; 9 – атмосферные перенапряжения/гроза; 10 – прочие

Fig. Pareto diagram for determining the main causes of emergency outages of 0.4 kV overhead power lines for the period 2018-2023:

- 1 – consumer; 2 – fuse blowing; 3 – wire breakage; 4 – wire splicing; 5 – not identified; 6 – falling trees and branches; 7 – wire overlapping by an outside object; 8 – ice and wind loads, wind, ice; 9 – atmospheric overvoltages / thunderstorm; 10 – others

Коэффициент учета сезонности по потоку отказов определяется как

$$k_{Г_{отj}} = \frac{12 \cdot N_{откл\ мес\ j}}{\Sigma N_{откл}}, \tag{3}$$

где $N_{откл\ мес\ j}$ – количество отключений в j -том анализируемом месяце по статистическим данным, ед.; $\Sigma N_{откл}$ – количество отключений в течение года по статистическим данным.

Коэффициенты сезонности по потоку отказов ($k_{Г_{отj}}$) за период 2018-2023 гг. с учетом причин отключений приведены в таблице 2.

Значения коэффициентов сезонности по потоку отказов с учетом всех причин отключений ($k_{Г_{отj\ общ}}$) определялись для каждого месяца года как среднеарифметическое значение коэффициентов сезонности по потоку отказов, определенных для всех приведенных в таблице 2 причин.

Наибольшая вероятность возникновения аварийного отключения наблюдается в период май-август, коэффициенты сезонности по потоку отказов с учетом всех причин отключений для него находятся в диапазоне 1,15...1,83, средние значения данных

коэффициентов наблюдаются в период с сентября по декабрь (0,71...1,06), а низкие значения – с января по апрель (0,54...0,67).

Коэффициент сезонности по времени восстановления определяется по формуле:

$$k_{Г_{тj}} = \frac{12 \cdot t_{в\ мес\ j}}{\Sigma t_{в}}, \tag{4}$$

где $t_{в\ мес\ j}$ – суммарное время восстановления после отключений в j -том анализируемом месяце по статистическим данным, ч; $\Sigma t_{в}$ – суммарное время восстановления после отключений в течение года по статистическим данным, ч.

Коэффициенты сезонности по времени восстановления ($k_{Г_{тj}}$) для ВЛ 0,4 кВ по месяцам за период 2018-2023 гг. с учетом причин приведены в таблице 3.

Значения коэффициентов сезонности по времени восстановления с учетом всех причин отключений ($k_{Г_{тj\ общ}}$) определялись для каждого месяца года как среднеарифметическое значение коэффициентов сезонности по времени восстановления, определенных для всех причин, приведенных в таблице 3.

Коэффициент сезонности по потоку отказов ($k_{Г_{отj}}$) для ВЛИ 0,4 кВ за период 2018-2023 гг.

Таблица 2

Seasonality coefficient by the failure flow ($k_{Г_{отj}}$) for 0.4 kV overhead power lines for the period 2018-2023

Table 2

Причина отключения	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Потребитель	0,58	0,6	0,56	0,58	1,13	1,6	1,76	1,46	0,90	1,20	0,77	0,85
Перегорание предохранителя	0,41	0,38	0,57	0,55	1,18	2,00	2,00	1,19	0,94	0,98	0,70	1,04
Не выявлено	0,50	0,48	1,22	1,04	1,33	0,93	1,25	1,20	0,60	1,15	0,88	1,40
Схлестывание проводов	0,77	0,56	0,77	0,70	1,45	1,70	2,10	0,83	0,92	0,73	0,60	0,88
Обрыв провода	0,40	0,88	0,68	0,63	1,08	2,21	2,11	1,60	1,08	0,65	0,30	0,40
Падение деревьев, веток	0,38	0,48	0,62	1,55	1,30	2,40	1,97	1,17	1,00	0,27	0,24	0,59
Гололедно-ветровые нагрузки, ветер, гололед	0,47	0,90	0,58	0,61	0,76	1,19	1,12	1,33	0,61	1,62	1,22	1,58
Перекрытие проводов по стороннему предмету	0,31	0,24	0,39	0,55	0,79	2,76	2,45	1,34	0,87	1,10	0,31	0,87
Атмосферные перенапряжения /гроза	0,30	0,12	0,12	0,42	0,54	1,87	1,04	2,71	0,96	0,60	0	0,30
Повреждение проводов и опор техникой	1,00	0,25	0,25	0	0,25	0,25	0,75	6,75	1,25	0,25	0,75	0,25
Внутреннее повреждение автоматического выключателя	1,76	0	1,06	0,70	1,40	1,40	1,40	1,40	0,35	0,70	0,35	1,40
Падение опоры	0	0,37	1,50	2,63	2,63	1,50	1,50	0,75	0	0,75	0,37	0
Пробой изолятора	0,52	0	0,52	1,04	1,04	1,56	1,04	0,52	0,52	1,04	1,56	2,61
Окисление контактных соединений	1,26	5,05	0,63	0	1,26	0,63	1,26	1,26	0	0	0	0,63
Превышение стрелы провеса	3,27	1,09	0	0	0	3,27	3,27	0	0	1,09	0	0
Деятельность сторонних лиц	0	0	0	0	1,50	3	0	1,50	1,50	0	1,50	3,00
Деятельность животных и птиц	0	0	0	5,14	0	0	0	1,71	1,71	1,71	1,71	0
Пожар	2,00	0	0	2,00	4,00	0	2,00	0	0	0	2,00	0
Ремонт трансформатора	0	0	0	6,00	0	0	6,00	0	0	0	0	0
$k_{Г_{т\ общ}}$ (средний с учетом всех причин)	0,54	0,58	0,63	0,67	1,15	1,65	1,83	1,40	0,88	1,06	0,71	0,90

Таблица 3

Коэффициент сезонности по времени восстановления ($k_{ГТ}$) для ВЛИ 0,4 кВ за период 2018-2023 гг.

Table 3

Seasonality coefficient by the restoration time, ($k_{ГТ}$), for 0.4 kV overhead power lines for the period 2018-2023

Причина отключения	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Потребитель	0,43	0,56	0,57	0,62	1,33	1,94	1,86	1,41	0,93	1,08	0,66	0,61
Перегорание предохранителя	0,46	0,37	0,63	0,68	1,10	2,00	1,98	1,00	0,86	0,84	0,81	1,07
Не выявлено	0,46	0,44	1,31	1,07	1,36	1,27	1,64	1,24	0,74	1,10	0,54	0,83
Схлестывание проводов	0,61	0,47	0,85	0,48	1,59	1,59	2,19	1,49	0,87	0,56	0,44	0,85
Обрыв провода	0,29	0,70	0,49	0,48	1,20	2,28	2,68	1,48	0,85	1,00	0,13	0,41
Падение деревьев, веток	0,28	0,49	0,48	1,62	1,45	2,60	2,09	1,02	0,92	0,29	0,18	0,58
Гололедно-ветровые нагрузки, ветер, гололед	0,50	0,50	0,33	4,62	0,47	0,90	0,90	0,81	0,33	1,20	0,59	0,84
Перекрытие проводов по стороннему предмету	0,09	0,49	0,25	0,36	0,02	3,54	2,60	1,36	1,45	0,67	0,42	0,75
Атмосферные перенапряжения /гроза	0,83	0,15	0,11	0,47	1,39	1,26	5,10	1,50	0,89	0,24	0	0,04
Повреждение проводов и опор техникой	1,63	0,30	0,32	0	0,61	0,32	1,54	0,32	5,14	0,37	0,87	0,57
Внутреннее повреждение автоматического выключателя	1,40	0	0,98	1,22	0,39	0,18	4,33	0,88	0,65	0,29	0,19	1,38
Падение опоры	0	0,43	1,10	1,85	2,60	3,02	1,25	0,64	0	0,73	0,37	0
Пробой изолятора	0,09	0	0,32	0,32	1,46	1,68	0,47	0,12	0,19	0,61	2,12	4,6
Окисление контактных соединений	0,97	3,66	0,44	0	1,82	1,29	0,57	1,29	0	0	0	1,96
Превышение стрелы провеса	4,51	0,48	0	0	0	3,62	0,03	0	0	1,36	0	0
Деятельность сторонних лиц	0	0	0	0	3,64	1,63	0	0,84	2,60	0	1,04	2,25
Деятельность животных и птиц	0	0	0	4,40	0	0	0	0,53	2,66	3,44	0,97	0
Пожар	0,02	0	0	0,55	8,00	0	1,34	0	0	0	2,09	0
Ремонт трансформатора	0	0	0	5,55	0	0	6,45	0	0	0	0	0
$k_{ГТ\text{общ}}$ (средний с учетом всех причин)	0,44	0,52	0,62	0,85	1,27	1,92	2,03	1,30	0,88	0,90	0,54	0,71

Продолжительность перерывов электроснабжения по общему показателю (по сумме всех причин) плавно растет с начала года, максимальный пик достигается в июле (рост происходит более чем в 4,5 раза по отношению к январю), затем начинается спад. Большинство причин имеет повышенные коэффициенты сезонности как по потоку отказов, так и по времени восстановления в летние месяцы. При этом ряд причин характерен и для зимних месяцев, имея в это время повышенные коэффициенты сезонности по времени восстановления. К таким причинам относятся повреждение проводов и опор техникой, превышение габарита стрелы провеса, пожар. В данном случае представляется, что превышение стрелы провеса – не вполне корректно указанная в журналах причина. Скорее в зимние месяцы снижается габарит линии ввиду образования снежного покрова на земле и дороге. Это усложняет быстрое восстановление линий. Очевидно, с этим же связано и повышенное значение коэффициентов сезонности по времени восстановления зимой по причине повреждения проводов и опор техникой. Коэффициенты сезонности

по потоку отказов для указанных причин имеют большие значения в летне-осенний период.

Повышенные значения коэффициентов сезонности по потоку отказов и по времени восстановления связаны отчасти и с тем, что наиболее интенсивные кампании по ремонту оборудования сетей проводятся в осенний период, так как электросетевые компании получают соответствующие паспорта готовности к осенне-зимнему периоду. После прохождения этого периода состояние сетей ухудшается, что наряду с такими сезонными факторами, как грозовая активность и ветер, отражается на повышении их аварийности весной и летом. Следовательно, электросетевым компаниям необходимо осуществлять подготовку и к весенне-летнему периоду, осуществляя ремонт оборудования сетей в весенний период.

Приведенные в таблицах 2 и 3 значения коэффициентов сезонности по потоку отказов и по времени восстановления позволяют определить расчетное количество часов перерыва от аварий на каждом участке сети на заданный сезон и вероятность безотказной работы участков сети в течение заданного сезона.

Для этого в формулу (1) подставляются коэффициенты $k_{Г_{\omega_{\text{общ}}}}$, $k_{Г_{Т_{\text{общ}}}}$, являющиеся средними коэффициентами сезонности по потоку отказов и по времени восстановления, соответственно, с учетом всех причин отключений. В случае необходимости определения показателей надежности, связанных с конкретными причинами отключений, в формулу (1) подставляются коэффициенты из таблиц 2 и 3, характерные для данной причины. С учетом полученного количества часов перерыва от аварий на каждом участке сети определяется значение вероятности безотказной работы из формулы (2). Нюансом расчета по причинам отключений является то, что и значение потока отказов (ω_{0i}) в формуле (1) необходимо принимать как не общее, а связанное с рассматриваемой конкретной причиной отключений.

Приведенные в таблицах 2 и 3 значения коэффициентов сезонности по потоку отказов и по времени восстановления справедливы для исследуемых сетей Орловской области. В целях определения их значений для других регионов необходимо провести соответствующий анализ статистической информации по потоку отказов и времени восстановления в сетях данных районов.

Учет сезонности и причин отключений в электрических сетях при расчете показателей надежности – таких, как расчетное количество часов перерыва от аварий на каждом участке сети на заданный сезон и вероятность безотказной работы участков сети в течение заданного сезона, позволяет более точно определять и ущерб от отключений, так как значение ущерба зависит от сезона года. Например, больше ущерба сахарному заводу приносит отключение в осенние месяцы, так как наибольшие объемы производства таких заводов наблюдаются именно в это время.

Учет сезонности и причин отключений позволяет подобрать превентивные мероприятия по повышению надежности электроснабжения. Такими

мероприятиями могут быть, например, своевременная вырубка трасс линий электропередачи в тех районах, где основными причинами являются падение веток, деревьев, оснащение линий средствами секционирования и резервирования, средствами мониторинга, в том числе с применением беспилотных летательных аппаратов, для оперативного выявления рисков повреждений, поврежденных участков сети, и в итоге – для снижения времени восстановления электроснабжения.

Выводы

1. Анализ журналов отключений в сельских электрических сетях показал отсутствие единообразия заполнения графы причины отключений. Рекомендуется разработать и применять в электросетевых компаниях единый классификатор аварийных причин для низковольтных сетей, контролировать корректное заполнение журнала отключений на основании данных за прошедший год и проводить корректировку коэффициентов сезонности по потоку отказов и по времени восстановления.

2. На значения коэффициентов сезонности по потоку отказов и времени восстановления влияют фактическое состояние электрических сетей, проведенные ремонты и реконструкции, объем анализируемой информации по потокам отказов и времени восстановления электроснабжения (выборка).

3. Коэффициенты сезонности как по потоку отказов, так и по времени восстановления, с учетом всех причин отключений имеют максимальные значения в летне-осенний период. Большинство причин имеет повышенные коэффициенты сезонности по потоку отказов и времени восстановления также в летние месяцы. Следовательно, электросетевым компаниям необходимо осуществлять подготовку к весенне-летнему периоду, выполняя анализ состояния и ремонт оборудования сетей весной.

Список источников

1. Морозова Н.С. Исследование возможности аналитических систем для анализа и прогнозирования сезонной неравномерности электропотребления предприятий // Актуальные вопросы энергетики. 2020. Т. 2, № 1. С. 5-10. EDN: JLYOQ
2. Абдурахманов А.М., Володин М.В., Зыбин Е.Ю., Рябченко В.Н. Методы прогнозирования электропотребления в распределительных сетях (обзор) // Электротехника: Сетевой электронный научный журнал. 2016. Т. 3, № 1. С. 3-23. EDN: VOXROF
3. Соловьева И.А., Дзюба А.П. Управление спросом на электроэнергию в России: состояние и перспективы // Вестник Самарского государственного экономического университета, 2017. № 3 (149). С. 53-62. EDN: YJTXIB
4. Непомнящий В.А. Оптимизация надежности Крымской энергосистемы на период до 2025 года при ее

References

1. Morozova N.S. Research of possibility of analytical systems for analysis and forecasting of seasonal change of electrical consumption of enterprises. *Aktualnye Voprosy Energetiki*. 2020;2(1):5-10. (In Russ.)
2. Abdurakhmanov A.M., Volodin M.V., Zybin E.Yu., Ryabchenko V.N. Forecasting methods in electricity distribution networks (review). *Elektrotehnika: Setevoy Nauchniy Zhurnal*. 2016;3(1):3-23. (In Russ.)
3. Solovieva I.A., Dzyuba A.P. Electricity demand management in Russia: current state and prospects. *Vestnik of Samara State University of Economics*. 2017;3:53-62. (In Russ.)
4. Nepomnyashchiy V.A. Optimization of the reliability of the Crimean energy system for the period up to 2025 when connecting it to the IPS of the South. *Energoexpert*. 2018;2:10-24. (In Russ.)

присоединении к ОЭС Юга // Энергоэксперт. 2018. № 2 (66). С. 10-24. EDN: MGTPCX

5. Виноградов А.В., Шабаев М.М., Юдкин Р.С. Некоторые статистические данные о составе распределительных электрических сетей на примере Кондровского РЭС // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: Материалы XVII Международной научно-практической конференции, Орёл, 2-4 декабря 2019 г. Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2019. С. 196-201. EDN: MLBAJQ

6. Комаров М.Ю. Оценка технического состояния и уровня эксплуатации оборудования предприятий распределительного комплекса Дальневосточного региона на основе статистического анализа отключений энергетического оборудования // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Сборник трудов Седьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Благовещенск, 4-6 июня 2013 г. Благовещенск: Амурский государственный университет, 2013. С. 318-322. EDN: SAJQVP

7. Большев В.Е., Виноградова А.В. Анализ влияния параметров ЛЭП 110 кВ на вероятность их отказов // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2024. Т. 17, № 6. С. 758-776. EDN: FFDERV

8. Сбитнев Е.А., Жужин М.С. Анализ аварийности сельских электрических сетей 0,38 кВ нижегородской энергосистемы // Вестник НГИЭИ. 2020. № 11 (114). С. 36-47. EDN: KEJHDX

9. Наумов И.В., Полковская М.Н. Анализ работы электрических сетей Облкоммунэнерго Иркутской области в 2019 году // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2021. № 5 (199). С. 118-126. EDN: NUWCDT

10. Васильева Т.Н., Лопатин Е.И. Анализ причин отказов электрического оборудования распределительных сетей 0,38...10 кВ // Вестник Рязанского государственного агрологического университета им. П.А. Костычева. 2011. № 3 (11). С. 64-66. EDN: OFSKQV

11. Breido I., Kaverin V., Ivanov V. Telemetric monitoring insulation condition of high voltage overhead power lines // Автоматика. Информатика. 2019. № 2 (45). С. 48-57. EDN: HINHUZ

12. Белов С.И., Петров П.С. Прогнозирование внезапных отключений в электрических сетях 35-220 кВ на ближайший год // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2018. № 6. С. 53-58. EDN: SAHRMT

13. Виноградова А.В., Виноградов А.В. Анализ плановых и аварийных отключений в сельских электрических сетях 0,4 кВ // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2024. Т. 71, № 3. С. 44-51. EDN: VRFTOI

14. Виноградова А.В., Виноградов А.В. Методика расчета показателей надежности электроснабжения с учетом сезонности // Техника и оборудование для села. 2023. № 6 (312). С. 39-44. EDN: KWTQWK

5. Vinogradov A.V., Shabaev M.M., Yudkin R.S. Some statistical data on the composition of distribution electric networks on the example of Kondrovsky RES. *Energo i resursosberezhenie – XXI vek: Proceedings of the XVII International scientific and practical conference*, Orel, December 02-04, 2019. Orel: Orel State University named after I.S. Turgenev, 2019. Pp. 196-201. (In Russ.)

6. Komarov M.Yu. Assessing the technical condition and performance level of the equipment of distribution complex enterprises operating in the Far Eastern region based on the statistical analysis of power equipment outages. *Energetika: Upravleniye, Kachestvo i Effektivnost Ispolzovaniya Energoresursov: proceedings of the 7th All-Russian scientific and technical conference with international participation*, Blagoveshchensk, June 4-6, 2013. Amur State University. Blagoveshchensk: Amur State University, 2013. Pp. 318-322. (In Russ.)

7. Bolshev V.E., Vinogradova A.V. Analysis of the influence of 110 kV power line parameters on the probability of their failures. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2024;17(6):758-776. (In Russ.)

8. Sbitnev E.A., Zhuzhin M.S. Accident rate analysis of rural electric networks 0.38 kV of the Nizhny Novgorod power system. *Vestnik NGIEI*. 2020;11:36-47. (In Russ.)

9. Naumov I.V., Polkovskaya M.N. The analysis of the operation of electric networks of the Oblkommunenergo of the Irkutsk region in 2019. *Vestnik Altaiskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2021;5:118-126. (In Russ.)

10. Vasilyeva T.N., Lopatin E.I. The analysis of causes of failures of the electric equipment of distributive networks 0,38...10 kV. *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev*. 2011;3:64-66. (In Russ.)

11. Breido I., Kaverin V., Ivanov V. Telemetric monitoring insulation condition of high voltage overhead power lines. *Automation. Informatics*. 2019;2:48-57.

12. Belov S.I., Petrov P.S. The prediction of sudden outages in electrical networks 35-220 kV for the coming year. *Electrooborudovanie: Ekspluatatsiya i Remont*. 2018;6:53-58. (In Russ.)

13. Vinogradova A.V., Vinogradov A.V. Analysis of planned and emergency outages in rural electrical grids 0.4 kV. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2024;71(3):44-51. (In Russ.)

14. Vinogradova A.V., Vinogradov A.V. Methodology for calculating indicators of reliability of power supply, taking into account seasonality. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;6:39-44. (In Russ.)

Информация об авторе

^{1,2} Виноградова Алина Васильевна, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; alinawin@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8935-7086>; SPIN-код: 8836-8684, AuthorID: 717846

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

² Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина; 302019, Российская Федерация, г. Орёл, Генерала Родина ул., д. 69

Author Information

Alina V. Vinogradova^{1,2}, CSc (Eng), Lead Research Engineer; alinawin@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8935-7086>

¹ Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 1st Institutsky Proezd Str., 5, Moscow, 109428, Russia

² Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin; Generala Rodina Str., 69, Orel, 302019, Russia

Статья поступила 22.10.2024, после рецензирования и доработки 17.03.2025; принята к публикации 18.03.2025

Received 22.10.2024; Revised 17.03.2025; Accepted 18.03.2025

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.

Финансирование. 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 подрисовочную подпись, в которой даётся объяснение всех его элементов.

3. **Таблицы** должны иметь сквозную нумерацию и заголовки. К таблицам и рисункам необходим англоязычный перевод подрисовочных 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 источников** 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