



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

# АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Научный журнал

Том 28. № 2 / 2026

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](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. Лаверова*  
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](mailto: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 21.04.2026  
Формат 60 84/8  
Тираж 500 экз.

© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА  
имени К.А. Тимирязева, 2026

## 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](mailto: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](mailto: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>, [oleonov@rgau-msha.ru](mailto:oleonov@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](mailto:kubrushko@rgau-msha.ru)

## Редакционная коллегия:

**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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto:s.devyanin@rgau-msha.ru)

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

**Тамара Петровна Кобозева**, д-р с.-х. наук, профессор ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (г. Москва, Россия), [tkobozeva@rgau-msha.ru](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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.storchevov@rgau-msha.ru](mailto:v.storchevov@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](mailto: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](mailto:etsh1965@mail.ru)

**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@gambler.ru](mailto:abdyrov@gambler.ru)

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

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

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



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

# AGRICULTURAL ENGINEERING (MOSCOW)

Scientific Journal

Vol. 28(2)/2026

## 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  
gosudarstvenniy agroinzhenerniy universitet  
imeni V.P. Goryachkina"] was renamed  
and registered under a new title  
on March 6, 2020.

Full versions are posted on the site  
[https://www.elibrary.ru/title\\_profile.asp?id=8505](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](mailto: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 21.04.2026

Format – 60 84/8

Circulation – 500 copies.

© Federal State Budgetary Establishment  
of Higher Education – Russian State  
Agrarian University – Moscow Timiryazev  
Agricultural Academy, 2026

## 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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto:kubrushko@rgau-msha.ru)

## 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](mailto: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](mailto: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](mailto:a.apatenko@rgau-msha.ru)

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

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

**Vladimir F. Storchevoy**, 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.storchevoy@rgau-msha.ru](mailto:v.storchevoy@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](mailto: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](mailto:etsh1965@mail.ru)

**Aytzhan M. Abdyyrov**, DSc (Ed), Professor, S. Seifullin Kazakh Agro Technical University, (Nur-Sultan, Kazakhstan), <https://orcid.org/0000-0002-6852-0235>, [abdyrov@rambler.ru](mailto:abdyrov@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.auramenka@bsatu.by](mailto:pavel.auramenka@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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto:quanghoang1510@gmail.com)

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

<b>С.С. Воложанинов, Н.В. Алдошин, А.А. Завалий, Д.Д. Волобуев</b> Сравнительный анализ эффективности тепловой обработки слоя почвы СВЧ-излучателями различных типов волноводов .....	4
<b>В.П. Дашевский, М.М. Бизин, Ю.В. Галькин, А.Л. Ронжин</b> Складной роликовый конвейер для автоматизированной системы сервисного обслуживания сельскохозяйственных беспилотных летательных аппаратов .....	15
<b>М.В. Беляков, Е.А. Никитин, Д.С. Пятченко</b> Определение содержания сырого протеина в жмыхах по потокам фотолуминесценции .....	28
<b>В.П. Лапик, И.П. Адылин, А.Е. Кузнецов, П.В. Лапик, А.В. Дьяченко, О.В. Кубаткина</b> Исследование давления на почву треугольного неопдресоренного гусеничного движителя с опорным обводным колесом и внешней амортизацией .....	36

### ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

<b>Д.К. Хоанг, В.Г. Ву, С.М. Гайдар, А.М. Пикина, А.Е. Мукинов, А.Ю. Алипичев</b> Изучение антикоррозионных свойств карбоксилатного ингибитора в составе охлаждающей жидкости .....	47
<b>М.Н. Ерохин, А.Г. Пастухов, Е.П. Тимашов, С.П. Казанцев, С.Ф. Вольвак, М.И. Волков</b> Критериальное обоснование выбора технических средств для способа приварки ремонтной детали к диску сошника .....	56
<b>Д.М. Скороходов</b> Применение аддитивных технологий при изготовлении ножей смесителей-кормораздатчиков .....	67
<b>Ю.В. Катаев, А.В. Чавдаров</b> Перспективы применения технологии 3D-печати сваркой в сельском хозяйстве .....	77

### ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

<b>Д.Д. Медведев, В.И. Грищенко</b> Автоматизированная система регулирования давления пара пароплазменного горелочного устройства систем отопления сельскохозяйственных предприятий .....	84
<b>Г.В. Никитенко, С.Н. Антонов, М.А. Мастепаненко, И.В. Каланчук</b> Линейный электродвигатель для электрифицированного сепаратора .....	92
<b>Е.А. Ивлиев, В.И. Грищенко</b> Регулирование зазора молотильно-сепарирующего устройства комбайна с использованием электрогидравлического привода на основе кинематического анализа .....	103

### ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

<b>П.И. Ананченкова</b> Разработка адаптивно-компетентностной модели корпоративного обучения работников старших возрастных групп на предприятиях агропромышленного комплекса .....	114
---	-----

## CONTENTS

### FARM MACHINERY AND TECHNOLOGIES

<b>S.S. Volozhaninov, N.V. Aldoshin, A.A. Zavaliy, D.D. Volobuev</b> Comparative analysis of the efficiency of thermal treatment of the soil layer with microwave emitters of various waveguide types .....	4
<b>V.P. Dashevsky, M.M. Bizin, Yu.V. Galykin, A.L. Ronzhin</b> Folding roller conveyor for an automated servicing system of agricultural unmanned aerial vehicles .....	15
<b>M.V. Belyakov, E.A. Nikitin, D.S. Pyatchenkov</b> Determination of crude protein content in oilcakes by photoluminescence fluxes .....	28
<b>V.P. Lapik, I.P. Adylin, A.E. Kuznetsov, P.V. Lapik, A.V. Dyachenko, O.V. Kubatkina</b> Study on the soil pressure of a triangular unsprung crawler propulsion system with a supporting bypass wheel and external shock absorption .....	36

### TECHNICAL SERVICE IN AGRICULTURE

<b>D.K. Quang, V.G. Huy, S.M. Gaidar, A.M. Pikina, A.E. Mukinov, A.Yu. Alipichev</b> Study of the anticorrosion properties of a carboxylate inhibitor in a coolant formulation .....	47
<b>M.N. Erokhin, A.G. Pastukhov, E.P. Timashov, S.P. Kazantsev, S.F. Volvak, M.I. Volkov</b> Criterion-based selection of technical means for welding a repair part to the coulter disk .....	56
<b>D.M. Skorokhodov</b> Application of innovative technologies in the production of knives for feed mixers and dispensers .....	67
<b>Yu.V. Kataev, A.V. Chavdarov</b> Prospects for the application of 3D printing by welding in agriculture .....	77

### POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION

<b>D.D. Medvedev, V.I. Grishchenko</b> Automated steam pressure control system for steam-plasma burners in heating systems of agricultural enterprises .....	84
<b>G.V. Nikitenko, S.N. Antonov, M.A. Mastepanenko, I.V. Kalanchuk</b> Linear electric motor for an electric pruner .....	92
<b>E.A. Ivliev, V.I. Grishchenko</b> Electro-hydraulic control of concave clearance in combine harvesters based on kinematic analysis .....	103

### THEORY AND METHODOLOGY OF PROFESSIONAL EDUCATION

<b>P.I. Ananchenkova</b> Development of an adaptive competence model for corporate training of employees of older age groups at agro-industrial enterprises .....	114
---	-----

# ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 632.08

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-4-14>

## Сравнительный анализ эффективности тепловой обработки слоя почвы СВЧ-излучателями различных типов волноводов

*С.С. Воложанинов*<sup>1</sup>, *Н.В. Алдошин*<sup>2</sup>, *А.А. Завалий*<sup>3</sup>, *Д.Д. Волобуев*<sup>4</sup><sup>1,3,4</sup> Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского; г. Симферополь, Россия<sup>2</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия<sup>1</sup> [s.volozhaninov@mail.ru](mailto:s.volozhaninov@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-6686-1220><sup>2</sup> [naldoshin@yandex.ru](mailto:naldoshin@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532><sup>3</sup> [zavalym@mail.ru](mailto:zavalym@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-0806-1110><sup>4</sup> [volobyev99@mail.ru](mailto:volobyev99@mail.ru)

**Аннотация.** Сверхвысокие частоты (СВЧ) электромагнитного излучения, воздействуя на слой почвы, способны угнетать микроорганизмы, яйца и личинки насекомых на глубину проникновения СВЧ-излучения в почву. Эффективность тепловой обработки слоя почвы определяется типом волновода СВЧ-излучателя. Исследования проведены с целью выбора наиболее эффективного типа волновода СВЧ-излучателя. В качестве волноводов рассматривали камеру стоячей волны, камеру бегущей волны и камеру лучевого типа. С использованием вычислительных моделей COMSOL Multiphysics выполнено моделирование теплового воздействия СВЧ-излучения на слой почвы глубиной 100 мм, влажностью 5, 10 и 20%. В зависимости от типа волновода изменяли размер облучаемого участка поверхности почвы от 40 × 88 до 134 × 201 мм и мощность источника излучения (антенна магнетрона) – от 650 до 5000 Вт при частоте излучения 2450 МГц. Моделирование воздействия СВЧ-излучения показало, что при тепловой обработке контакт волновода с почвой является необязательным. Эффективность СВЧ-излучения увеличивается с повышением влажности почвы, но при этом наблюдается неравномерность нагрева слоя почвы в объеме. В результате сравнительного анализа эффективности тепловой обработки слоя почвы СВЧ-излучателями с различными волноводами выявили, что на почве влажностью 10...20% является более предпочтительным использование волновода с камерой бегущей волны, передающего слою почвы 72...88% энергии источника излучения, и поглощается 60...85% энергии источника излучения. Высокий уровень мощности волновода и мощности нагрева, а также высокий уровень равномерности нагрева слоя почвы обеспечиваются при использовании волновода с камерой бегущей волны и влажности почвы 10%. Результаты моделирования подлежат экспериментальной проверке и послужат основой для разработки СВЧ-излучателя для тепловой обработки слоя почвы в теплицах и парниках.

**Ключевые слова:** слой почвы; СВЧ; СВЧ-излучатель; волновод; моделирование теплового воздействия СВЧ-излучения; эффективность тепловой обработки слоя почвы; эффективность СВЧ-излучения

**Для цитирования:** Воложанинов С.С., Алдошин Н.В., Завалий А.А., Волобуев Д.Д. Сравнительный анализ эффективности тепловой обработки слоя почвы СВЧ-излучателями различных типов волноводов // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 2. С. 4-14. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-4-14>

## ORIGINAL ARTICLE

## Comparative analysis of the efficiency of thermal treatment of the soil layer with microwave emitters of various waveguide types

S.S. Volozhaninov<sup>1</sup>✉, N.V. Aldoshin<sup>2</sup>, A.A. Zavaliiy<sup>3</sup>, D.D. Volobuev<sup>4</sup>

<sup>1,3,4</sup> V.I. Vernadsky Crimean Federal University; Simferopol, Russia

<sup>2</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia

<sup>1</sup> s.volozhaninov@mail.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-6686-1220>

<sup>2</sup> naldoshin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>

<sup>3</sup> zavalym@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0806-1110>

<sup>4</sup> volobuev99@mail.ru

**Abstract.** Ultra-high frequency (UHF) microwave radiation can effectively suppress soil microorganisms, insect eggs, and larvae within the depth of radiation penetration. Since the efficiency of thermal soil treatment is largely determined by the emitter's configuration, this study aimed to identify the most effective waveguide type. Three designs were evaluated – standing wave, traveling wave, and beam-type chambers. Using COMSOL Multiphysics, the authors simulated the thermal effects of microwave radiation on a 100 mm soil layer with moisture levels of 5%, 10%, and 20%. Depending on the waveguide type, the irradiated surface area varied from 40 × 88 mm to 134 × 201 mm, with magnetron antenna power ranging from 650 to 5000 W at a frequency of 2450 MHz. The simulations demonstrated that direct contact between the waveguide and the soil is unnecessary for effective treatment. While microwave efficiency increases with soil moisture, higher moisture levels also lead to non-uniform volumetric heating. Comparative analysis revealed that for soil moisture between 10% and 20%, the traveling wave chamber is the superior choice, transmitting 72-88% of source energy and achieving 60-85% energy absorption. Optimal performance, characterized by high power output and heating uniformity, was observed using a traveling wave chamber at 10% soil moisture. These simulation results, pending experimental verification, provide a foundation for developing specialized microwave systems for thermal soil treatment in greenhouses and hotbeds.

**Keywords:** soil layer; microwave; microwave emitter; waveguide; simulation of the thermal effect of microwave radiation; efficiency of thermal treatment of the soil layer; efficiency of microwave radiation

**For citation:** Volozhaninov S.S., Aldoshin N.V., Zavaliiy A.A., Volobuev D.D. Comparative analysis of the efficiency of thermal treatment of the soil layer with microwave emitters of various waveguide types. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(2):4-14 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-4-14>

### Введение

К перспективным и активно развивающимся агротехнологиям относятся технологии обеззараживающей обработки почвы в теплицах и парниках без применения химических средств<sup>1</sup> [1, 2]. К ним, в частности, относятся технологии теплового обеззараживания [3, 4], в которых к угнетению и гибели патогенных микроорганизмов приводит нагрев слоя почвы, осуществляемый подводом тепловой энергии, энергии электрического тока или электромагнитного излучения [5, 6], в том числе в диапазоне сверхвысоких частот [7, 8]. Использование сверхвысоких частот (СВЧ) электромагнитного излучения имеет ряд преимуществ по сравнению с другими механическими [9, 10] и тепловыми методами [11, 12]: оказывает действие на слой почвы на глубину проникновения СВЧ-излучения без внедрения органов обработки

в массив почвы, обладает угнетающим действием на широкий спектр микроорганизмов, яйца и личинки насекомых [13, 14], благодаря термическому и олиготермическому эффектам [15, 16], имеет наименьшие по сравнению с другими тепловыми методами обработки потери энергии, так как вся сгенерированная энергия излучения попадает внутрь слоя почвы [17, 18]. Потери энергии СВЧ-обработки определяются только потерями самих СВЧ-излучателей. Выбор СВЧ-излучателя для нагрева слоя почвы осуществляется на основании показателей качества обработки слоя почвы, к которым относятся:

- температура слоя после нагрева в течение заданного промежутка времени при заданной мощности источника излучения (оценка среднего значения температуры слоя почвы и дисперсия температуры слоя почвы);
- глубина прогрева слоя почвы до заданного значения температуры;
- пространственная локализация области нагрева слоя почвы;

<sup>1</sup> Методы физического обеззараживания почвы. URL: <https://rukav22.ru/c/metody-obezzarajivaniya-pochvy>. (дата обращения: 22.11.2024).

– энергетическая эффективность тепловой обработки слоя почвы (отношение передаваемой по волноводу энергии электромагнитного излучения к энергии, излучаемой антенной магнетрона, и отношение поглощенной слоем почвы энергии электромагнитного излучения к излучаемой антенной магнетрона энергии электромагнитного излучения)<sup>2</sup> [19].

Рассматриваемые в статье излучатели представляют собой СВЧ-излучатели с волноводом, включающим в себя камеру со стоячей волной (КСВ), камеру с бегущей волной (КБВ) и камеру лучевого типа (КЛТ) (рис. 1).

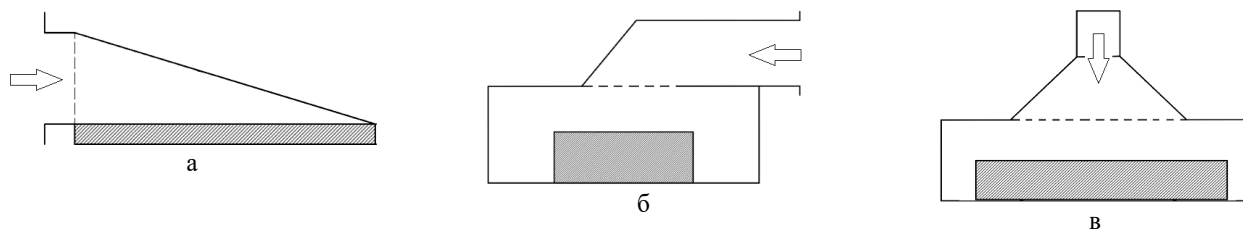
Из теории волноводов<sup>3,4,5</sup> известно, что передаваемый по волноводу поток энергии электромагнитного излучения представляет собой векторную сумму потока энергии излучения антенны магнетрона и потока отраженной от поверхности раздела среды волновода и поглощающей излучение среды. В случае СВЧ-воздействия на слой почвы средой волновода

выступает воздух, а средой поглощения – почва. В камерах со стоячей волной поток отраженной энергии, как правило, выше, чем в камерах лучевого типа и в камерах с бегущей волной<sup>6</sup>.

**Цель исследований:** сравнение показателей СВЧ-излучателей с волноводами, выполненных в виде камер стоячей и бегущей волны и лучевого типа, для определения энергетической эффективности тепловой обработки слоя почвы.

**Материалы и методы**

Инструментом исследований является конечно-элементный программный комплекс для решения мультифизических задач COMSOL Multiphysics<sup>7</sup>. Для анализа выбрана глубина слоя почвы, равная 100 мм. Размеры облучаемого участка поверхности почвы составляют от 40 × 88 до 134 × 201 мм в зависимости от типа волновода. Теплофизические и электромагнитные свойства почвы приведены в таблице. На рисунке 2 представлены проекционные



**Рис. 1. Схемы волноводов для нагрева диэлектрических материалов:**

а – камера со стоячей волной (КСВ); б – камера с бегущей волной (КБВ); в – камера лучевого типа (КЛТ)

**Fig. 1. Waveguide designs for heating dielectric materials:**

a – a standing wave chamber (SWC); b – a traveling wave chamber (TWC); c – a beam-type chamber (BTC)

**Свойства почвы, принятой к моделированию**

Таблица

**Table of soil properties used for modeling**

Table

№	Свойства почвы					
	Влажность почвы, %	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость, Дж/(кг · К)	Теплопроводность, Вт/(м · К)	Относительная диэлектрическая проницаемость <sup>8</sup>	Электрическая проводимость, См/м <sup>9</sup>
1	5	1100	1150	0,8	3	0,005
2	10	1200	1250	0,85	15	0,1
3	20	1300	1350	0,9	30	0,5

<sup>2</sup> Электропрогрев грунта. Стройматериалы: сайт. URL: <http://www.stroimt.ru/warminggront/?ysclid=mff8spiepl564357313> (дата обращения: 11.09.2025).

<sup>3</sup> Левин Л. Современная теория волноводов: методы решения волноводных задач / Пер. с англ.; Под ред. В.И. Вольмана. М.: Радио и связь, 1981. 311 с.

<sup>4</sup> Архангельский Ю.С. Справочная книга по СВЧ электротермии. Саратов: Научная книга, 2011. 559 с.

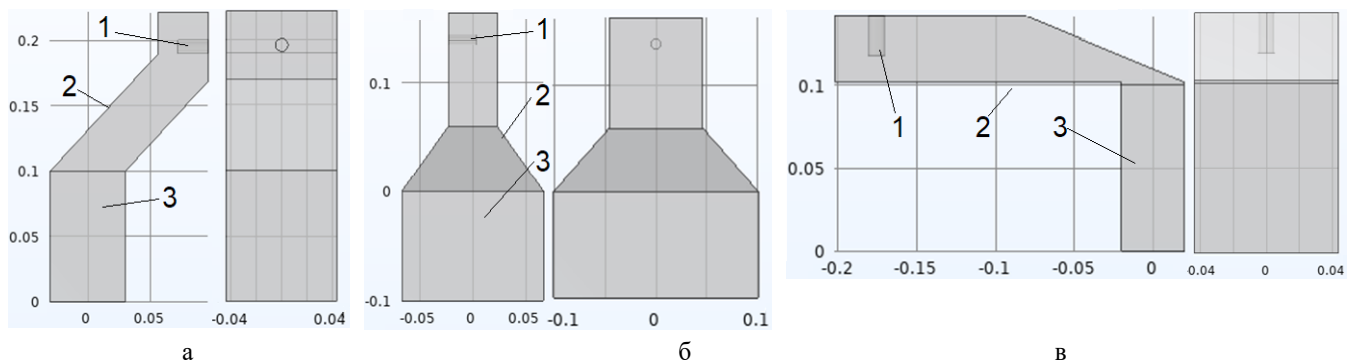
<sup>5</sup> Архангельский Ю.С., Колесников Е.В. Камеры с бегущей и со стоячей волной. Саратов: Буква, 2015. 230 с.

<sup>6</sup> Архангельский Ю.С., Тригорлый С.В. СВЧ электротермические установки лучевого типа. Саратов, 2000. 122 с.

<sup>7</sup> Курушин А.А. Решение мультифизических СВЧ задач с помощью САПР COMSOL. М.: One-Book, 2016. 376 с

<sup>8</sup> Электронный ресурс. Режим доступа: <https://konspekta.net/studopedianet/baza7/572746186364.files/image085.png> (дата обращения: 09.10.2025).

<sup>9</sup> Электронный ресурс. Режим доступа: [https://studfile.net/html/1334/288/html\\_SzT016FBAL.l0og/img-ummcB6.png](https://studfile.net/html/1334/288/html_SzT016FBAL.l0og/img-ummcB6.png) (дата обращения: 09.10.2025).



**Рис. 2. Геометрия рассматриваемых волноводов:**

а – камера со стоячей волной (КСВ); б – камера с бегущей волной (КБВ); в-камера лучевого типа (КЛТ); 1 – антенна магнетрона (диаметр – 10 мм, высота – 24 мм); 2 – волновод; 3 – слой почвы

**Fig. 2. Geometry of the waveguides under consideration:**

а – a standing wave chamber (SWC); б – a traveling wave chamber (TWC); в – a beam-type chamber (BTC); 1 – magnetron antenna (diameter 10 mm, height 24mm); 2 – waveguide; 3 – soil layer

изображения волноводов со слоем почвы: волновод КСВ с наклонным каналом (а), рупорный волновод КЛТ (б), волновод с камерой бегущей волны КБВ (в), угол положения наклонной поверхности – 24°. Для волновода КБВ рассмотрено три варианта угла положения наклонной поверхности: 10, 24 и 45°. Мощность источника излучения (антенны магнетрона) выбрана пропорционально объему слоя почвы: 100 × 60 × 88 мм – волновод КСВ (мощность 1000 Вт); 100 × 134 × 201 мм – волновод КЛТ (мощность 5000 Вт); 100 × 40 × 88 мм – волновод КБВ (мощность 670 Вт). Начальная температура слоя почвы – 20°C. Поверхности волновода и слоя почвы теплоизолированы от окружающей среды.

### Результаты и их обсуждение

Представление о пространственной локализации области нагрева слоя почвы влажностью 5, 10 и 20% дают карты изолиний температуры слоя почвы после 60 с нагрева СВЧ-излучателем с волноводом КСВ, КБВ и КЛТ (рис. 3).

На рисунке 4 даны гистограммы распределения температуры в слое почвы для расчетов нагрева почвы СВЧ-излучателями, представленных на рисунке 3. На рисунке 5 отображены средние значения температуры слоя и рассеяние (С.К.О.) в слое почвы, на рисунке 6 – доля объема слоя почвы с температурой более 60°C.

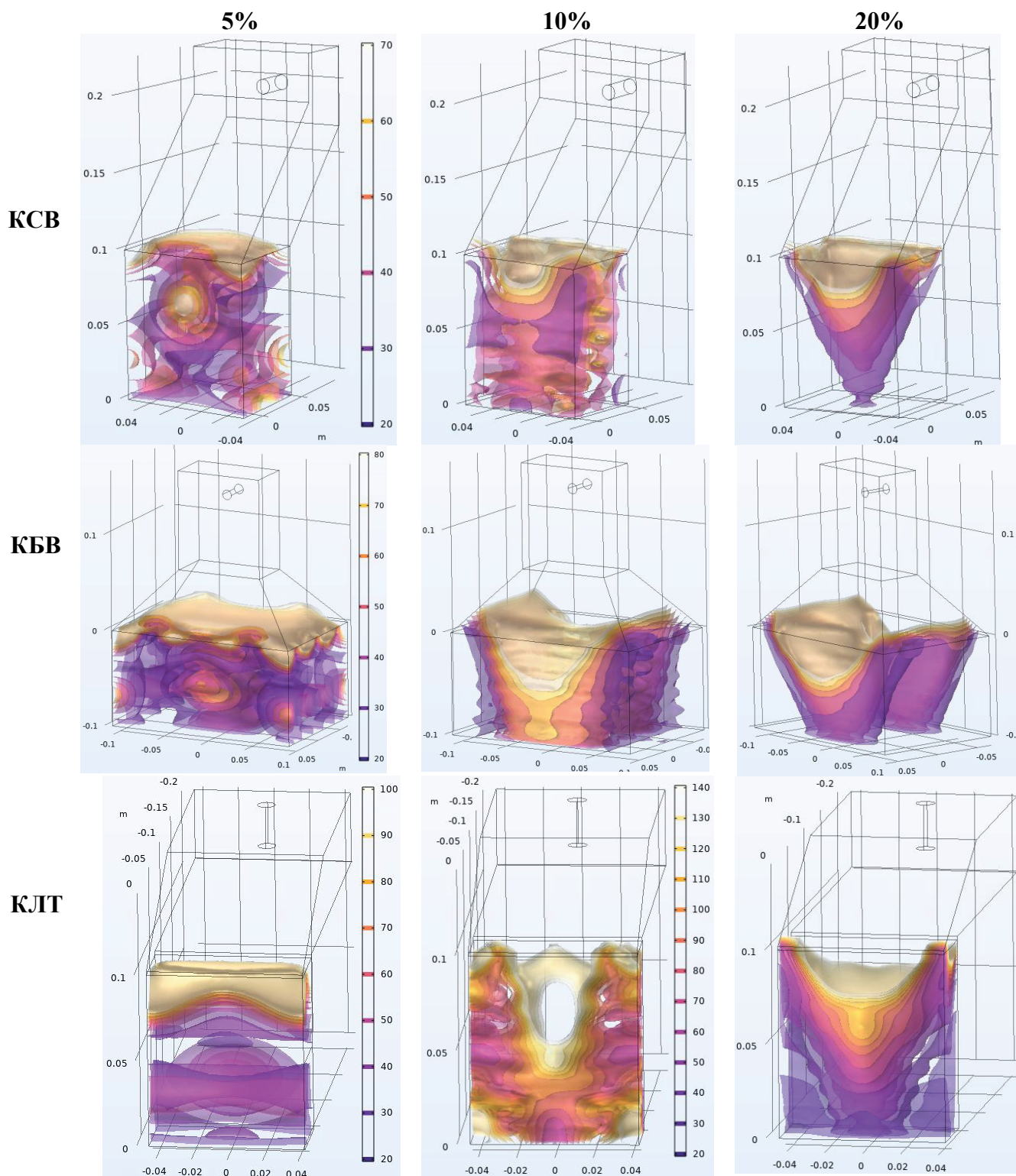
Карты изолиний нагрева слоя почвы показывают, что поток энергии электромагнитного излучения волноводами направлен в основном вниз по вертикальной оси симметрии слоя почвы. Волновод с наклонным каналом и волновод с камерой бегущей волны направляют поток энергии вниз с незначительным уклоном к передней стенке слоя почвы, волновод с камерой лучевого типа разделяет поток энергии

на два, образуя в центральной части слоя почвы область пониженной температуры.

Гистограммы на рисунке 4 позволяют сделать вывод о том, что наибольшая равномерность прогрева наблюдается в случае волновода КСВ и волновода КБВ при влажности почвы 10%: максимум частоты значений температуры в расчетных узлах слоя почвы близок к среднему значению температуры в слое. Чем меньше рассеяние значений температуры в узлах слоя почвы от среднего значения, тем более равномерным является прогрев всего слоя. Значения средних величин температуры в объеме слоя почвы и величин рассеяния относительно средних, приведенные на рисунке 5, подтверждают высокую равномерность прогрева для волноводов КСВ и КБВ при влажности почвы 10%: величина С.К.О. меньше среднего значения в 1,8...2,2 раза. Значения средних температур нагрева слоя почвы показывают, что нагрев с использованием волновода КБВ в 2,5 раза больше нагрева волноводом КСВ и в 2 раза больше нагрева волноводом КЛТ. Доля объема слоя почвы с температурой более 60°C при нагреве волноводом КБВ в 2,5...3 раза выше, чем при использовании волноводов КСВ и КЛТ (рис. 6).

Меньшая доля отраженного от почвы излучения, направленного на источник (антенну магнетрона), – основа энергетического преимущества волновода КБВ перед волноводами КСВ и КЛТ. Доля мощности, передаваемой по каналу магнетрона электромагнитной энергии (мощность волновода), и доля поглощаемой слоем почвы энергии (мощность нагрева) от излучаемой антенной магнетрона мощности в зависимости от влажности почвы представлены на рисунке 7.

Из диаграммы следует, что мощность волновода КСВ составляет не более 45% от генерируемой



**Рис. 3. Карты изолиний нагрева слоя почвы влажностью 5, 10, 20% различными волноводами в течение 60 с**  
**Fig. 3. Isothermal distribution maps in the soil layer (5%, 10%, and 20% moisture) for different waveguide configurations after 60 s of exposure**

источником излучения мощности, мощность волновода КЛТ – 65%, а волновода КБВ – 85...87%. Доля поглощенной слоем почвы энергии увеличивается с ростом влажности почвы. На диаграмме (рис. 7) приведены данные для случая размещения под слоем почвы металлической пластины для

отражения излучения, проходящего сквозь слой почвы. При сухой почве (влажность 5%) металлическая пластина позволяет повысить долю мощности волновода КСВ (на диаграмме обозначен как КСВм) до значений для волновода КБВ; при более влажной почве доля мощности волновода

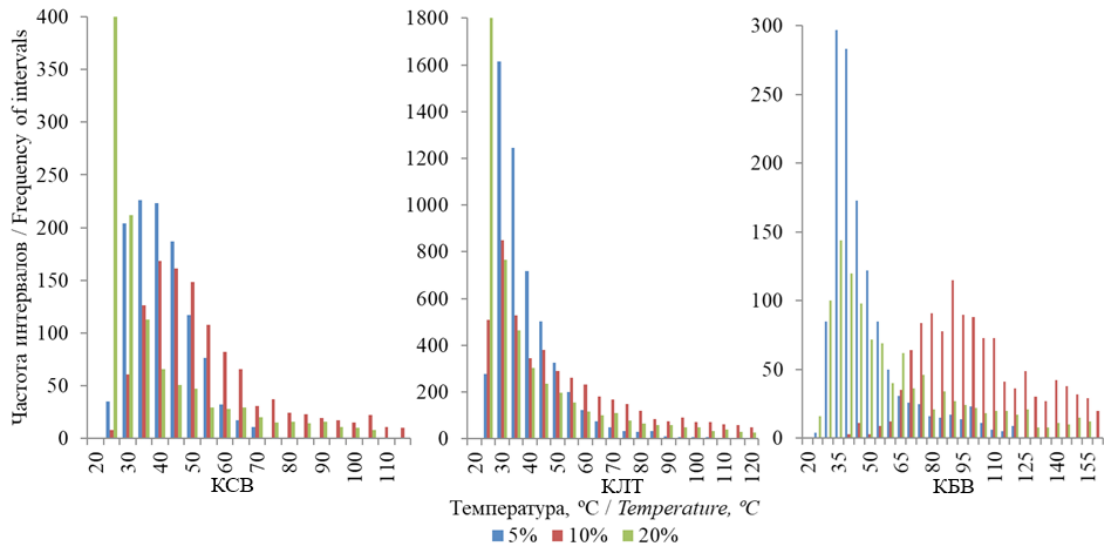


Рис. 4. Распределение температуры в слое почвы

Fig. 4. Temperature distribution in the soil layer

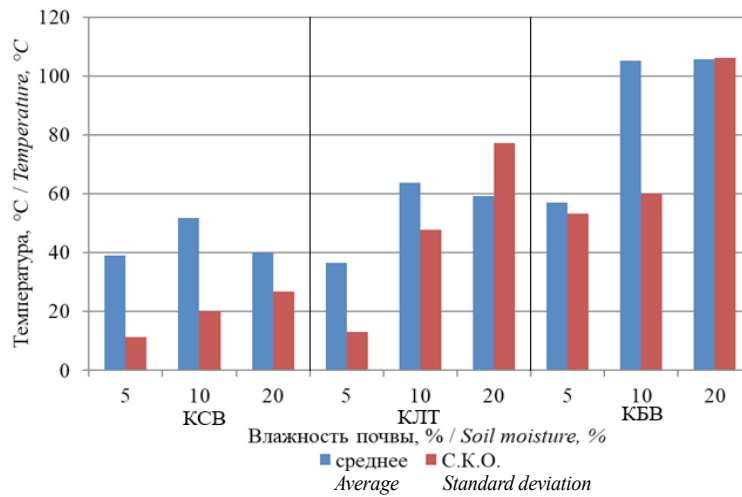


Рис. 5. Среднее значение температуры и рассеяние (С.К.О.) в слое почвы

Fig. 5. Average temperature and scattering (standard deviation) in the soil layer

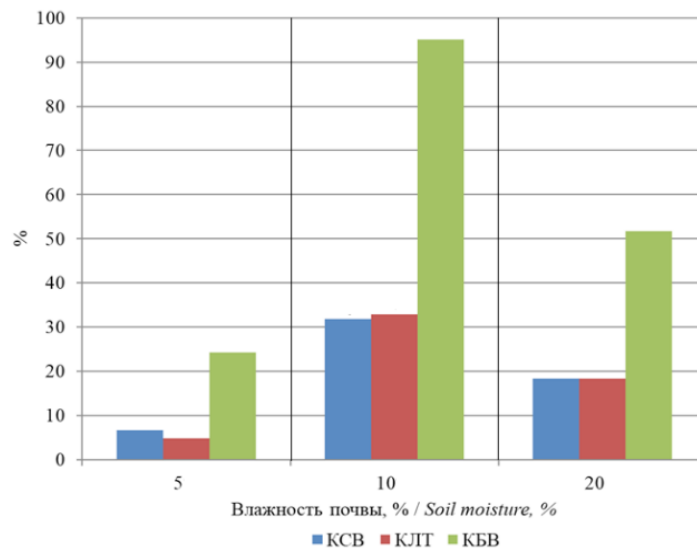


Рис. 6. Доля объема слоя почвы с температурой более 60°C

Fig. 6. Volume fraction of the soil layer with a temperature exceeding 60°C

снижается до величин, меньших, чем при отсутствии пластины.

Изменение угла положения наклонной поверхности КБВ волновода от базового значения 24° в большую (45°) и меньшую (10°) стороны привело к незначительному уменьшению мощности

волновода и, соответственно, мощности нагрева слоя почвы (рис. 8). Значения средних температур объема слоя почвы при изменении угла наклона поверхности также уменьшились (рис. 9).

Рассмотрим нагрев слоя почвы СВЧ-излучателем с волноводом КБВ (угол наклона волновода – 24°)

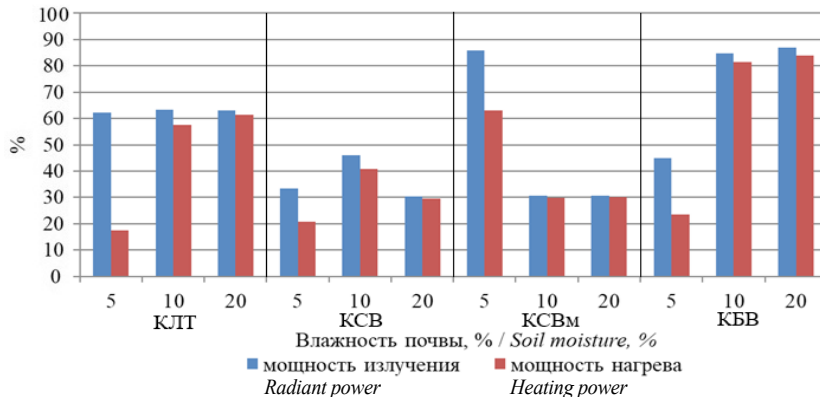


Рис. 7. Доли мощности волновода и нагрева слоя почвы

Fig. 7. Waveguide and soil layer heating power fractions

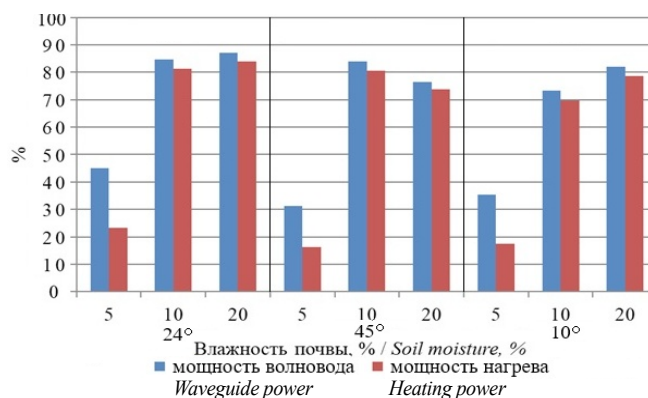


Рис. 8. Доли мощности волновода КБВ и нагрева слоя почвы при различных углах наклона волновода

Fig. 8. TWC waveguide and soil heating power fractions at various waveguide inclination angles

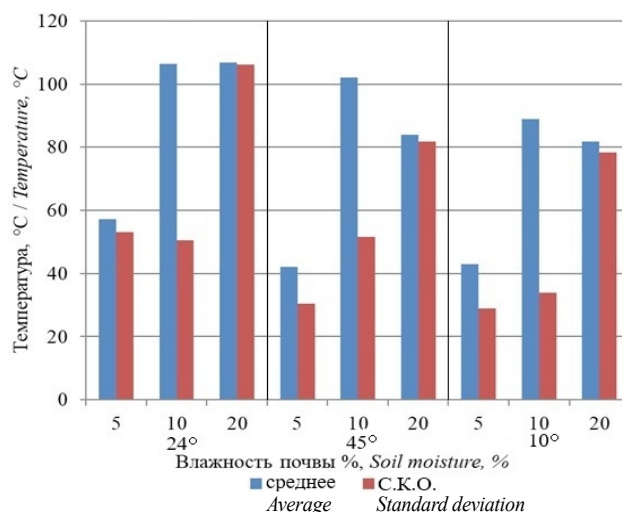


Рис. 9. Среднее значение температуры и рассеяния (С.К.О.) в слое почвы при различных углах положения наклонной поверхности волновода КБВ

Fig. 9. Average temperature values and scattering (standard deviation) in the soil layer at different angles of the inclined surface of the TWC waveguide

при размещении среза волновода на высоте  $h$  от поверхности почвы (рис. 10). Размеры расчетного слоя почвы составляют  $60 \times 88 \times 100$  мм, мощность источника излучения – 1000 Вт, продолжительность нагрева – 60 с, начальная температура слоя почвы –  $20^\circ\text{C}$ . В расчетах высота  $h$  принята равной 0, 5, 10 и 20 мм, влажность почвы – 5, 10 и 20%.

На рисунке 11 приведены карты изотерм в слое почвы для принятых значений высоты  $h$  и влажности почвы.

Доли мощности волновода и мощности нагрева от излучаемой антенной магнетрона мощности

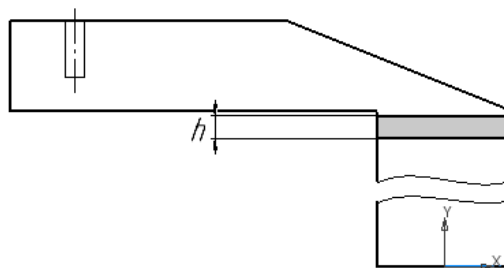


Рис. 10. Схема размещения волновода КБВ над слоем почвы

Fig. 10. Layout of the TWC waveguide above the soil layer

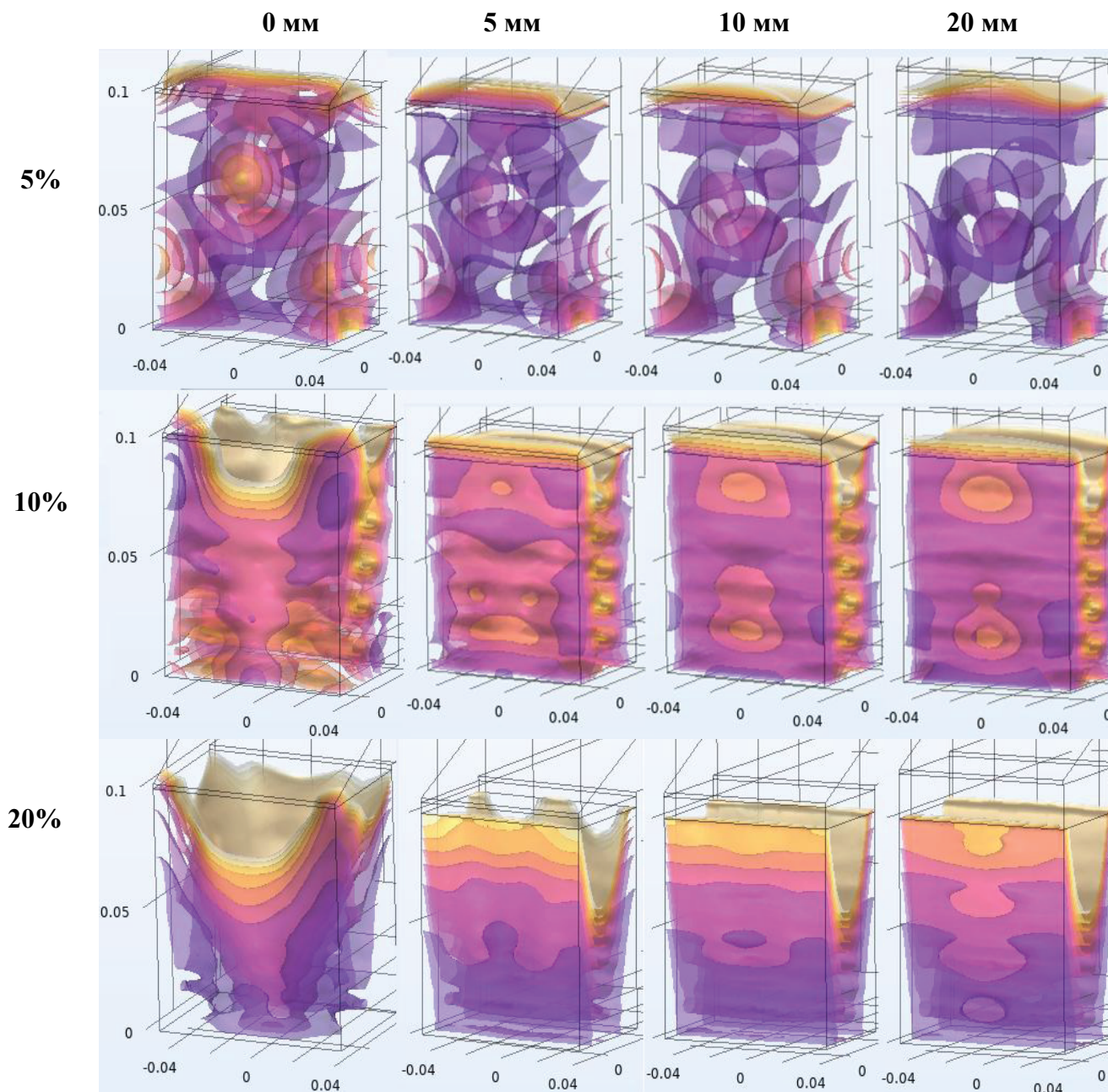


Рис. 11. Карты изотерм слоя почвы влажностью 5, 10, 20% при высоте воздушного зазора 0, 5, 10, 20 мм и продолжительности нагрева 60 с

Fig. 11. Isothermal maps of the soil layer (5%, 10%, and 20% moisture) at air gap heights of 0, 5, 10, and 20 mm after 60 s of heating

представлены на рисунке 12. Зависимость изменения среднеобъемного значения температуры слоя почвы и рассеяния температуры в слое от высоты воздушного зазора  $h$  для волновода КБВ приведены на рисунке 13.

Анализ результатов моделирования нагрева слоя почвы СВЧ-излучателем с волноводом КБВ при размещении среза волновода на высоте  $h$  от поверхности почвы позволяет сделать следующие выводы.

1. Изменение высоты воздушного зазора между срезом волновода и поверхностью слоя почвы в пределах от 0 до 20 мм не приводит к существенному изменению локализации и степени нагрева слоя почвы; незначительно также изменяется мощность волновода и мощность нагрева слоя почвы, что позволяет размещать СВЧ-излучатель над поверхностью

обрабатываемой почвы, исключая контакт волновода с почвой во время эксплуатации.

2. Эффективность СВЧ-излучения повышается с ростом влажности почвы, но при этом существенно увеличивается неравномерность нагрева объема слоя (чрезмерный нагрев поверхности почвы и малый нагрев на глубине).

3. Мощность волновода КБВ составляет 72...88% от мощности источника излучения при влажности слоя почвы 10...20%. При этом поглощенная слоем почвы мощность достигает 60...85%.

4. Наиболее эффективным является использование СВЧ-излучателя с волноводом КБВ на почве влажностью 10%: обеспечивается высокий уровень мощности волновода и мощности нагрева и высокий уровень равномерности нагрева слоя почвы.

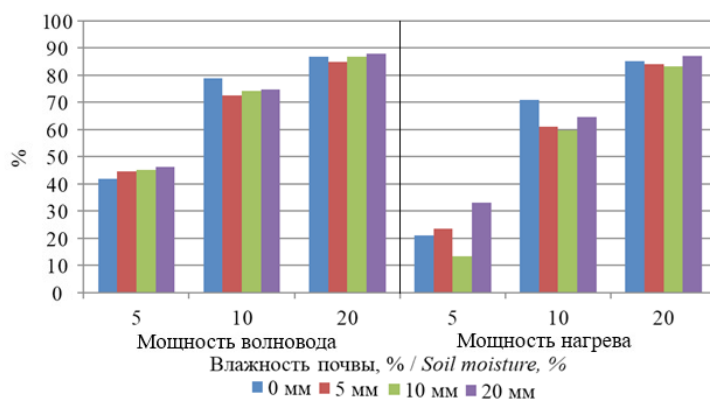


Рис. 12. Доли мощности волновода КБВ и нагрева слоя почвы влажностью 5, 10, 20% при высоте воздушного зазора 0, 5, 10, 20 мм

Fig. 12. Fraction of the power of the TWC waveguide and the heating of the soil layer with a soil moisture of 5, 10, and 20% at an air gap height of 0.5, 10, and 20 mm

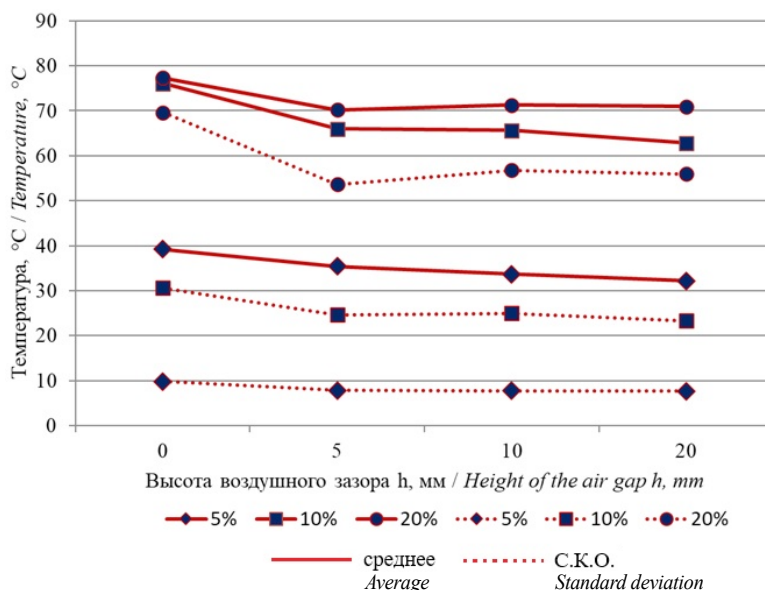


Рис. 13. Изменение среднеобъемного значения температуры слоя почвы и рассеяния температуры в слое от высоты воздушного зазора  $h$  для волновода КБВ

Fig. 13. Variation in volume-averaged soil temperature and temperature distribution within the layer relative to the air gap height  $h$  for a TWC waveguide

## Выводы

Для нагрева слоя почвы СВЧ-излучением предпочтительно использовать волноводы КБВ, обеспечивающие передачу слою почвы 72...88% энергии источника излучения и поглощение слоем почвы влажностью 10...20% от 60 до 85% энергии источника излучения.

## Список источников

1. Хамуков Ю.Х., Канокова М.А. Земледелие и вспашка. Вспашка как антропогенный фактор деградации экосистем // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 6 (110). С. 225-235. EDN: VHSXQV
2. Косолапов В.М., Цыгуткин А.С., Алдошин Н.В., Лылин Н.А. Агрономические основы инженерного обеспечения биологизации земледелия // Кормопроизводство. 2022. № 3. С. 41-47. EDN: IZUIQD
3. Bondarenko O., Boshkova I. Evaluation of the efficiency of microwave heating of soils. *Technology Audit and Production Reserves*. 2023;4(1):40-47. EDN: FAFLNK
4. Brodie G., Torgovnikov G. Microwave soil heating with evanescent fields from slow-wave comb and ceramic applicators. *Energies*. 2022;15(3):1068. EDN: INMSXR
5. Brodie G., Khan M.J., Gupta D. et al. Understanding the energy requirements for microwave weed and soil treatment. *Global Journal of Agricultural Innovation, Research Development*. 2019;6:11-24. <https://doi.org/10.15377/2409-9813.2019.06.2>
6. Maynaud G., Baudoin E., Bourillon J. et al. Short-term effect of 915-MHz microwave treatments on soil physicochemical and biological properties. *European Journal of Soil Science*. 2019;70(3):443-453
7. Brodie G., Khan M.J., Gupta D. Microwave soil treatment and plant growth. *IntechOpen EBooks*. 2019:19. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.89684>
8. Молодцова М.А., Севастьянова Ю.В. Возможности и перспективы использования микроволнового излучения в промышленности (обзор) // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2017. № 2. С. 173-187. EDN: YHESKL
9. Алдошин Н.В., Васильев А.С., Голубев В.В. Обоснование приемов обработки почвы при освоении залежных земель // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2020. Т. 13, № 1 (64). С. 28-35. EDN: SLJVYK
10. Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В. Перспективы развития методов и технических средств защиты сельскохозяйственных растений // Агроинженерия. 2021. № 1 (101). С. 26-35. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-1-26-35>
11. Кабалоев Т.Х., Гагуева К.К., Гокоев Т.М., Никколова Л.С. Температурное поле тепличной почвы при термоэлектрическом способе нагрева // Известия Горского государственного аграрного университета. 2018. Т. 55, № 4. С. 148-152. EDN: YRLMVN
12. Поспелова И.Г., Возмищев И.В., Ниязов А.М. К вопросу о способах обеззараживания почвы в защищенном грунте // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2020. Т. 67, № 3(40). С. 45-49. EDN: NONPMR
13. Ихлов Б.Л., Мельниченко А.В., Ощепков А.Ю. Действие сверхвысокочастотного электромагнитного поля на микроорганизмы // Вестник новых медицинских технологий. 2017. Т. 24, № 2. С. 141-146. EDN: ZDHMGV
14. Zhang Z., Wang J., Hu Y., Wang L. Microwaves, a potential treatment for bacteria: A review. *Front. Microbiol.* 2022;13:1-14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.888266>

Приведенные результаты являются справедливыми для принятых к моделированию величин физических свойств почвы; результаты, полученные расчетным моделированием, подлежат экспериментальной проверке.

## References

1. Khamukov Yu.Kh., Kanokova M.A. Arable farming and plowing. Plowing as an anthropogenic factor of ecosystem degradation. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2022;6(110):225-235. (In Russ.)
2. Kosolapov V.M., Tsygutkin A.S., Aldoshin N.V., Lynin N.A. Mechanized agronomy as means for arable farming biologization. *Kormoproizvodstvo*. 2022;3:41-47. (In Russ.)
3. Bondarenko O., Boshkova I. Evaluation of the efficiency of microwave heating of soils. *Technology Audit and Production Reserves*. 2023;4(1):40-47.
4. Brodie G., Torgovnikov G. Microwave soil heating with evanescent fields from slow-wave comb and ceramic applicators. *Energies*. 2022;15(3):1068.
5. Brodie G., Khan M.J., Gupta D. et al. Understanding the energy requirements for microwave weed and soil treatment. *Global Journal of Agricultural Innovation, Research Development*. 2019;6:11-24. <https://doi.org/10.15377/2409-9813.2019.06.2>
6. Maynaud G., Baudoin E., Bourillon J. et al. Short-term effect of 915-MHz microwave treatments on soil physicochemical and biological properties. *European Journal of Soil Science*. 2019;70(3):443-453.
7. Brodie G., Khan M.J., Gupta D. Microwave soil treatment and plant growth. *IntechOpen EBooks*. 2019:19. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.89684>
8. Molodtsova M.A., Sevastyanova Yu.V. Opportunities and prospects of microwave radiation in industry (review). *Russian Forestry Journal*. 2017;2:173-187. (In Russ.)
9. Aldoshin N.V., Vasiliev A.S., Golubev V.V. Justification of tillage methods in the development of fallow lands. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2020;13(1):28-35. (In Russ.)
10. Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eshchin A.V. Development prospects for methods and technical means of farm crop protection. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2021;1:26-35. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-1-26-35>
11. Kabaloev T.Kh., Gatueva K.K., Gokoev T.M., Nikkolovala L.S. Temperature field of greenhouse ground when thermoelectric method of heating. *Proceedings of Gorskoy State Agrarian University*. 2018;55(4):148-152. (In Russ.)
12. Pospelova I.G., Vozmishchev I.V., Niyazov A.M. Soil disinfection methods in protected ground. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2020;67(3):45-49. (In Russ.)
13. Ikhlov B.L., Melnichenko A.V., Oshchepkov A.Yu. The impact of microwave electromagnetic field on microbes. *Journal of New Medical Technologies*. 2017;24(2):141-146. (In Russ.)
14. Zhang Z., Wang J., Hu Y., Wang L. Microwaves, a potential treatment for bacteria: A review. *Front. Microbiol.* 2022;13:1-14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.888266>
15. Shakhmatov S.N. Energy-saving technologies for processing agricultural products. *Bulletin of KSAU*. 2002;1:49-56. (In Russ.)
16. Nikishina O.V., Morozov G.A. Combined soil treatment methods. *Electronics, Photonics and Cyberphysical Systems*. 2022;2(2):51-55. (In Russ.)

15. Шахматов С.Н. Энергоресурсосберегающие технологии обработки продукции сельскохозяйственного производства // Вестник КрасГАУ. 2002. № 1. С. 49-56. EDN: ZDORLJ

16. Никишина О.В., Морозов Г.А. Комбинированные методы обработки почв // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2022. Т. 2, № 2. С. 51-55. EDN: LNRICH

17. Воложанинов С.С., Завалий А.А., Ржевская В.С. и др. Экспериментальное исследование влияния нагрева массива почвы сверхвысокочастотным излучением на количество микроорганизмов // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2025. № 41 (204). С. 153-167. EDN: PGWAXG

18. 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>

19. Тригорлый С.В., Чудров А.А. Моделирование СВЧ-размораживания грунта // Вопросы электротехнологии. 2023. № 1. С. 14-20. EDN: EEBYRO

17. Volozhaninov S.S., Zavalay A.A., Rzhevskaya V.S. et al. Experimental study of the effect of heating of a soil mass by ultrahigh-frequency radiation on the number of microorganisms. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2025;41:153-167. (In Russ.)

18. Volozhaninov S.S., Aldoshin N.V., Zavalay A.A., Volobuev D.D. Experimental study of the temperature field in the soil layer when heated by ultrahigh frequency radiation. *Agricultural Engineering (Moscow)*. (In Russ.). 2024;26(6):28-35. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-28-35>

19. Trigorly S.V., Chudrov A.A. Modeling of microwave soil defrosting. *Voprosy elektrotekhnologii*. 2023;1:14-20. (In Russ.)

#### Сведения об авторах

<sup>1</sup> **Воложанинов Сергей Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры общетехнических дисциплин; [s.volozhaninov@mail.ru](mailto:s.volozhaninov@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-6686-1220>; SPIN-код: 1333-7600

<sup>2</sup> **Алдошин Николай Васильевич**, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник; [naldoshin@yandex.ru](mailto:naldoshin@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>; SPIN-код: 6032-9021

<sup>3</sup> **Завалий Алексей Алексеевич**, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой общетехнических дисциплин; [zavalym@mail.ru](mailto:zavalym@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-0806-1110>; SPIN-код: 3604-5109

<sup>4</sup> **Волобуев Дмитрий Дмитриевич**, аспирант кафедры общетехнических дисциплин; [volobuev99@mail.ru](mailto:volobuev99@mail.ru); SPIN-код: 9473-4130

<sup>1,3,4</sup> Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского; 295007, Российская Федерация, Республика Крым, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4

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

#### Вклад авторов

С.С. Воложанинов – проведение исследований, описание результатов и формулирование выводов исследований, создание черновика рукописи, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование;

Н.В. Алдошин – актуальность проблемы, концептуализация;

А.А. Завалий – методология, научное руководство;

Д.Д. Волобуев – обзор источников литературы, подготовка графических материалов, проведение исследований.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 23.10.2025, после рецензирования и доработки 26.02.2026, принята к публикации 26.03.2026

#### Author Information

**Sergey S. Volozhaninov**<sup>1</sup>, PhD (Eng), Associate Professor, Associate Professor of the Department of General Technical Subjects; [s.volozhaninov@mail.ru](mailto:s.volozhaninov@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-6686-1220>; Scopus Autor ID: 57218094232

**Nikolay V. Aldoshin**<sup>2</sup>, DSc (Eng), Professor, Chief Engineer; [naldoshin@yandex.ru](mailto:naldoshin@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>; Scopus Author ID: 5719413129; Researcher ID: AAD-6548-2022

**Aleksei A. Zavalay**<sup>3</sup>, DSc (Eng), Associate Professor, the head of the department of General Technical Subjects, [zavalym@mail.ru](mailto:zavalym@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-0806-1110>; Scopus Author ID: 57214120527

**Dmitry D. Volobuev**<sup>4</sup>, postgraduate student of the Department of General Technical Subjects; [volobuev99@mail.ru](mailto:volobuev99@mail.ru)

<sup>1,3,4</sup> V.I. Vernadsky Crimean Federal University; 295007, Russian Federation Republic of Crimea, Simferopol, Akademika Vernadskogo Ave., 4

<sup>2</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russian Federation, Moscow, 1st Institutsky Proezd Str., 5

#### Author Contribution

S.S. Volozhaninov – investigation; formal analysis; writing – original draft, review and editing of the manuscript;

N.V. Aldoshin – conceptualization;

A.A. Zavalay – methodology; research supervision;

D.D. Volobuev – literature review; visualization, investigation.

#### Conflict of interests

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

Received 23.10.2025; Revised 26.02.2026; Accepted 26.03.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.37

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-15-27>

## Складной роликовый конвейер для автоматизированной системы сервисного обслуживания сельскохозяйственных беспилотных летательных аппаратов

*В.П. Дашевский<sup>1</sup>, М.М. Бизин<sup>2</sup>, Ю.В. Галыкин<sup>3</sup>, А.Л. Ронжин<sup>4</sup>*

<sup>1,2,3,4</sup> Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук; г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup> [dashevskiy.v@iias.spb.su](mailto:dashevskiy.v@iias.spb.su); <https://orcid.org/0000-0002-2285-1936>

<sup>2</sup> [maxim.bizin@strategic-it.ru](mailto:maxim.bizin@strategic-it.ru); <https://orcid.org/0009-0006-2314-9715>

<sup>3</sup> [yuri.galykin@strategic-it.ru](mailto:yuri.galykin@strategic-it.ru); <https://orcid.org/0009-0000-1274-9754>

<sup>4</sup> [ronzhin@iias.spb.su](mailto:ronzhin@iias.spb.su); <https://orcid.org/0000-0002-8903-3508>

**Аннотация.** Эксплуатация агродронов сдерживается отсутствием мобильных решений для их обслуживания в полевых условиях. Сервисное обслуживание сельскохозяйственных беспилотных летательных аппаратов (БЛА) вблизи обрабатываемого поля обуславливает использование автономной сервисной платформы (дропопорта). Исследования проведены с целью изучения подходов к автоматизации наземной инфраструктуры воздушных БЛА сельскохозяйственного назначения и создания складного роликового конвейера автономной сервисной платформы (модульного дронопорта конвейерного типа). Предложили конструктивно-технологическую схему мобильной сервисной платформы, осуществляющей перемещение агродрона с помощью складного конвейерного модуля. Разработали складной роликовый конвейер с последовательным зубчато-ременным приводом от шагового двигателя NEMA23/NEMA24 с током фазы около 5 А и планетарным редуктором 1:20. Натурные испытания прототипа конвейерного модуля габаритами 1,88 × 0,90 м в диапазоне скоростей 0,05...0,15 м/с проводили в лабораторных условиях на горизонтальной поверхности и на поверхности с уклоном в 3 и 6 град. с использованием агродрона EFT G630 массой 70 кг и груза весом 100 кг для имитации предельных условий. Потребляемая мощность привода конвейера при транспортировке груза составила до 30 Вт, в том числе при перемещении по поверхности с уклоном 6 град. Конструкция продемонстрировала отказоустойчивость: выход из строя отдельных роликов не нарушал работу системы. Результаты экспериментов подтвердили практическую реализуемость, энергоэффективность и надежность разработанного складного конвейерного модуля и перспективность создания мобильной автоматизированной системы сервисного обслуживания сельскохозяйственных беспилотных летательных аппаратов.

**Ключевые слова:** эксплуатация агродронов; агродрон; БЛА; сервисное обслуживание сельскохозяйственных беспилотных летательных аппаратов; складной роликовый конвейер; дронопорт

**Финансирование.** Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FFZF-2025-0012 «Теоретические основы и новые технические решения бесшовного управления группой БЛА в недетерминированных средах при выполнении сельскохозяйственных задач»).

**Для цитирования:** Дашевский В.П., Бизин М.М., Галыкин Ю.В., Ронжин А.Л. Складной роликовый конвейер для автоматизированной системы сервисного обслуживания сельскохозяйственных беспилотных летательных аппаратов // *Агроинженерия*. 2026. Т. 28, № 2. С. 15-27. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-15-27>

## ORIGINAL ARTICLE

## Folding roller conveyor for an automated servicing system of agricultural unmanned aerial vehicles

V.P. Dashevsky<sup>1</sup>, M.M. Bizin<sup>2</sup>, Yu.V. Galykin<sup>3</sup>, A.L. Ronzhin<sup>4</sup>✉

<sup>1,2,3,4</sup> St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

<sup>1</sup> dashevskiy.v@iias.spb.su; <https://orcid.org/0000-0002-2285-1936>

<sup>2</sup> maxim.bizin@strategic-it.ru; <https://orcid.org/0009-0006-2314-9715>

<sup>3</sup> yuri.galykin@strategic-it.ru; <https://orcid.org/0009-0000-1274-9754>

<sup>4</sup> ronzhin@iias.spb.su; <https://orcid.org/0000-0002-8903-3508>

**Abstract.** The operational efficiency of agricultural drones is currently constrained by the lack of mobile, field-based service solutions. To address this, the use of autonomous service platforms, or “droneports,” is required. This study investigates approaches for automating ground-based support for agricultural unmanned aerial vehicles (UAVs) through the development of a folding, modular conveyor-type droneport. The proposed design features a mobile service platform that utilizes a folding roller conveyor to transport heavy-duty drones. The conveyor is driven by a sequential toothed belt system powered by a NEMA23/NEMA24 stepper motor (5 A phase current) coupled with a 1:20 planetary gearbox. Full-scale laboratory testing was conducted on a 1.88 × 0.90 m prototype at speeds of 0.05 to 0.15 m/s across horizontal and inclined (3° and 6°) surfaces. An EFT G630 agri-drone, weighing 70 kg with a 100 kg payload capacity, was used to simulate extreme operational loads. Results showed that power consumption during transport remained below 30 W, even at a 6° incline. The system demonstrated high fault tolerance; the failure of individual rollers did not disrupt overall operation. The experimental findings confirmed the feasibility, energy efficiency, and reliability of the folding conveyor module, highlighting its potential as a mobile servicing infrastructure for agricultural UAVs.

**Keywords:** agrodrome operation; agrodrome; unmanned aerial vehicle (UAV); UAV maintenance in agriculture; folding roller conveyor; droneport

**Funding.** The research was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Topic No. FFZF-2025-0012, “Theoretical Foundations and New Technical Solutions for Seamless Multi-UAV System Control in Non-Deterministic Environments for Agricultural Tasks”).

**For citation:** Dashevsky V.P., Bizin M.M., Galykin Yu.V., Ronzhin A.L. Folding roller conveyor for an automated servicing system of agricultural unmanned aerial vehicles. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(2):15-27 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-15-27>

### Введение

Интенсификация сельскохозяйственного производства и реализация концепции точного земледелия стимулируют активное внедрение цифровых и роботизированных технологий. Среди них особое место занимает применение беспилотных летательных аппаратов (БЛА) сельскохозяйственного назначения – агродронов для мониторинга и обработки растений и почвы [1, 2]. Преимуществами агродронов являются возможность работы на труднодоступных участках со сложным рельефом без необходимости создания масштабной наземной инфраструктуры, а также низкая стоимость и гибкость при проведении работ [3, 4, 5]. В отличие от прочих видов БЛА агродроны мультикоптерного типа выполняют задачи в специфическом маловысотном режиме с малой скоростью, необходимым для равномерного распыления жидких реагентов. Этот режим полета характеризуется низким аэродинамическим качеством и высоким энергопотреблением, что приводит к необходимости

частой дозаправки рабочего раствора и замены аккумуляторов. Таким образом, эффективная эксплуатация агродронов требует создания специализированной наземной инфраструктуры. Необходимо упростить и автоматизировать процессы подготовки и обслуживания группы воздушных дронов, сократив простой между вылетами в течение рабочей смены.

Существенным фактором, ограничивающим применение агродронов, является удаленность полей от баз их технического обслуживания. Выезд на позицию и возвращение с нее могут занимать несколько часов, что делает нерациональным проведение с помощью агродронов кратковременных работ. Таким образом, эффективная эксплуатация агродронов требует обеспечения длительной автономной работы непосредственно в границах обрабатываемых площадей.

Автоматизированное обслуживание БЛА основывается на концепции общей статической взлетно-посадочной площадки с различной степенью ее автоматизации: от простой платформы с системой

позиционирования до сложного комплекса с манипулятором для замены аккумулятора [6, 7]. Отметим общий недостаток: площадка блокируется на весь цикл обслуживания одного аппарата. Такой подход не учитывает требований к высокой пропускной способности при групповом использовании агродронов. Более того, эти решения не масштабируются для работы с большими объемами жидкостей. Например, при типичной для агродрона скорости распыления 3 л/мин расход раствора достигает нескольких сотен литров за смену. Существующие прототипы дронопортов или не предусматривают наличия вместительных резервуаров для воды в сочетании с системами автоматической подготовки и заправки растворов, или оснащаются полуавтоматическими системами смешения растворов с ручной заправкой их в бак агродрона [8], что небезопасно для человека, и поэтому непригодно для реальной продолжительной работы в поле.

Мобильный дронопорт должен обеспечивать полностью автоматизированное обслуживание БЛА [9, 10, 11], в том числе посадку, обслуживание и взлет, и учитывать требования к полной автономности бортовых систем дронопорта.

Для повышения надежности посадки платформа оснащается вспомогательными системами локальной навигации по оптическим и радиоканалам [12, 13], интегрирующим сенсорные данные для компенсации возмущающих воздействий: ветровых нагрузок, изменения аэродинамических характеристик БЛА ввиду уменьшения массы по мере расходования топлива, неблагоприятных условий освещенности.

Автоматизации наземных систем сервисного обслуживания БЛА сельскохозяйственного назначения посвящен ряд исследований. Разработан прототип подвижной транспортной платформы, предназначенной для обслуживания дронов-опрыскивателей, оснащенной средствами для хранения и передачи носителей энергии, приготовления, хранения и передачи химических материалов, площадками для хранения и транспортировки, взлета и посадки БЛА [14]. Предложена концепция построения дронопорта и представлены результаты имитационного моделирования в компьютерной среде Gazebo по взаимодействию БЛА и дронопорта на разных стадиях сервисного обслуживания [15]. Для мониторинга территорий БЛА разработаны зарядные платформы с открытыми контактными площадками, обеспечивающие зарядку аккумуляторов БЛА разных размеров и допускающие отклонение при посадке [16, 17]. Проведен анализ существующих зарядных станций для БЛА и технических требований к перспективной защитно-зарядной станции обслуживания БЛА, осуществляющих мониторинг и диагностику воздушных линий электропередач [18].

Проблема позиционирования и автоматической посадки БЛА на платформу с помощью методов технического зрения и последующей механической коррекции для точных манипуляций с аккумулятором БЛА рассмотрена в работе [19]. Алгоритмы автоматической посадки БЛА с использованием фрактальных маркеров, обеспечивающих повышение точности позиционирования на разных высотах, и алгоритм перемещения аккумуляторной батареи при обслуживании робота предлагаются в работах [20, 21].

Задача энергообеспечения группы БЛА за счет использования распределенной системы модулей подзарядки и замены аккумуляторов БЛА решается в работе [22]. Концепция компоновки наземной сервисной станции, обеспечивающей взлет/посадку БЛА, замену аккумуляторной батареи и дозаправку бака рабочим раствором, описана в работе [23].

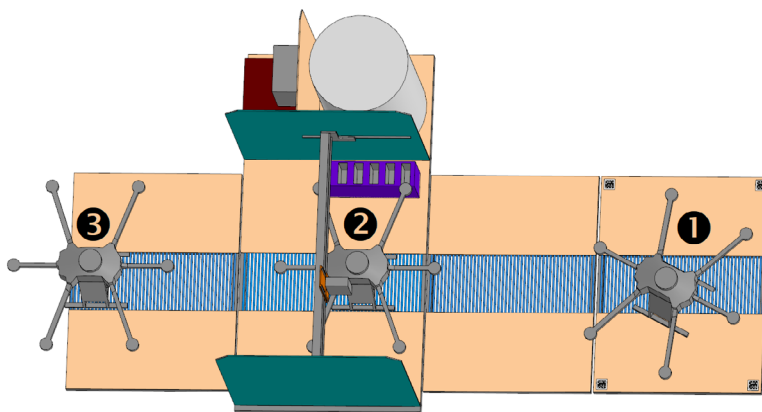
Таким образом, основное внимание исследователей уделяется вопросам посадки и обслуживания энергетической системы БЛА. Вопросы комплексного обслуживания БЛА включая дозаправку рабочим раствором пока остаются нерешенными. Поэтому разработка мобильной сервисной платформы, обеспечивающей автоматизированный автономный непрерывный цикл работы группы агродронов, является весьма актуальной. В качестве способа решения обозначенной задачи предлагается концепция модуля складной посадочной платформы конвейерного типа, перемещаемой на прицепе. Концепция призвана кардинально повысить безопасность, производительность и общий уровень автономности применения БЛА в реальных условиях современного точного земледелия.

**Цель исследований:** разработка складного роликового конвейера автономной сервисной платформы обслуживания БЛА сельскохозяйственного назначения.

### Материалы и методы

В качестве объекта исследований служил роликовый конвейер мобильной сервисной платформы для обслуживания сельскохозяйственных БЛА. Предметом исследований являлись конструктивные и режимные параметры роликового конвейера мобильной сервисной платформы для обслуживания сельскохозяйственных БЛА.

Требованием к складному конвейеру высокой пропускной способности являлось обеспечение синхронизации процессов выравнивания после посадки, перемещения и выполнения сервисных операций. В предлагаемом дронопорте функции посадки, обслуживания и взлета пространственно разнесены и соединены конвейерной линией (рис. 1).



**Рис. 1. Конструктивно-технологическая схема мобильной платформы, осуществляющей перемещение агродрона с помощью роликового конвейера:**

1 – зона посадки; 2 – зона обслуживания; 3 – зона взлета

**Fig. 1. Design and process diagram of the mobile platform moving agrodrone via a roller conveyor:**

1 – landing zone; 2 – service zone; 3 – take-off zone

Размах винтов агродронов может превышать 3 м, что больше ширины стандартного автотранспорта, поэтому платформа должна компактно складываться или трансформироваться в случае передислокации между полями и в то же время обеспечивать стабильность в развернутом рабочем состоянии для безопасного приема и выпуска тяжелых БЛА.

Экспериментальный образец роликового конвейера с последовательным зубчато-ременным приводом имеет длину 1,88 м, общее количество роликов – 20, шаг роликов – 0,096 м. Шкивы и ролики изготовлены методом 3D-печати из PETG-пластика для обеспечения оперативности ремонта. В дальнейших исследованиях и серийном производстве для изготовления роликов будет выбран более подходящий материал или будет наноситься покрытие с высокими фрикционными свойствами.

Методика проведения испытаний конвейера включала в себя два этапа: проверка базовой работоспособности на горизонтали и исследование надежности в отягчающих условиях (движение на подъем, работа с частично удаленными роликами).

Натурные испытания конвейерного модуля при тестовых нагрузках проводили в лабораторных условиях на горизонтальной поверхности и на поверхности с уклоном в 3 и 6 град. с использованием снаряженного агродрона EFT G630 массой 70 кг и груза весом 100 кг для имитации предельных условий.

### Результаты и их обсуждение

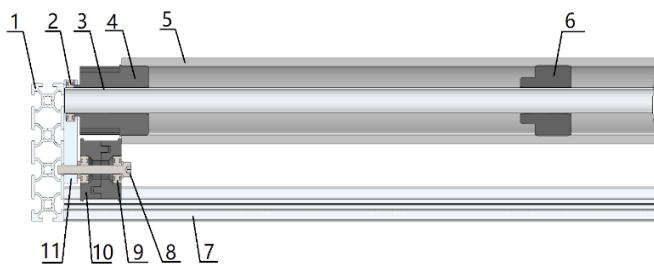
При создании прототипа складного роликового конвейера рассмотрены ленточный и роликовый варианты реализации. Недостатками ленточного конвейера являются большая масса, сложность замены/ремонта ленты в поле, необходимость точной юстировки, высокое энергопотребление по причине

трения скольжения по всей площади и др. Несмотря на достоинства ленточного конвейера (непрерывная опорная поверхность и плавность хода), его проектирование и эксплуатация на мобильной платформе затруднительны. Предпочтение было отдано роликовому конвейеру, для которого характерны модульность (возможность замены одного ролика без разборки всей секции), низкое энергопотребление за счет трения качения, ремонтпригодность в полевых условиях (демонтаж вышедшего из строя узла без специального инструмента).

Изготовленный роликовый конвейер разместили в створке платформы, смонтированной на стальной раме (рис. 2). Опорные направляющие 1 и распорки 7 выполнены из конструкционного алюминиевого профиля. Длина распорок подобрана в соответствии с шириной конвейера и требуемой длиной ролика. Выполненные из листового алюминия опорные панели 11 опорного подшипника 2 закреплены на опорных направляющих. Ролики конвейера включают внешнюю оболочку 5. При изготовлении роликов экспериментального образца использовали полипропиленовую трубу, внутрь которой продевали алюминиевую анодированную трубу, являющуюся одновременно и валом 3, концы которого опираются на подшипники 2, и усилителем жесткости внешней трубы от чрезмерного прогиба под весом дрона. В торцы трубы вмонтированы опорные вставки 4, выполненные методом 3D-печати, на одной из которых сформирован шкив под ремень. Шкив ролика имеет диаметр 0,04 м, количество зубов – 14. Чтобы адаптировать количество роликов к длине секции конвейера, шаг роликов может варьироваться в диапазоне 0,09...0,12 м. Опорные ролики ремня 10 обеспечивают плотное сцепление ремня со шкивами

роликов, чтобы при протягивании ремня он не мог проскальзывать вокруг зубьев шкива. Количество опорных роликов ремня соответствует числу основных конвейерных роликов. Фиксирующая планка опорных подшипников роликов 2 (рис. 3) позволяет зафиксировать опорные подшипники роликов в лотках опорной панели.

Выбран армированный зубчатый ремень 5 (рис. 4) шириной 20 мм, толщиной 3 мм, с шагом зубьев 8 мм. Ведущий шкив ремня рассчитан и получен методом 3D-печати. Внешний диаметр шкива 56 мм имеет 22 зуба.



**Рис. 2. Конструктивно-технологическая схема роликов и их установка на опоры (в разрезе):**

- 1 – опорная направляющая;
- 2 – опорный подшипник основного ролика;
- 3 – вал основного ролика;
- 4 – шкив основного ролика; 5 – внешняя оболочка ролика;
- 6 – усилитель основного ролика;
- 7 – распорка опорных направляющих;
- 8 – винт крепления опорного ролика и опорной панели;
- 9 – подшипник опорного ролика ремня;
- 10 – опорный ролик ремня (из двух половинок);
- 11 – опорная панель подшипников

**Fig. 2. Design and process diagram of the rollers and their installation on the supports (section):**

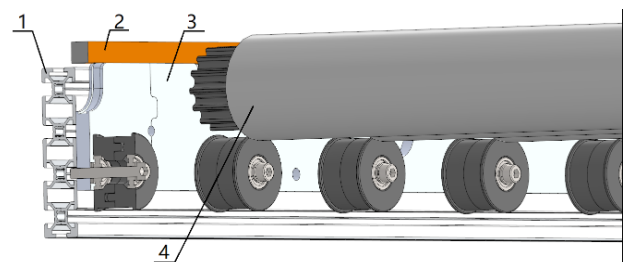
- 1 – support guide; 2 – main roller support bearing;
- 3 – main roller shaft; 4 – main roller pulley;
- 5 – outer shell of roller; 6 – main roller reinforcement;
- 7 – support guide spacer;
- 8 – support roller and support panel fastening screw;
- 9 – belt support roller bearing;
- 10 – belt support roller (consisting of two halves);
- 11 – bearing support panel

Привод конвейера включает в себя шаговый двигатель NEMA23 в сборе с планетарным редуктором, который устанавливается на опорной панели (рис. 5). На выходном валу редуктора закреплена муфта ведущего шкива.

Верификацию работоспособности и определение эксплуатационных характеристик провели на собранном опытном образце секции конвейера (рис. 6).

Управление приводом осуществлялось автономным контроллером шагового двигателя, подключенным к драйверу шагового двигателя (DM556). Контроллер позволял задавать ключевые параметры: частоту шаговых импульсов (линейная скорость от 0,0 до 0,2 м/с), направление вращения и профили плавного разгона/торможения. Электропитание системы (24...25 В) обеспечивалось лабораторным источником постоянного тока.

Первостепенной задачей первого этапа испытаний был подбор оптимальной силовой установки, обеспечивающей стабильную работу в заданном диапазоне скоростей (0,05...0,15 м/с) при нагрузке 70...100 кг, а также измерение и анализ энергопотребления. Сначала устанавливали груз в центр конвейера, включали плавный запуск на низкой скорости (~0,02...0,03 м/с) с последующим ее увеличением до номинальных

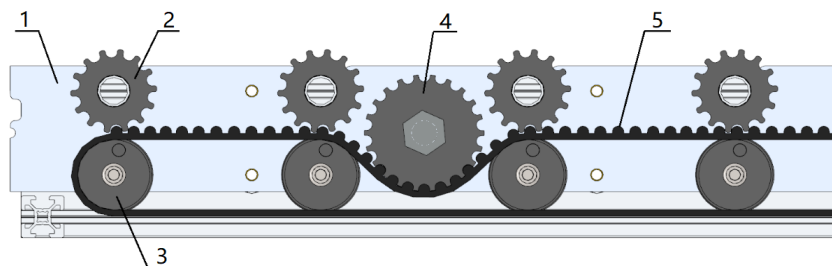


**Рис. 3. Фиксация опорных подшипников основных роликов:**

- 1 – опорная направляющая; 2 – фиксирующая планка;
- 3 – опорная панель; 4 – основной ролик в сборе

**Fig. 3. Fixing the support bearings of the main rollers:**

- 1 – support guide; 2 – fixing strip; 3 – support panel;
- 4 – main roller assembly

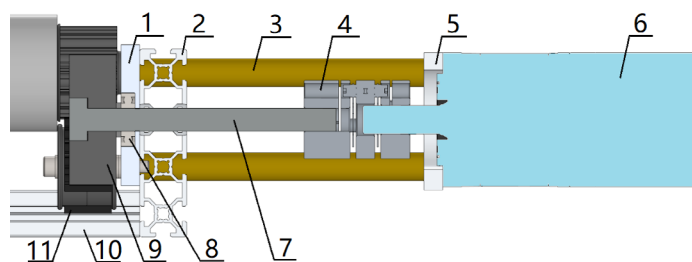


**Рис. 4. Фрагмент ременной передачи рядом с ведущим шкивом (в разрезе):**

- 1 – опорная панель подшипников; 2 – шкив основного ролика; 3 – опорный ролик ремня;
- 4 – ведущий шкив двигателя; 5 – ремень

**Fig. 4. Sectional view of the belt drive near the drive pulley:**

- 1 – bearing support panel; 2 – main pulley; 3 – belt support roller;
- 4 – engine drive pulley; 5 – belt



**Рис. 5. Подключение двигателя к ременному приводу роликов (в разрезе):**

- 1 – опорная панель; 2 – опорная направляющая; 3 – соединительная втулка сервопривода;  
4 – муфта сервопривод-ведущий шкив; 5 – пластина крепления сервопривода;  
6 – двигатель NEMA23 в сборе с редуктором (сервопривод); 7 – вал ведущего шкива;  
8 – опорный подшипник ведущего шкива; 9 – ведущий шкив; 10 – распорка; 11 – ремень

**Fig. 5. Connecting the motor to the roller belt drive (section):**

- 1 – support panel; 2 – support guide; 3 – servo motor coupling sleeve; 4 – servo motor-drive pulley coupling;  
5 – motor mounting plate; 6 – NEMA23 motor assembled with gearbox (servo motor); 7 – drive pulley shaft;  
8 – drive pulley support bearing; 9 – drive pulley; 10 – spacer; 11 – belt



**Рис. 6. Секция роликового конвейера для автономной сервисной платформы обслуживания сельскохозяйственных беспилотных летательных аппаратов**

**Fig. 6. Roller conveyor section for the agricultural UAV service platform**

и максимальных значений (0,05; 0,1; 0,15 м/с). Груз перемещался по всей длине конвейера до достижения крайнего положения, после чего направление движения менялось, и цикл повторялся. Повторность испытаний на каждом режиме составляла 3...5 раз. В ходе испытаний основным количественным показателем была потребляемая электрическая мощность, измеряемая ваттметром источника питания. Фиксировали установившуюся мощность при равномерном движении на каждой скорости, пиковую мощность в момент старта и динамику ее изменения в течение цикла. Линейную скорость определяли путем замера времени прохождения калиброванного участка длиной 1 м с использованием секундомера, а также анализа видеозаписи. Дополнительно определяли максимальную достижимую скорость без срыва управления и оптимальные параметры старта под полной нагрузкой. Испытание проводили последовательно

с тремя различными комбинациями шаговых двигателей и редукторов.

Первоначальная конфигурация с двигателем JK57HS56-2804 (NEMA23, ток фазы 2,8 А) и редуктором 1:10, несмотря на теоретически достаточную паспортную мощность, показала свою несостоятельность для работы с протяженной ременной передачей. Ее момента оказалось недостаточно для уверенного старта и движения на скоростях выше 0,05 м/с – наблюдались регулярные срывы управления.

Для решения проблемы применили более мощные двигатели 57AM23 (NEMA23) и 60НВ-87F5AB (NEMA24) с увеличенным током фазы (5 А), объединенные с редуктором, имеющим передаточное число 1:20. Наблюдали кардинальное улучшение характеристик: двигатели уверенно стартовали под полной нагрузкой и обеспечивали стабильную работу на всем требуемом диапазоне скоростей.

При проведении эксперимента использовали лабораторный источник питания INSTЕК PSP-405 с интерфейсом RS-232, позволяющий снимать показания напряжения, тока и мощности с частотой 5 раз в секунду. Для ввода данных написана программа на языке Python, осуществляющая первичную регистрацию мгновенной мощности с источника питания.

Запуск конвейера с агродроном массой 70 кг осуществляли вручную путем включения генератора импульсов в блоке управления драйвером шагового двигателя. Частота импульсов генератора была постоянной и подстраивалась под скорость передвижения груза на конвейере. Скорость вычисляли как отношение фиксированного пути длиной 1 м ко времени его преодоления, регистрируемого с помощью секундомера с точностью 0,1 с. Остановка конвейера производилась вручную после того, как груз преодолел расстояние в 1 м, поэтому графики (рис. 7)

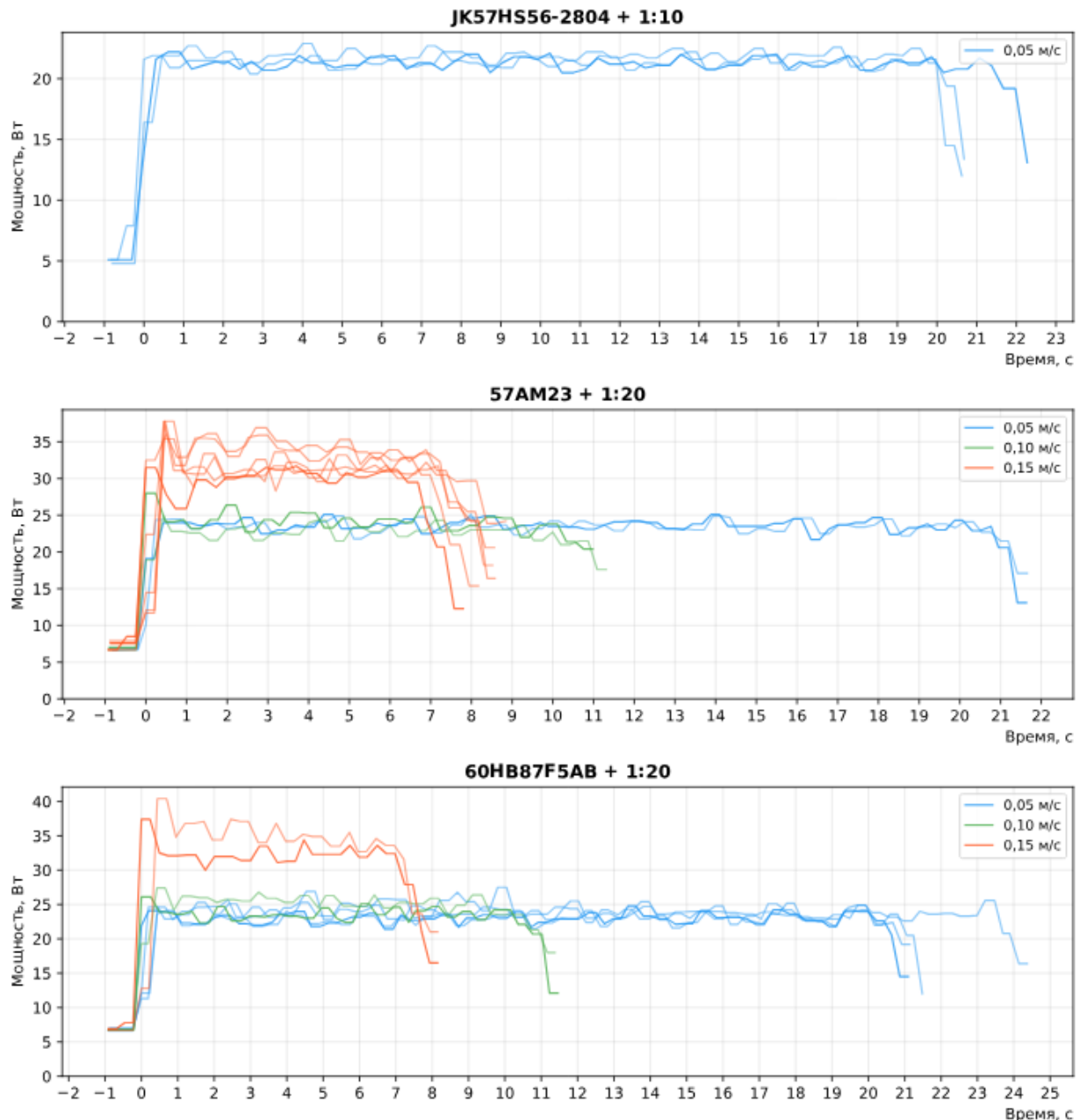


Рис. 7. Потребляемая мощность приводов конвейера на трех скоростях

Fig. 7. Power consumption of conveyor drives at three speeds

имеют несколько больший интервал (примерно на 0,5-1,5 с) времени, чем требовалось для прохождения данного расстояния. Это связано с задержкой в реакции ассистента на команду остановки, и в дальнейшем, при обработке данных, были использованы данные графиков, соответствующие времени прохождения 1 м пути.

На рисунке 7 представлена зависимость мощности, потребляемой каждым приводом, от времени при движении по конвейеру на расстояние 1 м. Отметим, что при скорости 0,05 м/с все три привода стабильно потребляют 21...24 Вт с минимальными колебаниями. С ростом скорости до 0,10 и 0,15 м/с характер потребления меняется: появляются выраженные

пусковые пики и увеличиваются колебания мощности в установившемся режиме (стандартное отклонение растет с ~1 Вт до 4...5 Вт). Привод JK57HS56-2804 с редуктором 1:10 представлен только при 0,05 м/с. При более высоких скоростях происходил срыв управления по причине меньшего передаточного числа редуктора и более низкого тока двигателя (3,2 А против 4,9 А у двух других).

На рисунке 8 представлены исходные данные трех приводов, сгруппированные по одинаковым скоростям. При скорости 0,05 м/с привод JK57HS56-2804 демонстрирует несколько меньшее потребление, но при более высокой скорости ему не хватает момента на валу, чтобы передвигать груз.

Приводы на основе 57АМ23 и 60НВ87F5АВ демонстрируют схожие профили мощности на всех скоростях. Они обладают большим моментом и могут осуществлять старт конвейера с грузом на скорости 0,15 м/с без предварительного разгона. При этом у двигателя 60НВ87F5АВ наблюдаются несколько более высокие пусковые значения мощности (до 40 Вт), тогда как у 57АМ23 пики достигают ~38 Вт. Длительность проходов уменьшается пропорционально скорости: ~21 с при 5 см/с; ~11 с при 10 см/с; ~8 с при 15 см/с.

На рисунке 9 представлены результаты статистической обработки графиков мощности, показаны средние значения мощности каждого привода

в процессе перемещения груза на расстояние в 1 м. Планки погрешности соответствуют стандартному отклонению. Все приводы имеют значительную потребляемую мощность около 20 Вт, которая потребляется всей системой привода независимо от скорости движения груза. При этом заметный рост мощности виден только для скорости 0,15 м/с. Для скорости 0,1 м/с рост мощности, затрачиваемой на передвижение груза, по-видимому, компенсируется снижением потерь на управление шаговым двигателем, так что в итоге общая мощность практически не отличается от мощности для скорости 0,05 м/с.

На рисунке 10 представлена интегральная характеристика мощности привода за время прохождения

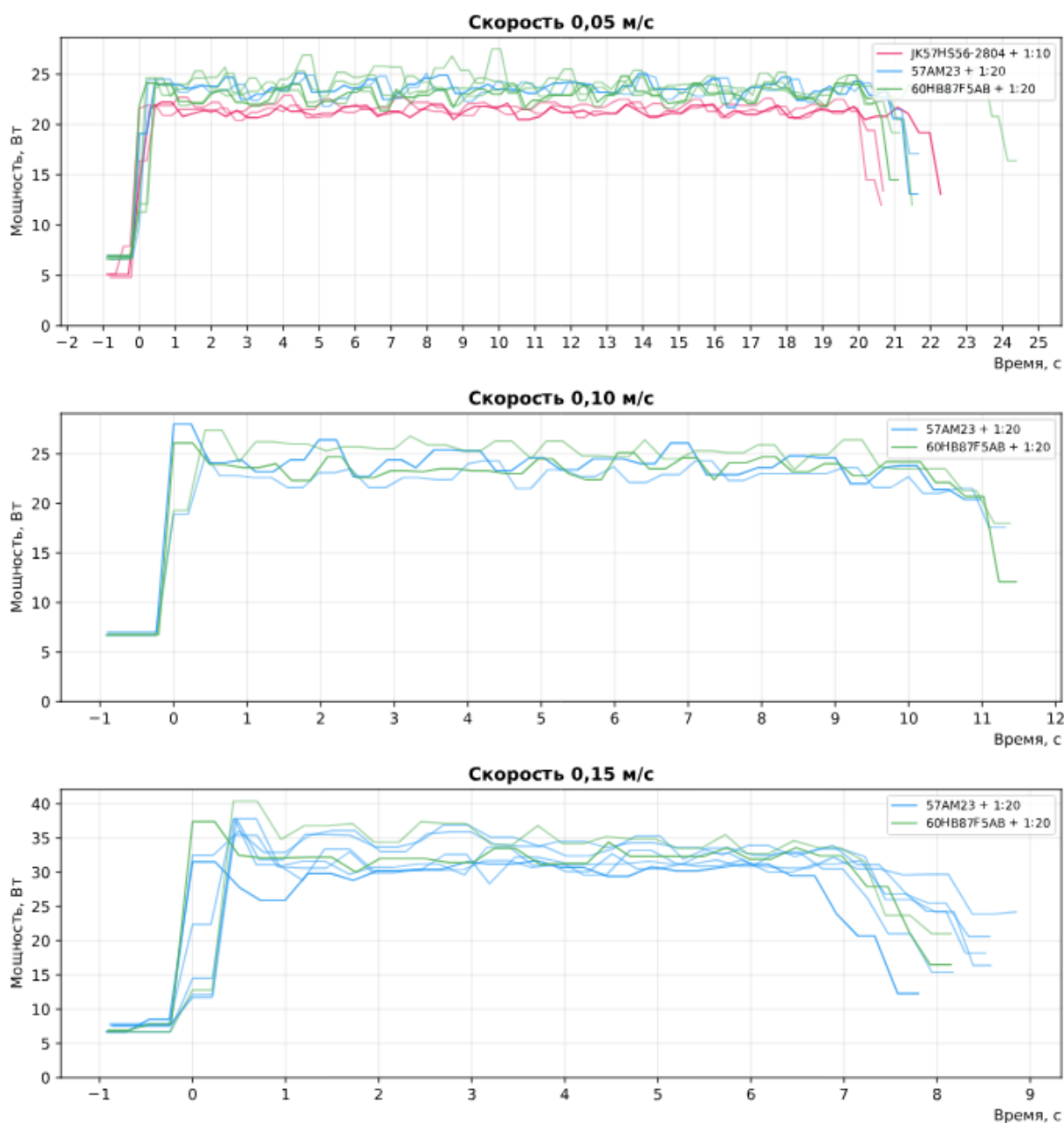


Рис. 8. Мощность приводов в зависимости от скорости конвейера

Fig. 8. Drive power depending on the conveyor speed

груза весом 70 кг расстояния 1 м, которая отражает количество энергии от источника питания, потраченное на перемещение груза. Планки погрешности соответствуют стандартному отклонению. Для низкой скорости КПД привода ниже, и расход энергии зависит от потерь в приводе. При больших скоростях расход энергии стабилизируется (около 220...240 Дж) и определяется в большей степени потерями на трение в самом конвейере. Таким образом, перемещение груза на больших скоростях является более эффективным, а расчетная скорость 0,1 м/с – оптимальной. Для нее одновременно наблюдаются и низкая мощность, потребляемая от источника, и механическая работа.

В ходе экспериментов был выявлен феномен флуктуаций мгновенной мощности в процессе движения груза при постоянной скорости. Это явление обусловлено переменным трением в протяженной ременной передаче, динамическим изменением нагрузки на подшипники роликов и особенностями работы шагового привода. Основная доля потребляемой мощности, около 20 Вт, связана со статическими потерями в шаговом двигателе на омическое сопротивление обмоток. Динамическая добавка, связанная с кинетической энергией груза, относительно невелика. Переход на более мощные приводы с большим запасом вращающего момента

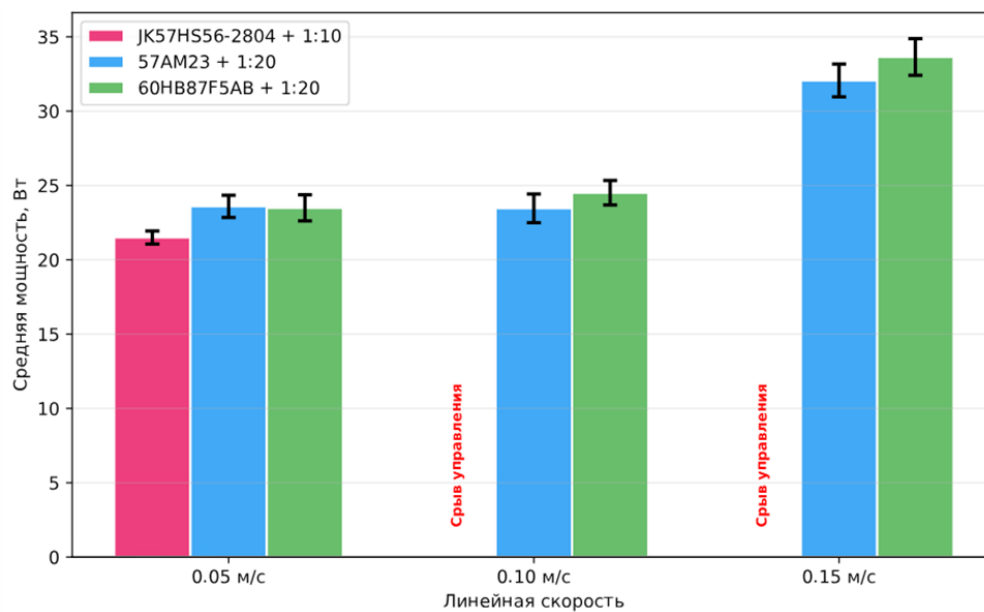


Рис. 9. Сравнение мощности приводов при разных скоростях

Fig. 9. Comparison of drive power at different speeds

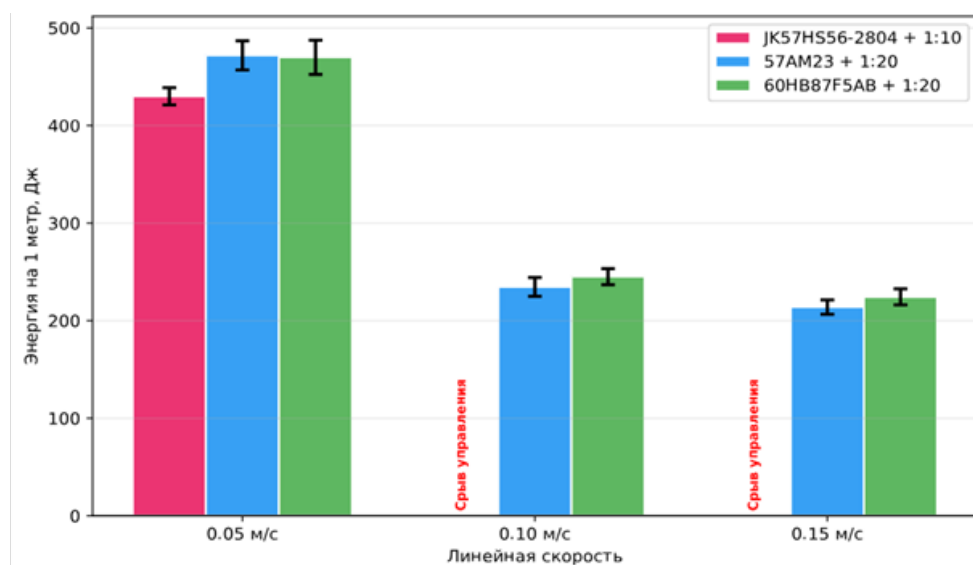


Рис. 10. Сравнение работы приводов на перемещение груза на расстояние 1 м в зависимости от скорости конвейера

Fig. 10. Comparison of drive performance for 1 m cargo displacement relative to the conveyor speed

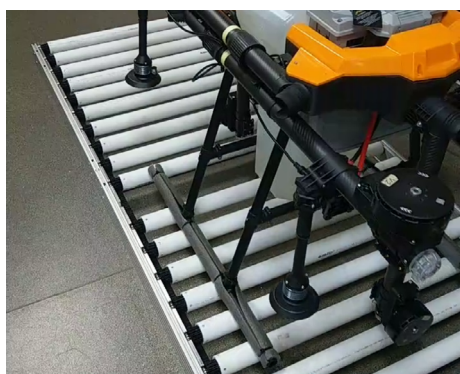
не увеличил, а в некоторых режимах даже снизил общее энергопотребление, так как двигатели перестали работать в режиме перегрузки, что повысило их КПД.

Для экспериментальной проверки принципа отказоустойчивости и моделирования условий работы на стыке секций были проведены испытания с искусственным удалением одного, а затем двух соседних роликов из центральной части конвейера, что создавало провал длиной 140 и 240 мм (рис. 11).

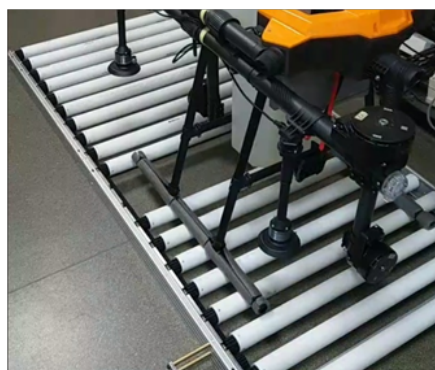
В обоих случаях конвейер сохранил способность перемещать груз массой 70 кг. Нагрузка успешно перераспределялась на соседние ролики. При наезде на провал наблюдались легкая вибрация и незначительное снижение скорости, однако по мере перекачивания на следующий ролик движение стабилизировалось. Срывов управления или проскальзывания ремня не происходило.

Результаты подтвердили высокую отказоустойчивость и ремонтпригодность конструкции, а также обосновали возможность проектирования стыков секций платформы с увеличенным шагом роликов без потери функциональности.

На следующем этапе исследовали наличие запаса крутящего момента силовой установки и сохранения работоспособности роликового конвейера в условиях неточной установки платформы в горизонтальной плоскости. Испытания проводили с оптимальной конфигурацией привода (NEMA23/24 с редуктором 1:20) при уклоне около 6 град. (0,2 м перепада на длине 2 м).



а)



б)

**Рис. 11. Проверка отказоустойчивости конвейера:**

а) без одного ролика; б) без двух роликов

**Fig. 11. Conveyor fault tolerance test:**

а) without one roller, б) without two rollers

### Выводы

Проведенные исследования и экспериментальные испытания подтвердили практическую реализуемость и эффективность разработанной конструкции складного роликового конвейера для мобильных

При испытании агродрона весом 70 кг зафиксировано явление пробуксовки по причине недостаточного сцепления мягких демпфирующих чехлов опорных лыж, сделанных из вспененного полиэтилена для теплоизоляции труб, с полипропиленовыми роликами на столь крутом подъеме. При уклоне 3 град. (0,1 м на 2 м) сцепления было достаточно для движения.

При испытании агродрона с контрольным грузом весом 100 кг, размещенном на доске для лучшего сцепления с роликами, система продемонстрировала полную работоспособность. Груз уверенно перемещался вверх по уклону 6 град. со скоростью 0,05...0,1 м/с без срывов управления.

По результатам испытаний можно заключить: практическим ограничением на уклоне является не производительность конвейера, а обеспечение гарантированного сцепления опор агродрона с поверхностью роликов. Возможность работы конвейера на уклоне позволяет существенно снизить требования к точности установки платформы в полевых условиях.

Перспективы дальнейших исследований видятся в таких направлениях, как:

- создание полнофункционального прототипа складной платформы с отработкой кинематики складывания секций;
- разработка и интеграция системы автоматического управления конвейером с системами позиционирования и обслуживания агродрона;
- проведение длительных ресурсных испытаний в условиях, приближенных к реальной эксплуатации.

автономных платформ обслуживания тяжелых сельскохозяйственных БЛА (агродронов):

1. Разработанная конструкция модульного роликового конвейера с групповым ременным приводом обеспечивает надежное перемещение груза массой

до 100 кг как по горизонтали, так и на подъем с уклоном до 6 град.

2. Использование шаговых двигателей NEMA23/NEMA24 с током фазы около 5 А и планетарным редуктором 1:20 обеспечивает стабильную работу во всем требуемом диапазоне скоростей (0,05...0,15 м/с) и достаточный запас момента для преодоления пиковых нагрузок, характерных для протяженной ременной передачи.

3. Фактическое энергопотребление при транспортировке груза 70...100 кг составляет 20...25 Вт на номинальной скорости 0,1 м/с, что обеспечивает возможность автономной работы от полевых

источников энергии. Наблюдаемая нелинейная зависимость мощности от скорости со значительной статической мощностью указывает на значительный вклад электромеханических потерь привода и сухого трения покоя.

4. Конструкция обладает высокой отказоустойчивостью, сохраняя работоспособность при выходе из строя или демонтаже отдельных роликов.

5. Существенный запас по моменту позволяет эксплуатировать конвейер при значительных отклонениях от горизонтали, снижая требования к точности установки платформы в поле.

### Список источников

1. Старовойтов В.И., Старовойтова О.А., Манокхина А.А. и др. Применение микроэлементов при выращивании картофеля – предпосылки использования дронов // *Агроинженерия*. 2021. № 4 (104). С. 14-20. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-4-14-20>
2. Степанов А.С., Фомина Е.А., Илларионова Л.В. и др. Аппроксимация временных рядов индексов вегетации (NDVI и EVI) для мониторинга сельхозкультур (посевов) Хабаровского края // *Информатика и автоматизация*. 2023. № 22 (6). С. 1473-1498. <https://doi.org/10.15622/ia.22.6.8>
3. Ronzhin A., Figurek A., Surovtsev V., Dibirova K. Digital transformation and precision farming as catalysts of rural development. *Land*. 2025;14:1464. <https://doi.org/10.3390/land14071464> EDN: NAHRUS
4. Старостин И.А., Давыдова С.А., Ещин А.В. Интеллектуальная система управления сельскохозяйственными роботами: формирование структуры // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25, № 3. С. 49-56. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-49-56>
5. Горный В.И., Балун О.В., Киселев А.В. и др. Алгоритм применения материалов спутниковых съемок для выбора перспективных участков при интродукции теплолюбивых сельскохозяйственных культур (на примере Новгородской области) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2025. Т. 22, № 3. С. 64-80. EDN: OLUOBV
6. Astapova M., Saveliev A., Ryabinov A. Application of unmanned aerial vehicles for precision spraying of chemicals in agronomic operations: A case study of potato desiccation. *Agriculture Digitalization and Organic Production. Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2024;397:71-81. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-4410-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-97-4410-7_6)
7. Юсупов Р.Х., Колесник Л.В. Система аварийной посадки беспилотного летательного аппарата сельскохозяйственного назначения // *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина»*. 2018. № 3 (85). С. 59-64. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-3-59-64>
8. Jindo K., Teklu M.G., van Boheeman K. et al. Unmanned aerial vehicle (UAV) for detection and prediction of damage caused by potato cyst nematode *G. pallida* on selected potato cultivars. *Remote Sensing*. 2023;15:1429. <https://doi.org/10.3390/rs15051429>
9. Kong J., Xie M., Wang H. Integrating autonomous vehicles and drones for last-mile delivery: A routing problem with two types of drones and multiple visits. *Drones*. 2025;9(4):280. <https://doi.org/10.3390/drones9040280>

### References

1. Starovoitov V.I., Starovoitova O.A., Manokhina A.A., Shabanov N.T., Chayka V.A. Application of trace elements in potato cultivation – prerequisites for the use of drones. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2021;4:14-20. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-4-14-20>
2. Stepanov A.S., Fomina E.A., Illarionova L.V. et al. Vegetation indices (NDVI and EVI) time series approximation for monitoring crops of Khabarovsk Territory. *Informatics and Automation*. 2023;22:1473-1498. (In Russ.) <https://doi.org/10.15622/ia.22.6.8>
3. Ronzhin A., Figurek A., Surovtsev V., Dibirova K. Digital transformation and precision farming as catalysts of rural development. *Land*. 2025;14:1464. <https://doi.org/10.3390/land14071464>
4. Starostin I.A., Davydova S.A., Eshchin A.V. Intelligent agricultural robot control system: structure formation. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(3):49-56. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-49-56>
5. Gornyy V.I., Balun O.V., Kiselev A.V. et al. Algorithm for using satellite imagery to identify promising areas for introduction of heat-loving agricultural crops: A case study of Novgorod Region. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2025;22(3):64-80. (In Russ.)
6. Astapova M., Saveliev A., Ryabinov A. Application of unmanned aerial vehicles for precision spraying of chemicals in agronomic operations: A case study of potato desiccation. *Agriculture Digitalization and Organic Production. Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2024;397:71-81. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-4410-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-97-4410-7_6)
7. Yusupov R.Kh., Kolesnik L.V. Emergency landing of an unmanned aerial vehicle for agricultural purpose. *Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin"*. 2018;(3):59-64. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-3-59-64>
8. Jindo K., Teklu M.G., van Boheeman K. et al. Unmanned aerial vehicle (UAV) for detection and prediction of damage caused by potato cyst nematode *G. pallida* on selected potato cultivars. *Remote Sensing*. 2023;15:1429. <https://doi.org/10.3390/rs15051429>
9. Kong J., Xie M., Wang H. Integrating autonomous vehicles and drones for last-mile delivery: A routing problem with two types of drones and multiple visits. *Drones*. 2025;9(4):280. <https://doi.org/10.3390/drones9040280>
10. Rodionov A.S., Matkurbanov T.A. Planning UAV flight trajectories for monitoring large areas. *Informatics and Automation*. 2025;24(3):791-827. (In Russ.) <https://doi.org/10.15622/ia.24.3.3>

10. Родионов А.С., Маткурбанов Т.А. Планирование траектории полета БЛА при мониторинге большой области // Информатика и автоматизация. 2025. № 3 (24) С. 791-827. <https://doi.org/10.15622/ia.24.3.3>
11. Нго К.Т., Солена О.Я., Ронжин А.Л. Анализ подвижных роботизированных платформ для обслуживания аккумуляторов беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2017. № 95. С. 11. EDN: ZHNXYH <http://trudymai.ru/published.php?ID=84444>
12. Антипов А.С., Кокуньо Ю.Г., Вольф Д.А., Широков А.С. Синтез комбинированного управления ориентацией и высотой квадрокоптера на основе блочного подхода с сигмовидными обратными связями // Информатика и автоматизация. 2025. Т. 24, № 3. С. 745-790. <https://doi.org/10.15622/ia.24.3.2>
13. Кулешов С.В., Кваснов А.В., Зайцева А.А., Ронжин А.Л. Комплексный подход к визуальной навигации по естественным ориентирам для БЛА, работающих в условиях недоступности ГНСС // Известия ЮФУ. Технические науки. 2025. № 2. С. 269-278. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2025-2-269-278>
14. Загазежева О.З., Бжихатлов К.Ч., Бароков Х.А., Кантiev З.Ю. Переход к роботизированным технологиям в сельских территориях на примере создания опытного района для разработки и внедрения беспилотных интеллектуальных робототехнических систем // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 6 (110). С. 186-193. <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2022-6-110-186-193>
15. Bouček Z., Neduchal P., Flidr M. DronePort: smart drone battery management system. In: Interactive Collaborative Robotics (ICR2021). Lecture Notes in Computer Science. 2021;12998:14-26. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-87725-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-87725-5_2)
16. Фетисов В.С., Ахмеров Ш.Р. Сравнительная характеристика автоматических зарядных и обменно-зарядных станций для обслуживания малых электрических беспилотных летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2019. № 2. С. 3-10. EDN: YWLMNF
17. Овчинников А.В., Новикова К.О., Фетисов В.С. Подзарядка беспилотных летательных аппаратов с вертикальным взлетом-посадкой на контактных платформах с адаптируемой шириной контактных полос // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. Т. 19, № 2. С. 80-89. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-80-89>
18. Воденников Д.А., Жилкина Ю.В. Сравнительно-оценочный анализ зарядно-защитных станций для беспилотных летательных аппаратов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2025. Т. 17, № 1 (65). С. 51-70. EDN: GFYWQK
19. Нгуа Ндонг Авеле Ж.Б., Горяинов В.С. Док-станция для БЛА: исследование построения автономной взлетно-посадочной платформы для беспилотных летательных аппаратов // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2023. Т. 16, № 9. С. 38-48. <https://doi.org/10.32603/2071-8985-2023-16-9-38-48>
20. Kozyr P., Vasunina Y., Saveliev A. Algorithm for replacing the battery of a robotic tool using servicing mobile robots on inhomogeneous surfaces. In: Interactive Collaborative Robotics (ICR2022). Lecture Notes in Computer Science. 2022;13719:296-283. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-23609-9\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-031-23609-9_24)
21. Anikin D., Ryabinov A., Saveliev A., Semenov A. Autonomous landing algorithm for UAV on a mobile robotic platform with a fractal marker. In: Interactive Collaborative Robotics (ICR2023). Lecture Notes in Computer Science. 2023;14214:357-368. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-43111-1\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-031-43111-1_32)
22. Костюков В.А., Бутенко М.Ю., Гисцов В.Г., Евдокимов И.Д. Исследование распределенной системы станций подзарядки для энергообеспечения группы БЛА мультикоптерного
11. Ngo Q.T., Solenaya O.Y., Ronzhin A.L. Analysis of mobile robotic platforms used to batteries service of unmanned aerial vehicles in autonomous missions. *Trudy MAI*. 2017;95:11. (In Russ.) <http://trudymai.ru/published.php?ID=84444>
12. Antipov A., Kokunko J., Wolf D., Shirokov A. Synthesis of combined quadcopter attitude and altitude control based on block approach with sigmoidal feedbacks. *Informatics and Automation*. 2025;24(3):745-790. (In Russ.) <https://doi.org/10.15622/ia.24.3.2>
13. Kuleshov S.V., Kvasnov A.V., Zaytseva A.A., Ronzhin A.L. Multipurpose approach to visual navigation based on landscapes for UAVs operating in GNSS-unavailable conditions. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2025;2:269-278. (In Russ.) <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2025-2-269-278>
14. Zagazezheva O.Z., Bzhikhatlov K.Ch., Barokov Kh.A., Kantiev Z.Yu. Transition to robotic technologies in rural areas on the example of creating a pilot area for the development and implementation of unmanned intelligent robotic systems. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2022;6(110):186-193. (In Russ.) <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2022-6-110-186-193>
15. Bouček Z., Neduchal P., Flidr M. DronePort: smart drone battery management system. In: Interactive Collaborative Robotics (ICR2021). *Lecture Notes in Computer Science*. 2021;12998:14-26. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-87725-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-87725-5_2)
16. Fetisov V.S., Akhmerov Sh.R. Comparative estimation of automatic charging and exchange-charging stations for maintenance of small electric unmanned aerial vehicles. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*. 2019;2:3-10. (In Russ.)
17. Ovchinnikov A.V., Novikova K.O., Fetisov V.S. Recharge of VTOL UAVs on landing platforms with adaptable contact band width. *Elektrotehnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*. 2023;19(2):80-89. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-80-89>
18. Vodennikov D.A., Zhilkina Yu.V. Comparative and evaluative analysis of charging and protective stations for unmanned aerial vehicles. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2025;17(1):51-70. (In Russ.)
19. Ngoua Ndong Avele J.B., Goryainov V.S. UAV Docking station: Study on building an autonomous takeoff and landing platform for unmanned aerial vehicles. *LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science*. 2023;16(9):38-48. (In Russ.) <https://doi.org/10.32603/2071-8985-2023-16-9-38-48>
20. Kozyr P., Vasunina Y., Saveliev A. Algorithm for replacing the battery of a robotic tool using servicing mobile robots on inhomogeneous surfaces. In: *Interactive Collaborative Robotics (ICR2022)*. *Lecture Notes in Computer Science*. 2022;13719:296-283. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-23609-9\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-031-23609-9_24)
21. Anikin D., Ryabinov A., Saveliev A., Semenov A. Autonomous landing algorithm for UAV on a mobile robotic platform with a fractal marker. In: *Interactive Collaborative Robotics (ICR2023)*. *Lecture Notes in Computer Science*. 2023;14214:357-368. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-43111-1\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-031-43111-1_32)
22. Kostyukov V.A., Butenko M.Yu., Gistsov V.G., Evdokimov I.D. Investigation of a distributed system of charging stations for the power supply of a group of multicopter-type UAVs. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2023;6:138-150. (In Russ.) <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-6-138-150>
23. Kuzmenkov M., Tatur M., Guzband I. System design methodology and preliminary design of a robotic service system for agricultural drones. In: Ronzhin A., Kundius V., Survotsev V. (eds) *Robotics in Agriculture. ADOP 2025. Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2026. vol 453. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-032-07171-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-032-07171-2_10)

типа // Известия ЮФУ. Технические науки. 2023. № 6 (236). С. 138-150. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-6-138-150>

23. Kuzmenkov M., Tatur M., Guzband I. System design methodology and preliminary design of a robotic service system for agricultural drones. In: Ronzhin A., Kundius V., Survtsev V. (eds) Robotics in Agriculture. ADOP 2025. Smart Innovation, Systems and Technologies, 2026. vol 453. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-032-07171-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-032-07171-2_10)

### Информация об авторах

- <sup>1</sup> **Дашевский Владимир Павлович**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; [vladimir.dashevsky@gmail.com](mailto:vladimir.dashevsky@gmail.com); SPIN-код: 7675-2463; <https://orcid.org/0000-0002-2285-1936>
- <sup>2</sup> **Бизин Максим Михайлович**, ведущий инженер; [maxim.bizin@strategic-it.ru](mailto:maxim.bizin@strategic-it.ru); SPIN-код: 5499-4214; <https://orcid.org/0009-0006-2314-9715>
- <sup>3</sup> **Галькин Юрий Валерьевич**, инженер-конструктор; [yuri.galykin@strategic-it.ru](mailto:yuri.galykin@strategic-it.ru); SPIN-код: 8448-3285; <https://orcid.org/0009-0000-1274-9754>
- <sup>4</sup> **Ронжин Андрей Леонидович**, д-р техн. наук, профессор, профессор РАН, главный научный сотрудник; [ronzhin@iias.spb.su](mailto:ronzhin@iias.spb.su); SPIN-код: 5579-4815; <https://orcid.org/0000-0002-8903-3508>
- <sup>1,2,3,4</sup> Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук; 199178, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, 14-я линия Васильевского острова, 39

### Вклад авторов

В.П. Дашевский – методология, проведение расчетов, аналитический обзор;  
 М.М. Бизин – исследование и описание конструктивно-технологических схем, изготовление и сборка опытного образца;  
 Ю.В. Галькин – разработка моделей опытного образца, сборка образца и доработка конструкции, проведение экспериментов;  
 А.Л. Ронжин – формулирование основной концепции исследований, аналитический обзор.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 24.10.2025, после рецензирования и доработки 05.03.2026, принята к публикации 26.03.2026

### Author Information

- Vladimir P. Dashevsky**<sup>1</sup>, CSc (Eng), Senior Research Engineer, [vladimir.dashevsky@gmail.com](mailto:vladimir.dashevsky@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-2285-1936>
- Maksim M. Bizin**<sup>2</sup>, Lead Engineer; [maxim.bizin@strategic-it.ru](mailto:maxim.bizin@strategic-it.ru); <https://orcid.org/0009-0006-2314-9715>
- Yuri V. Galykin**<sup>3</sup>, Design Engineer; [yuri.galykin@strategic-it.ru](mailto:yuri.galykin@strategic-it.ru); <https://orcid.org/0009-0000-1274-9754>
- Andrey L. Ronzhin**<sup>4</sup>, DSc (Eng), Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Chief Research Engineer; [ronzhin@iias.spb.su](mailto:ronzhin@iias.spb.su); Researcher ID: A-2930-2012; Scopus Author ID: 16643978200; <https://orcid.org/0000-0002-8903-3508>
- <sup>1,2,3,4</sup> St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 14th Line of Vasilievsky Island, 39, Russia, 199178

### Author Contributions

V.P. Dashevsky – research methodology; data curation; literature review;  
 M.M. Bizin – investigation; formal analysis; resources;  
 Yu.V. Galykin – investigation; resources; validation;  
 A.L. Ronzhin – conceptualization; literature review; data curation.

### Conflict of interests

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

Received 24.10.2025; Revised 05.03.2025; Accepted 26.03.2026

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 535.372:631.363

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-28-35>

## Определение содержания сырого протеина в жмыхах по потокам фотолюминесценции

*М.В. Беляков*<sup>1✉</sup>, *Е.А. Никитин*<sup>2</sup>, *Д.С. Пятченков*<sup>3</sup><sup>1,2,3</sup> Федеральний научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия<sup>1</sup> [bmw20100@mail.ru](mailto:bmw20100@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042><sup>2</sup> [evgeniy.nicks@yandex.ru](mailto:evgeniy.nicks@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990><sup>3</sup> [denis.piat@yandex.ru](mailto:denis.piat@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-5903-6142>

**Аннотация.** Определение белка в кормах методом фотолюминесцентной спектроскопии позволит существенно ускорить процесс приготовления кормов. Исследования проведены с целью анализа зависимостей параметров фотолюминесценции подсолнечного и соевого жмыхов от содержания в них сырого протеина для определения информативных параметров и спектральных диапазонов. Эксперимент проводили на дифракционном спектрофлуориметре SM 2203. Определяли спектральные характеристики возбуждения и спектральные характеристики фотолюминесценции измельченных до 1,8 мм частиц подсолнечного и соевого жмыхов с различным содержанием сырого протеина. Рассчитали интегральные параметры спектров – поглощательную способность и поток фотолюминесценции. Спектральные характеристики возбуждения исследуемых кормов расположены в области 300...500 нм и являются суперпозицией максимумов на длинах волн 290, 362, 414/424 нм и более слабого на 485 нм. Выявили, что с увеличением содержания протеина спектральная поглощательная способность жмыха возрастает. Зависимости интегральных потоков фотолюминесценции от содержания протеина статистически достоверны (коэффициенты детерминации – 0,84...0,99) и могут быть аппроксимированы линейными уравнениями регрессии. Для фотолюминесцентного определения содержания сырого протеина в подсолнечном жмыхе наиболее подходящими длинами волн возбуждающего излучения являются 362 и 414 нм, в соевом жмыхе – 362 и 424 нм. При создании единой методики целесообразно использовать длину волны возбуждения 362 нм и регистрировать поток фотолюминесценции в диапазоне 410...600 нм. Полученные спектральные параметры и уравнения регрессии могут быть использованы для создания экспрессных приборов контроля кормов и совершенствования технологических процессов при приготовлении кормовых смесей.

**Ключевые слова:** подсолнечный жмых; соевый жмых; протеин; содержание сырого протеина; спектр излучения; поток фотолюминесценции; спектральная поглощательная способность жмыха; спектральные характеристики возбуждения; спектральные характеристики фотолюминесценции

**Финансирование.** Работа выполнена в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в рамках госзадания FGUN-2025-0013.

**Для цитирования:** Беляков М.В., Никитин Е.А., Пятченков Д.С. Определение содержания сырого протеина в жмыхах по потокам фотолюминесценции. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(2):28-35 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-28-35>

## ORIGINAL ARTICLE

## Determination of crude protein content in oilcakes by photoluminescence fluxes

*M.V. Belyakov*<sup>1✉</sup>, *E.A. Nikitin*<sup>2</sup>, *D.S. Pyatchenkov*<sup>3</sup><sup>1,2,3</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia<sup>1</sup> [bmw20100@mail.ru](mailto:bmw20100@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042><sup>2</sup> [evgeniy.nicks@yandex.ru](mailto:evgeniy.nicks@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990><sup>3</sup> [denis.piat@yandex.ru](mailto:denis.piat@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-5903-6142>

**Abstract.** Determination of crude protein in animal feed using photoluminescence spectroscopy can significantly accelerate the feed preparation process. This study aimed to analyze the dependencies of photoluminescence parameters in sunflower and soybean oilcakes on their crude protein content to identify informative parameters and optimal spectral ranges. The experiment was conducted using a SM 2203 diffraction spectrofluorometer.

The research involved determining the excitation and photoluminescence spectral characteristics of sunflower and soybean oilcake particles ground to 1.8 mm with varying crude protein levels. Integrated spectral parameters, specifically absorptivity and photoluminescence flux, were calculated. The excitation characteristics of the studied feeds are located in the 300-500 nm range and represent a superposition of peaks at 290, 362, and 414/424 nm, with a weaker peak at 485 nm. It was found that spectral absorptivity increases with higher protein content. The dependencies of integrated photoluminescence fluxes on protein content are statistically significant (coefficients of determination = 0.84–0.99) and can be approximated by linear regression equations. For the photoluminescence-based determination of crude protein, the most suitable excitation wavelengths are 362 and 414 nm for sunflower oilcake, and 362 and 424 nm for soybean oilcake. For a unified methodology, it is advisable to use an excitation wavelength of 362 nm while recording the photoluminescence flux in the 410–600 nm range. The resulting spectral parameters and regression equations can be utilized to develop rapid-testing instruments and optimize technological processes in the preparation of feed mixtures.

**Keywords:** sunflower cake; soy cake; crude protein; excitation spectrum; radiation spectrum; photoluminescence flux; statistical parameters

**Funding.** The research was carried out at Federal Scientific Agroengineering Center VIM (FSAC VIM) within the framework of the State assignment No. FGUN-2025-0013.

**For citation:** Belyakov M.V., Nikitin E.A., Pyatchenkov D.S. Determination of crude protein content in oilcakes by photoluminescence fluxes. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(2):28-35 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-28-35>

### Введение

Стратегия кормления животных определяет значимые аспекты эффективности агропредприятия: продуктивное долголетие животных, содержание питательных веществ в молоке [1, 2], капиталоотдача от затрат на кормление. Правильно сбалансированный рацион кормления животных способствует оптимальному метаболизму, снижению риска заболеваний, содействуя устойчивому развитию животноводства и уменьшению экологической нагрузки [3].

В кормлении животных особую роль играет концентрация протеина, служащего строительным материалом для синтеза мышечной ткани животного и выработки молока [4]. Дефицит протеина приводит к расстройству физиологических процессов и снижению продуктивности. В то же время его избыток не успевает усваиваться организмом, что приводит к выведению азота в виде мочевины, перерасходу кормов и росту себестоимости продукции [5]. При составлении суточного рациона кормления крупного рогатого скота решается множество задач оптимизации по различным критериям, главными из которых являются уровень потребления сухого вещества и концентрация протеина. Помимо набора живой массы, уровень суточного потребления протеина может влиять на репродуктивные качества коров и здоровье телят [6], определять суточные надои и концентрацию белка в молоке [7, 8].

Наиболее дешевым источником белка в рационе крупного рогатого скота являются побочные продукты переработки масличных культур [9]. Наиболее распространены соевый и подсолнечный

жмыхи. Соя, как высокобелковая культура, решает проблему обеспечения протеина во многих регионах страны [10]. Соевый жмых по биологической ценности и содержанию незаменимых аминокислот занимает лидирующие позиции среди растительных кормов [11]. Его использование положительно сказывается на продуктивности молочных коров [12], показателях роста бройлеров [13] и эффективности откорма поросят [14]. Подсолнечный жмых, содержащий 30...40% протеина и обладающий высокой энергетической ценностью, также является эффективной концентрированной добавкой к кормовой смеси КРС [15]. Его белок легко расщепляется в рубце, улучшает использование азота и способствует повышению продуктивности и мясных качеств жвачных животных [16].

Для определения белка в кормах применяют арбитражные и современные методы. К арбитражным методам относят метод Кьельдаля (обработка образца кислотой с последующим титрованием высвободившегося азота и расчетом белка через поправочный коэффициент) и метод Дюма (определение количества азота при сжигании образца). Среди колориметрических методов [17] широко используется метод Брэдфорда [18], основанный на сдвиге максимума поглощения красителя бриллиантовый синий G-250 с 465 до 595 нм при связывании с белком, и метод Лоури, базирующийся на измерении поглощения калибровочных растворов на спектрофотометре [19, 20]. Среди наиболее совершенных оптико-спектральных методов выделяют спектроскопию отражения в ближней инфракрасной области [21], рамановскую

гиперспектральную визуализацию [22] и др. Несмотря на точность количественного определения протеинов, все перечисленные методы характеризуются достаточной продолжительностью анализа, для их проведения необходимы наличие дорогостоящего оборудования и химических реагентов, разрушение образца. В связи с этим перспективным представляется фотолюминесцентный способ определения белка в кормах, на основе которого возможно создание устройств, лишенных указанных ограничений.

**Цель исследований:** изучение зависимостей параметров фотолюминесценции подсолнечного и соевого жмыхов от содержания сырого протеина для определения информативных параметров и спектральных диапазонов.

**Материалы и методы**

Экспериментальные исследования проводили в течение 2024-2025 гг. на базе лаборатории инновационных технологий и технических средств кормления в животноводстве ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. Исследуемые образцы жмыхов получены в 2023 г. из ООО «Агрочерноземье» (Курская область).

Образцы жмыхов измельчали в лабораторной мельнице до размеров не более 1,8 мм для соответствия требованиям к кормам для крупного рогатого скота включая молодняк.

Содержание протеина в измельченных жмыхах варьировали путем добавления измельченного соевого белка с последующим тщательным перемешиванием. Содержание сырого протеина измеряли

на анализаторе кормов FOSS NIRS DS2500 с погрешностью до 2%.

Спектры возбуждения  $\eta(\lambda)$  при синхронном сканировании и люминесценции  $\varphi(\lambda)$  измеряли на дифракционном спектрофлуориметре CM 2203. Повторность измерений – двадцатикратная.

Интегральные параметры спектров возбуждения (интегральную поглощательную способность  $H$ ) и спектров люминесценции (поток фотолюминесценции  $\Phi$ ) рассчитывали по формулам:

$$H = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta(\lambda) d\lambda; \tag{1}$$

$$\Phi = \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \varphi(\lambda) d\lambda, \tag{2}$$

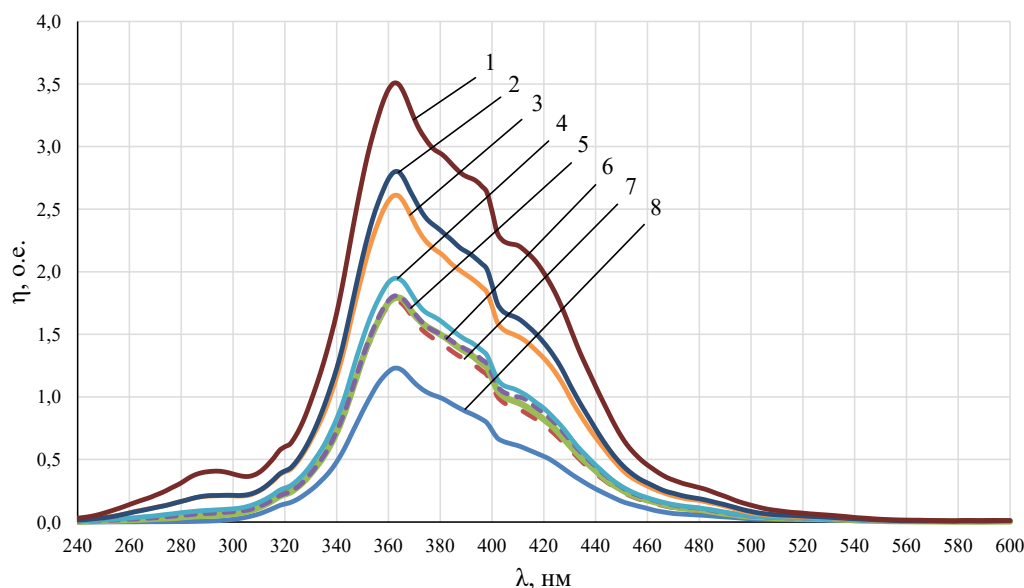
где  $\eta(\lambda)$  – спектр возбуждения;  $\varphi(\lambda)$  – спектр люминесценции;  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  – границы спектров.

Методика спектральных измерений и обработки результатов подробно описана в работе [23].

**Результаты и их обсуждение**

Спектры возбуждения  $\eta(\lambda)$  при синхронном сканировании подсолнечного жмыха с различным содержанием сырого протеина  $C_p$  представлены на рисунке 1.

Спектральные характеристики возбуждения измельченного подсолнечного жмыха расположены в области около 300...500 нм и являются суперпозицией максимумов на 362 нм, 424 нм и более слабого



**Рис. 1. Синхронные спектры возбуждения подсолнечного жмыха с различным содержанием сырого протеина  $C_p$ , %:**

1 – 45,60; 2 – 39,55; 3 – 38,44; 4 – 33,56; 5 – 32,05; 6 – 31,07; 7 – 29,72; 8 – 25,14

**Fig. 1. Synchronous excitation spectra of sunflower cakes with different crude protein content  $C_p$ , %:**

1 – 45.60; 2 – 39.55; 3 – 38.44; 4 – 33.56; 5 – 32.05; 6 – 31.07; 7 – 29.72; 8 – 25.14

на 485 нм, характерных для большинства растительных биообъектов [24, 25]. С увеличением содержания протеина спектральная поглощательная способность жмыха  $\eta$  заметно возрастает: при росте  $C_p$  в 1,8 раза максимум спектра увеличивается примерно в 2,9 раза. Это можно объяснить более интенсивным свечением аминокислот.

Спектры возбуждения соевого жмыха аналогично спектрам подсолнечного находятся в диапазоне 250...500 нм с главными максимумами примерно на 290, 362 и 414 нм, а также менее выраженными максимумами на длинах волн 318 нм и 485 нм. Отличием являются разное соотношение интенсивностей максимумов 362 нм и 424 нм и большая интенсивность максимумов для соевого жмыха по причине более светлого цвета. Если более длинноволновые максимумы 362 нм и 414 нм были отмечены ранее для целых зерен [23], то коротковолновый максимум 290 нм отмечен только для измельченных продуктов.

По формулам (1) и (2) рассчитаны интегральные поглощательные способности  $H$  во всем измеряемом диапазоне (230...600 нм) и на отдельных его участках, соответствующих основным максимумам (табл. 1, 2).

Для подсолнечного жмыха измерены спектральные характеристики фотолюминесценции при длине волны возбуждения ( $\lambda_b$ ) 362 и 414 нм, для соевого жмыха – при 282, 362 и 424 нм. По формуле (2) рассчитали потоки фотолюминесценции  $\Phi$  в трех диапазонах: 320...500 нм для  $\lambda_b = 280$  нм; 410...600 нм для  $\lambda_b = 362$  нм; 470...650 нм для  $\lambda_b = 414$  и 424 нм (табл. 1, 2).

Зависимости потоков фотолюминесценции  $\Phi_\lambda$  от содержания протеина  $C_p$  и их линейная аппроксимация представлены на рисунках 3, 4.

На основании зависимостей  $C_p(\Phi_\lambda)$  подсолнечного жмыха и их аппроксимации получены обратные уравнения регрессии  $C_p(\Phi)$  при длине волны возбуждения 414 нм и 362 нм с коэффициентами детерминации, соответственно,  $R^2 = 0,96$  и  $R^2 = 0,98$ :

$$C_p = 0,057\Phi_{424} + 19,382; \quad (3)$$

$$C_p = 0,040\Phi_{362} + 12,831. \quad (4)$$

Обе линейные зависимости  $C_p(\Phi_\lambda)$  подсолнечного жмыха статистически достоверны, но для  $\lambda_b = 362$  нм немного ниже относительная погрешность определения потока и в два раза больше пропорциональный потоку максимальный фотосигнал.

Уравнения регрессии  $C_p(\Phi)$  для соевого жмыха при длине волны возбуждения 424, 362 и 282 нм с коэффициентами детерминации, соответственно,  $R^2 = 0,97$ ,  $R^2 = 0,97$  и  $R^2 = 0,84$  выглядят следующим образом:

$$C_p = 0,047\Phi_{424} - 56,856; \quad (5)$$

$$C_p = 0,040\Phi_{362} - 4,970; \quad (6)$$

$$C_p = 0,206\Phi_{282} - 8,146. \quad (7)$$

Для соевого жмыха использование  $\lambda_b = 282$  нм является нецелесообразным ввиду сравнительно низкого потока (табл. 2) и небольшого коэффициента детерминации ( $R^2 = 0,84$ ). Зависимости  $C_p(\Phi_\lambda)$  для  $\lambda_b = 362$  нм и  $\lambda_b = 424$  нм имеют небольшую

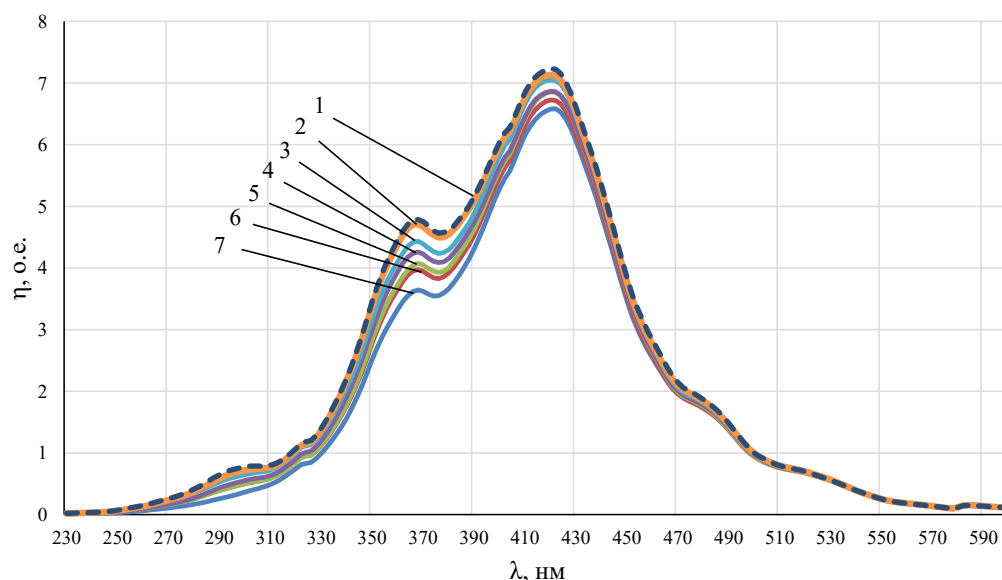


Рис. 2. Синхронные спектры возбуждения соевого жмыха с различным содержанием сырого протеина  $C_p$ , %: 1 – 51,63; 2 – 50,82; 3 – 48,16; 4 – 47,37; 5 – 46,30; 6 – 45,20; 7 – 43,10

Fig. 2. Synchronous excitation spectra of soy cakes with different crude protein content  $C_p$ , %: 1 – 51.63; 2 – 50.82; 3 – 48.16; 4 – 47.37; 5 – 46.30; 6 – 45.20; 7 – 43.10

Таблица 1

Интегральные параметры спектров возбуждения и люминесценции подсолнечного жмыха с различным содержанием протеина  $C_p$

Table 1

Integral parameters of the excitation and luminescence spectra of sunflower cakes with different  $C_p$  protein content

Содержание сырого протеина, $C_p$ , %	Н±ΔН, о.е., для диапазона, нм			Φ±ΔΦ, о.е., для $\lambda_{ex}$ , нм	
	230...600	325...405	405...450	362	414
25,14±0,43	91±8	66±6	18±1,4	327±28	133±10
29,72±0,51	136±9	97±6	27±1,8	447±24	194±13
31,07±0,53	140±10	100±7	29±2,3	458±28	205±16
32,05±0,48	145±9	101±6	31±2,1	465±25	217±14
33,56±0,50	156±10	109±7	32±3,0	487±29	224±21
38,44±0,65	220±14	146±9	49±4,3	611±38	309±26
39,55±0,63	237±11	157±7	54±3,2	650±32	332±24
45,60±0,82	320±16	203±9	75±5,2	842±36	488±34

Таблица 2

Интегральные параметры спектров возбуждения и люминесценции соевого жмыха с различным содержанием протеина  $C_p$

Table 2

Integral parameters of the excitation and luminescence spectra of soy cakes with different  $C_p$  protein content

Содержание сырого протеина, $C_p$ , %	Н±ΔН, о.е., для диапазона, нм				Φ±ΔΦ, о.е., для $\lambda_{ex}$ , нм		
	230...600	270...310	320...370	370...450	282	362	424
43,10±0,75	692±16	13±2	123±6	418±10	252±9	1196±30	2156±40
45,20±0,77	725±26	18±3	137±9	433±13	257±12	1239±47	2174±46
46,30±0,65	737±25	18±3	139±8	441±12	263±12	1263±46	2208±51
47,37±0,81	754±14	20±2	147±5	466±7	268±6	1286±23	2229±38
48,16±0,95	784±11	23±4	155±9	459±5	284±11	1343±24	2269±45
50,82±0,76	809±19	26±3	166±8	470±8	284±12	1374±42	2296±24
51,63±0,87	824±31	28±4	169±10	477±15	282±15	1395±53	2328±55

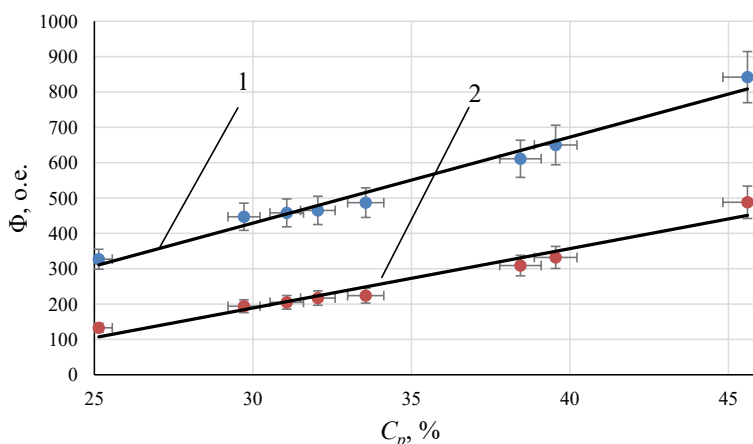
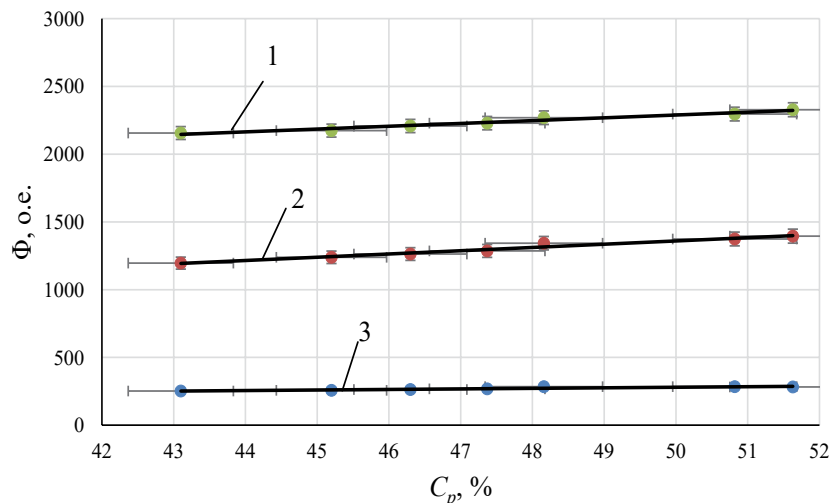


Рис. 3. Зависимость потока фотолюминесценции (Φ) от концентрации протеина ( $C_p$ ) в подсолнечном жмыхе при характерной длине волны возбуждения: 1 – 362 нм; 2 – 414 нм

Fig. 3. Relationship between the photoluminescence flux (Φ) and the protein concentration ( $C_p$ ) in sunflower cakes at an excitation wavelength: 1 – 362 nm, 2 – 414 nm



**Рис. 4. Зависимость потока фотолюминесценции ( $\Phi$ ) от концентрации протеина ( $C_p$ ) в соевом жмыхе при характерной длине волны возбуждения:**

1 – 424 нм; 2 – 362 нм; 3 – 282 нм

**Fig. 4. Relationship between the photoluminescence flux ( $\Phi$ ) and the protein concentration ( $C_p$ ) in soy cakes at an excitation wavelength of:**

1 – 424 nm; 2 – 362 nm; 3 – 282 nm

погрешность определения потока – 3,8 и 2,4% соответственно, а также высокий уровень фотосигнала.

Сравнивая уравнения (3)-(4) и (5)-(7), следует отметить разные знаки при свободных членах уравнений регрессии, что объясняется разным уровнем потоков фотолюминесценции: для более светлого соевого жмыха фотосигнал кратно выше.

Несмотря на несколько большую погрешность предлагаемого метода (3,8...8,6% по сравнению с 2% у FOSS NIRS), использование фотолюминесцентных датчиков позволит значительно сократить время анализа до 1-2 с (FOSS NIRS и подобные анализаторы прогреваются 40 мин и выдают результат в течение 10 с), а также создать более дешевый прибор, работающий в полевых условиях.

Экспрессный прибор контроля кормов стоимостью не более 100...150 тыс. руб. будет дешевле инфракрасных аналогов FOSS NIRS ценой от 10 млн руб., X-NIR (от 1,75 млн руб.), SCiO Cup (от 300 тыс. руб.), Инфраскан-4200 (от 2,75 млн руб.), ИнфраЛЮМ ФТ-1 2 (от 1,8 млн руб.).

Дальнейшими этапами исследований являются расширение номенклатуры анализируемых кормов

и снижение погрешности измерений путем применения интегральных датчиков фотосигнала (фотодиодов), реализующих многократные измерения (до 250 измерений в секунду).

### Выводы

1. При увеличении содержания протеина в жмыхах заметно усиливаются их фотолюминесцентные свойства, что объясняется свечением аминокислот.

2. Наиболее подходящими длинами волн возбуждающего излучения для подсолнечного жмыха являются 362 и 414 нм, для соевого – 362 и 424 нм. При создании единой методики фотолюминесцентного определения протеина целесообразно использовать длину волны возбуждения 362 нм и регистрировать поток фотолюминесценции в диапазоне 410...600 нм.

3. Полученные спектральные параметры и уравнения регрессии (3)-(6) могут быть использованы для создания приборов экспресс-контроля кормов в технологических линиях, а также в прицепных смесителях для последующей оценки потребления сырого протеина конкретной технологической группы животных на ферме.

### Список источников

1. Martins L.F., Wasson D.E., Hristov A.N. Feeding dairy cows for improved metabolism and health. *Animal Frontiers*. 2022;12(5):29-36. <https://doi.org/10.1093/af/vfac059>
2. Moorby J.M., Fraser M.D. Review: New feeds and new feeding systems in intensive and semi-intensive forage-fed ruminant livestock systems. *Animal*. 2021;15:100297. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100297>

### References

1. Martins L.F., Wasson D.E., Hristov A.N. Feeding dairy cows for improved metabolism and health. *Animal Frontiers*. 2022;12(5):29-36. <https://doi.org/10.1093/af/vfac059>
2. Moorby J.M., Fraser M.D. Review: New feeds and new feeding systems in intensive and semi-intensive forage-fed ruminant livestock systems. *Animal*. 2021;15:100297. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100297>

3. Untea A.E., Saracila M., Vlaicu P.A. Feeding strategies and nutritional quality of animal products. *Agriculture*. 2023;13(9):1788. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091788>
4. Рыжкова Г.Ф., Ярован Н.И., Милукова М.В. Влияние соевой муки в рационах коров в период лактации на химический состав молока и молочную продуктивность // Ветеринария и кормление. 2022. № 1. С. 48-51. <https://doi.org/10.30917/АТТ-ВК-1814-9588-2022-1-11>
5. Мартынов В.А., Ломова Т.Г. Роль энергопротеиновой добавки в кормлении лактирующих коров // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2022. № 4 (65). С. 147-152. <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2022-65-4-147-152>
6. Meneses J.A.M., Nascimento K.B., Galvão M.C. et al. Protein supplementation during mid-gestation affects maternal voluntary feed intake, performance, digestibility, and uterine blood flow of beef cows. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 2024;108(6):1678-1691. <https://doi.org/10.1111/jpn.14001>
7. Doran M.J., Mulligan F.J., Lynch M.B. et al. Effects of protein supplementation strategy and genotype on milk production and nitrogen utilisation efficiency in late-lactation, spring-calving grazing dairy cows. *Animals*. 2023;13(4):570. <https://doi.org/10.3390/ani13040570>
8. Ghaffari M.H., Drackley J.K., Kertz A.F. Invited review: Unlocking growth and development potential in dairy calves through precision protein feeding. *Journal of Dairy Science*. 2025;108(7):6601-6616. <https://doi.org/10.3168/jds.2025-26419>
9. Oancea A.G., Dragomir C., Cismileanu A. The effects of minor oilseeds cakes on rumen metabolism and productive performances of ruminants. *Archiva Zootechnica*. 2022;25(2):130-157. EDN: VWLVDZ
10. Туктафулин Г.С., Гогаев О.К., Годжиев Р.С., Накастхоева Х.А. Перспективы использования сои в кормлении лактирующих коров // Известия Горского государственного аграрного университета. 2020. Т. 57, № 2. С. 56-60. EDN: RNFMRX
11. Кандроков Р.Х., Поречная Е.С., Смирнова А.Р. Переработка соевого шрота и жмыха в муку и отруби // Вестник АПК Верхневолжья. 2022. № 4 (60). С. 92-99. <https://doi.org/10.35694/YARCX.2022.60.4.011>
12. Туктафулин Г.С., Гогаев О.К., Годжиев Р.С. Использование сои в рационах высокопродуктивных коров // Известия Горского государственного аграрного университета. 2019. Т. 56, № 2. С. 62-66. EDN: SRBHUX
13. Janocha A., Milczarek A., Pietrusiak D. et al. Efficiency of soybean products in broiler chicken nutrition. *Animals*. 2022;12(3):294. PMID: PMC8833819
14. Johannsen J.C., Nørgaard J.V., Theil P.K. et al. Effects of a high protein starter diet with fermented soybean cake on growth performance of organic pigs weaned outdoor. *Livestock Science*. 2023;267:105141. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.105141>
15. Усеня Ю.С., Садовская А.В., Филатова Л.В. и др. Перспективы использования вторичных продуктов переработки масличных культур для обогащения пищевых концентратов // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2020. Т. 13, № 1 (47). С. 28-35. EDN: MNEHDE
16. Da Silva Oliveira V., Barbosa A.M., De Andrade E.A. et al. Sunflower cake from the biodiesel industry in the diet improves the performance and carcass traits of nellore young bulls. *Animals*. 2022;12(23):3243. PMID: PMC9741455
17. Hayes M. Measuring protein content in food: an overview of methods. *Foods*. 2020;9(10):1340. PMID: PMC7597951
18. Karimi F., Hamidian Y., Behrouzifar F. et al. An applicable method for extraction of whole seeds protein and its determination through Bradford's method. *Food and Chemical Toxicology*. 2022;164:113053. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2022.113053>
19. Rizvi N.B., Aleem S., Khan M.R., Ashraf S., Busquets R. Quantitative estimation of protein in sprouts of *Vigna radiate* (Mung
3. Untea A.E., Saracila M., Vlaicu P.A. Feeding strategies and nutritional quality of animal products. *Agriculture*. 2023;13(9):1788. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091788>
4. Ryzhkova G.F., Yarovan N.I., Milyukova M.V. The effect of soy flour on the chemical composition of milk and milk producing ability in the diets of cows during their lactation. *Veterinaria i kormlenie*. 2022;1:48-51. (In Russ.)
5. Martynov V.A., Lomova T.G. The role of energy-protein supplementation in feeding lactation cow. *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*. 2022;(4):147-152. (In Russ.) <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2022-65-4-147-152>
6. Meneses J.A.M., Nascimento K.B., Galvão M.C. et al. Protein supplementation during mid-gestation affects maternal voluntary feed intake, performance, digestibility, and uterine blood flow of beef cows. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 2024;108(6):1678-1691. <https://doi.org/10.1111/jpn.14001>
7. Doran M.J., Mulligan F.J., Lynch M.B. et al. Effects of protein supplementation strategy and genotype on milk production and nitrogen utilisation efficiency in late-lactation, spring-calving grazing dairy cows. *Animals*. 2023;13(4):570. <https://doi.org/10.3390/ani13040570>
8. Ghaffari M.H., Drackley J.K., Kertz A.F. Invited review: Unlocking growth and development potential in dairy calves through precision protein feeding. *Journal of Dairy Science*. 2025;108(7):6601-6616. <https://doi.org/10.3168/jds.2025-26419>
9. Oancea A.G., Dragomir C., Cismileanu A. The effects of minor oilseeds cakes on rumen metabolism and productive performances of ruminants. *Archiva Zootechnica*. 2022;25(2):130-157.
10. Thuktafulin G.S., Gogaev O.K., Godzhiev R.S., Nakasthioeva Kh.A. Prospects for soybean use in lactating cows feeding. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2020;57(2):56-60. (In Russ.)
11. Kandrov R.H., Porechnaya E.S., Smirnova A.R. Processing of soybean meal and cake into flour and bran. *Vestnik APK Verkhnevolzhya=Agroindustrial Complex of Upper Volga Region Herald*. 2022;4(60):92-99. (In Russ.)
12. Tuktfulin G.S., Gogaev O.K., Gogijev R.S. Use of soybeans in diets of highly productive cows. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2019;56(2):62-66.
13. Janocha A., Milczarek A., Pietrusiak D. et al. Efficiency of soybean products in broiler chicken nutrition. *Animals*. 2022;12(3):294. PMID: PMC8833819
14. Johannsen J.C., Nørgaard J.V., Theil P.K. et al. Effects of a high protein starter diet with fermented soybean cake on growth performance of organic pigs weaned outdoor. *Livestock Science*. 2023;267:105141. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.105141>
15. Usenya Ju.S., Sadovskaya A.V., Filatova L.V., Roslik V.L., Garinskaya M.I. Prospects for the use of secondary products of processing of oil crops for the enrichment of food concentrate. *Food industry: Science and Technologies*. 2020;13(1):28-35. (In Russ.)
16. Da Silva Oliveira V., Barbosa A.M., De Andrade E.A. et al. Sunflower cake from the biodiesel industry in the diet improves the performance and carcass traits of nellore young bulls. *Animals*. 2022;12(23):3243. PMID: PMC9741455
17. Hayes M. Measuring protein content in food: an overview of methods. *Foods*. 2020;9(10):1340. PMID: PMC7597951
18. Karimi F., Hamidian Y., Behrouzifar F. et al. An applicable method for extraction of whole seeds protein and its determination through Bradford's method. *Food and Chemical Toxicology*. 2022;164:113053. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2022.113053>
19. Rizvi N.B., Aleem S., Khan M.R., Ashraf S., Busquets R. Quantitative estimation of protein in sprouts of *Vigna radiate* (Mung

through Bradford's method. *Food and Chemical Toxicology*. 2022;164:113053. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2022.113053>

19. Rizvi N.B., Aleem S., Khan M.R., Ashraf S., Busquets R. Quantitative estimation of protein in sprouts of *Vigna radiate* (Mung Beans), *Lens culinaris* (Lentils), and *Cicer arietinum* (Chickpeas) by Kjeldahl and Lowry methods. *Molecules*. 2022;27(3):814. PMID: PMC8839272

20. McClements D.J., Kinchla A.J., Nolden A.A. et al. Methods for testing the quality attributes of plant-based foods: Meat-and processed-meat analogs. *Foods*. 2021;10(2):260. PMID: PMC7911933

21. Попов В.С., Шеленга Т.В., Блинова Е.В., Хорева В.И. Применение БИК-спектроскопии для определения основных биохимических показателей качества зерна у овса песчаного // Биотехнология и селекция растений. 2024. Т. 7, № 2. С. 31-41. <https://doi.org/10.30901/2658-6266-2024-2-01>

22. Aulia R., Amanah H.Z., Lee H. et al. Protein and lipid content estimation in soybeans using Raman hyperspectral imaging. *Frontiers in Plant Science*. 2023;14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1167139>

23. Беляков М.В. Оптические люминесцентные свойства семян сельскохозяйственных растений // Агрофизика. 2024. № 4. С. 72-78. <https://doi.org/10.25695/AGRP.2024.04.09>

24. Matveeva T.A., Sarimov R.M., Persidskaya O.K. et al. Application of fluorescence spectroscopy for early detection of fungal infection of winter wheat grains. *AgriEngineering*. 2024;6:3137-3158. EDN: JEGUAV

25. Donaldson L. Autofluorescence in plants. *Molecules*. 2020;25:2393. EDN: GGFVPV PMID: PMC7288016

#### Информация об авторах

<sup>1</sup> **Беляков Михаил Владимирович**, д-р техн. наук, главный научный сотрудник; [bmw20100@mail.ru](mailto:bmw20100@mail.ru); SPIN-код: 2864-9937; <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>

<sup>2</sup> **Никитин Евгений Александрович**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; [evgeniy.nicks@yandex.ru](mailto:evgeniy.nicks@yandex.ru); SPIN-код: 7453-6947; <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>

<sup>3</sup> **Пятченков Денис Сергеевич**, младший научный сотрудник; [denis.piat@yandex.ru](mailto:denis.piat@yandex.ru); SPIN-код: 7135-4229 <https://orcid.org/0000-0002-5903-6142>

<sup>1,2,3</sup> Федеральное научное агроинженерное учреждение ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

#### Вклад авторов

Беляков М.В. – концептуализация, методология, руководство исследованиями, верификация данных;

Никитин Е.А. – ресурсы, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

Пятченков Д.С. – проведение исследований, формальный анализ, визуализация, создание черновика рукописи

#### Конфликт интересов

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

Статья поступила 02.12.2025, после рецензирования и доработки 18.02.2026, принята к публикации 26.03.2026

Beans), *Lens culinaris* (Lentils), and *Cicer arietinum* (Chickpeas) by Kjeldahl and Lowry methods. *Molecules*. 2022;27(3):814. PMID: PMC8839272

20. McClements D.J., Kinchla A.J., Nolden A.A. et al. Methods for testing the quality attributes of plant-based foods: Meat-and processed-meat analogs. *Foods*. 2021;10(2):260. PMID: PMC7911933

21. Popov V.S., Shelenga T.V., Blinova E.V., Khoreva V.I. Application of NIR spectroscopy to determine the basic biochemical parameters of black oat grain quality. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2024;7(2):31-41. (In Russ.) <https://doi.org/10.30901/2658-6266-2024-2-01>

22. Aulia R., Amanah H.Z., Lee H. et al. Protein and lipid content estimation in soybeans using Raman hyperspectral imaging. *Frontiers in Plant Science*. 2023;14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1167139>

23. Belyakov M.V. Optical luminescent properties of agricultural plants' seeds. *Agrophysica*. 2024;4:72-79. (In Russ.)

24. Matveeva T.A., Sarimov R.M., Persidskaya O.K. et al. Application of fluorescence spectroscopy for early detection of fungal infection of winter wheat grains. *AgriEngineering*. 2024;6:3137-3158.

25. Donaldson L. Autofluorescence in plants. *Molecules*. 2020;25:2393. PMID: PMC7288016

#### Author Information

**Mikhail V. Belyakov**<sup>1</sup>, DSc (Eng), Chief Research Engineer; [bmw20100@mail.ru](mailto:bmw20100@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>; ResearcherID: W-2746-2018; Scopus Author ID: 6701456418

**Evgeniy A. Nikitin**<sup>2</sup>, CSc (Eng), Senior Research Engineer; [evgeniy.nicks@yandex.ru](mailto:evgeniy.nicks@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>; ResearcherID: AZZ-6665-2020; Scopus Author ID: 57216910742;

**Denis S. Pyatchenkov**<sup>3</sup>, Junior Research Engineer; [denis.piat@yandex.ru](mailto:denis.piat@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-5903-6142>; ResearcherID: JYP-8066-2024; Scopus Author ID: 57735507400

<sup>1,2,3</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Moscow, 1st Institutskiy Proezd Str., 5

#### Author Contribution

Belyakov M.V. – conceptualization, methodology, research supervision, data verification;

Nikitin E.A. – resources, writing – review and editing of the manuscript;

Pyatchenkov D.S. – investigation, formal analysis, visualization, writing – original draft.

#### Conflict of interests

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

Received 02.12.2025; Revised 18.02.2026; Accepted 26.03.2026

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 629.366:631.3

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-36-46>

## Исследование давления на почву треугольного неподрессоренного гусеничного движителя с опорным обводным колесом и внешней амортизацией

*В.П. Лапик*<sup>1✉</sup>, *И.П. Адылин*<sup>2</sup>, *А.Е. Кузнецов*<sup>3</sup>, *П.В. Лапик*<sup>4</sup>, *А.В. Дьяченко*<sup>5</sup>, *О.В. Кубаткина*<sup>6</sup>

<sup>1,2,5,6</sup> Брянский государственный аграрный университет; г. Брянск, Россия

<sup>3</sup> Министерство промышленности Республики Беларусь; г. Минск, Республика Беларусь

<sup>4</sup> АО «Транснефть Дružба»; г. Брянск, ул. Уральская, 113

<sup>1</sup> [V.P.Lapick@mail.ru](mailto:V.P.Lapick@mail.ru) ✉

<sup>2</sup> [ivanpetrovich@adylin.ru](mailto:ivanpetrovich@adylin.ru); <https://orcid.org/0000-0003-4735-1935>

<sup>3</sup> [kuznetsov@bryanskselmash.ru](mailto:kuznetsov@bryanskselmash.ru)

<sup>4</sup> [pasha\\_lapik@mail.ru](mailto:pasha_lapik@mail.ru)

<sup>5</sup> [avdyachenkoo@mail.ru](mailto:avdyachenkoo@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-5631-3979>

<sup>6</sup> [olgadyachenk@yandex.ru](mailto:olgadyachenk@yandex.ru)

**Аннотация.** Для сохранения почвенного покрова при заготовке кормов на переувлажненных почвах целесообразно использовать гусеничный движитель с упругими резинокордными траками. Исследования проведены с целью разработки физико-математической модели, оценивающей способность упругих эластичных опорных устройств снижать нагрузки, действующие на опорную ветвь треугольного неподрессоренного гусеничного движителя с опорным обводным колесом, при взаимодействии его с переувлажненными почвами. Аналитическим путем определены оптимальные параметры внешней амортизации гусеничной цепи треугольного неподрессоренного гусеничного движителя с опорным обводным колесом. В отличие от неамортизированного движителя наибольшее давление на опорное основание наблюдается при нахождении оси катка или обводного колеса над серединой очередного преодолеваемого звена гусеницы, а наименьшее – при прохождении им шарнира. Установлено, что давление движителя на почву можно описать как взаимодействие двух процессов с гармонической функцией в неподвижной относительно почвы системе координат и с последовательностью импульсов в подвижной, связанной с движителем. Разработанная физико-математическая модель нагрузок, действующих на опорную ветвь треугольного неподрессоренного гусеничного движителя с опорным обводным колесом, позволяет определить характеристики давления движителя на почву. Эпюры давления под опорной частью движителя для различных моментов времени показали отсутствие значительных пиков давления, формирующих глубину колеи на переувлажненных почвах, что доказывает демпфирующие способности применяемых резинокордных траков. Разработанная модель позволяет установить оптимальные конструктивные параметры гусеничного движителя.

**Ключевые слова:** гусеничный движитель; резинокордные траки; давление движителя на почву; давление на опорное основание; координаты опорных катков; звенья гусеницы; обводное колесо; жесткость основания

**Для цитирования:** Лапик В.П., Адылин И.П., Кузнецов А.Е., Лапик П.В., Дьяченко А.В., Кубаткина О.В. Исследование давления на почву треугольного неподрессоренного гусеничного движителя с опорным обводным колесом и внешней амортизацией // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 2. С. 36-46. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-36-46>

## ORIGINAL ARTICLE

## Study on the soil pressure of a triangular unsprung crawler propulsion system with a supporting bypass wheel and external shock absorption

V.P. Lapik<sup>1</sup>✉, I.P. Adylin<sup>2</sup>, A.E. Kuznetsov<sup>3</sup>, P.V. Lapik<sup>4</sup>, A.V. Dyachenko<sup>5</sup>, O.V. Kubatkina<sup>6</sup>

<sup>1,2,5,6</sup> Bryansk State Agrarian University; Bryansk, Russia

<sup>3</sup> Ministry of Industry of the Republic of Belarus; Minsk, Republic of Belarus

<sup>4</sup> Transneft Druzhba AO; Bryansk, Russia

<sup>1</sup> V.P.Lapick@mail.ru✉

<sup>2</sup> ivanpetrovich@adylin.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4735-1935>

<sup>3</sup> kuznetsov@bryanskselmash.ru

<sup>4</sup> pasha\_lapik@mail.ru

<sup>5</sup> avdyachenkoo@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5631-3979>

<sup>6</sup> olgadyachenk@yandex.ru

**Abstract.** To preserve the soil cover during forage harvesting on waterlogged soils, it is advisable to use a crawler with elastic rubber-cord tracks. The research aimed to develop a physical-mathematical model assessing the ability of elastic flexible support devices to reduce loads acting on the support branch of a triangular unsprung crawler propulsion system with a support idler wheel during its interaction with waterlogged soils. The optimal parameters of the external cushioning of the track chain of a triangular unsprung crawler propulsion system with a support idler wheel were determined analytically. In contrast to a non-cushioned propulsion system, the highest pressure on the supporting surface is observed when the axis of the road wheel or idler wheel is positioned above the midpoint of the next traversed track link, while the lowest pressure occurs when it passes over the hinge joint. It was established that the ground pressure of the propulsion system can be described as the interaction of two processes: a harmonic function in a coordinate system fixed relative to the soil, and a sequence of impulses in a moving coordinate system associated with the propulsion system. The developed physical-mathematical model of loads acting on the support branch of a triangular unsprung crawler propulsion system with a support idler wheel makes it possible to determine the characteristics of the ground pressure exerted by the propulsion system. Pressure distribution diagrams beneath the support section of the undercarriage for various time points showed the absence of significant pressure peaks that form the track depth on waterlogged soils, which demonstrates the damping capabilities of the applied rubber-cord tracks. The developed model is applicable to the determination of optimal design parameters of the tracked propulsion system.

**Keywords:** crawler propulsion system; rubber-cord tracks; track-soil interface pressure; supporting surface pressure; coordinates of support rollers; track links; idler wheel; vertical forces; elastic base stiffness

**For citation:** Lapik V.P., Adylin I.P., Kuznetsov A.E., Lapik P.V., Dyachenko A.V., Kubatkina O.V. Study on the soil pressure of a triangular unsprung crawler propulsion system with a supporting bypass wheel and external shock absorption. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(2):36-46 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-36-46>

### Введение

Заготовка кормов для сельскохозяйственных животных производится в основном на пахотных полях, где произрастают сеяные растительные культуры. Естественные кормовые угодья пойменных лугов ценятся высоким питательным качеством и биологической ценностью за счет отлагающихся аллювиальных наносов (наилков) после продолжительного затопливания их тальми весенними водами. Для их уборки применяются кормоуборочные машины, использующие в своих конструкциях колесные движители и гусеничные движители с резиноармированными лентами. Движители с резиноармированными лентами

обладают повышенным буксованием, а на переувлажненных естественных травостоях высокие грунтозацепы уничтожают травостой и корневую систему.

В научно-исследовательских работах и нормативно-технических документах приняты различные системы показателей воздействия гусеничного движителя на почву. Одними из основных требований, предъявляемых к гусеничным машинам, используемым на заготовке кормов на переувлажненных естественных лугах, являются повышенная проходимость, сохранение растительного покрова и корневой системы растений, а также минимальное воздействие на почву [1, 2].

В качестве оценочных показателей уплотняющего воздействия снижения негативного воздействия ходовых систем на почвенный слой используют среднее давление движителей, максимальное давление движителей, максимальное напряжение в деформируемом слое на глубине, уплотняющий показатель воздействия<sup>1</sup> [3], а также влажность, твердость, остаточную вертикальную деформацию почвы и другие характерные свойства опорного основания [4, 5, 6].

Для уборки кормов на переувлажненных почвах мы предлагаем использовать гусеничный движитель с упругими резинокордными траками. Однако для определения эффективности применения треугольного гусеничного движителя с упругими резинокордными траками требуется разработать аналитическую модель, позволяющую обосновать его оптимальные конструктивные параметры.

**Цель исследований:** разработать физико-математическую модель, оценивающую способность упругих эластичных опорных устройств снижать нагрузки, действующие на опорную ветвь треугольного неподрессоренного гусеничного движителя с опорным обводным колесом, при взаимодействии его с переувлажненными почвами.

### Материалы и методы

Проведен анализ научно-исследовательских работ и существующих конструкций машин для заготовки кормов в различных условиях эксплуатации.

Для снижения негативного воздействия на опорное основание и повышения проходимости по переувлажненным почвам разработана оригинальная конструкция треугольного гусеничного движителя для универсального энергетического средства «Десна – Полесье FH40» (рис. 1) [7].

### Результаты и их обсуждение

Для теоретического исследования давления на почву и определения эффективности применения треугольного гусеничного движителя с упругими резинокордными траками в конструкции универсального энергетического средства «Десна – Полесье FH40» необходимо установить его конструктивные элементы.

Конструктивной особенностью рассматриваемого типа гусеничного движителя является неподрессоренная конструкция, имеющая жесткий скелет. Рассмотрим случай, когда положение движителя параллельно опорной поверхности и горизонтально. Ввиду жесткости конструкции нижние точки обводного колеса и опорных катков расположены на одной горизонтали (рис. 2). При этом, благодаря наличию амортизирующих резинокордных траков и податливости почвы, звенья гусеницы могут поворачиваться относительно точек их контакта с опорными катками и обводным колесом. На рисунке 2 центр обводного колеса обозначен через  $O_0$ , центры опорных катков – как  $O_1, O_2, \dots, O_n$ . Введем две системы координат: неподвижную относительно движителя, связанную

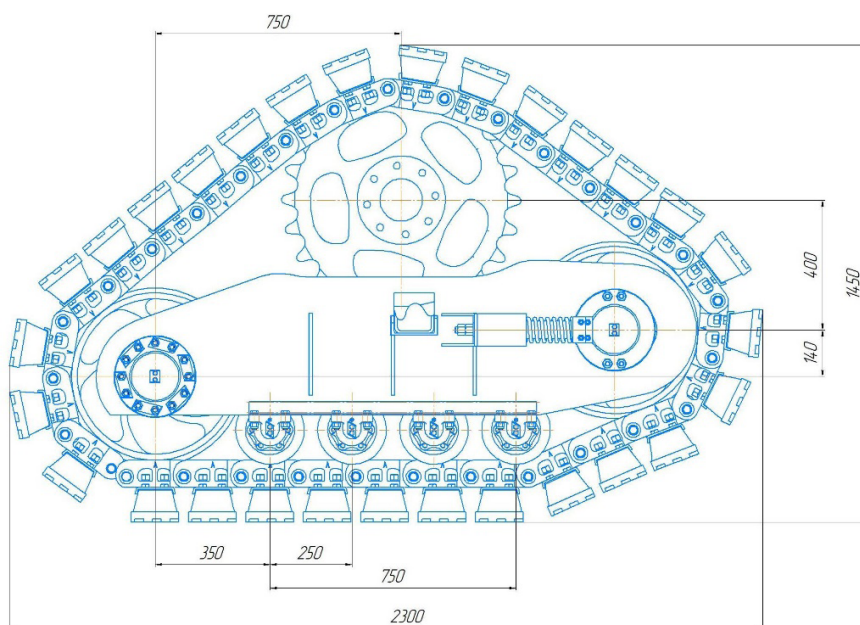
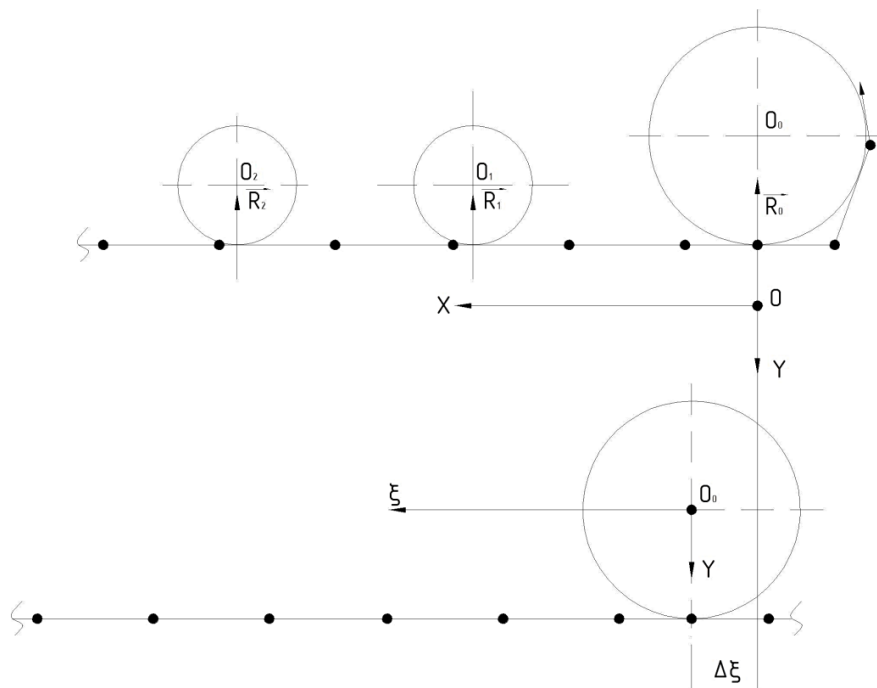


Рис. 1. Конструкция треугольного гусеничного движителя

Fig. 1. Design of the triangular crawler propulsion system

<sup>1</sup> Ксенович И.П., Скотников В.А., Ляско М.И. Ходовая система – почва – урожай. Агропромиздат, 1985. 304 с



**Рис. 2. Системы координат для описания взаимодействия гусеничного движителя с почвой**  
**Fig. 2. Coordinate systems for describing the interaction of the crawler propulsion system with the soil**

с центром обводного колеса  $O_0(x, y)$  (ось  $x$  направлена в сторону движения машины), и неподвижную относительно поверхности качения катков по рельсовой части гусеницы (и относительно почвы, если пренебречь буксованием), связанную с серединой звена, на котором стоит обводное колесо в начальный момент времени  $(\xi, \gamma)$ .

Текущая координата точки  $O_0$  в системе координат  $(\xi, \gamma)$  –

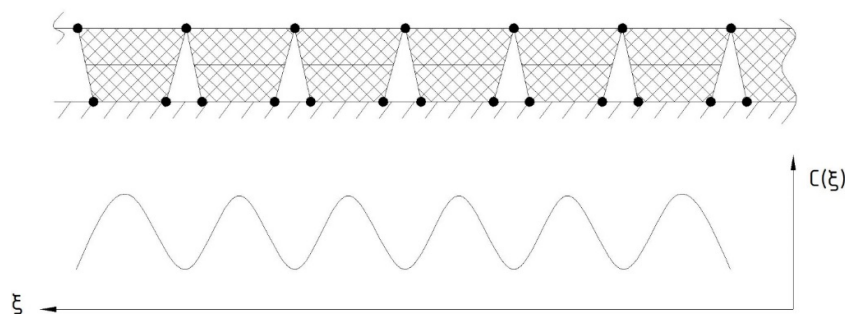
$$\xi = vt,$$

где  $v$  – скорость поступательного движения трактора (если пренебречь буксованием).

Координаты опорных катков в системе координат  $(x, y)$  обозначим в соответствии с их порядковыми номерами, отсчитываемыми от обводного колеса:  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ . Их текущие координаты в системе координат  $(\xi, \gamma)$   $\xi_i = x_i + v \cdot t$ . Очевидно, вдоль

координаты  $\xi$  все процессы повторяются с периодом, равным длине звена гусеницы  $l_{зв}$ .

На катки со стороны поверхности качения действуют реакции  $R_0, R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_n$ . Эта система сил является статически неопределимой. Для раскрытия неопределенности рассмотрим податливость амортизирующих башмаков и почвы как некоторого упругого основания. На этом основании нижние точки катков могут синхронно перемещаться на одинаковую величину по вертикали, а звенья гусеницы могут поворачиваться относительно точек их контакта с опорными катками и обводным колесом на различные углы. Поэтому реакции  $R_i$  различны и изменяются во времени периодически с периодом  $l_{зв} / v$ , однако не синхронно. Наибольшая жесткость основания имеет место при нахождении оси катка или обводного колеса над серединой очередного преодолеваемого звена гусеницы, а наименьшая – при прохождении им



**Рис. 3. К определению жесткости условного упругого основания**  
**Fig. 3. Determining the stiffness of a conditional elastic base**

шарнира. Таким образом, жесткость основания  $C(\xi)$  имеет вид периодической функции (рис. 3).

В дальнейшем через  $C(\xi)$  будем обозначать относительную величину жесткости, принимая ее максимальное значение равным ( $C(O) = C_{max} = 1$ ). Абсолютная величина жесткости равна  $kC$ , где  $k$  – коэффициент жесткости. Однако, как показано дальше, для анализа распределения давления движителя на почву достаточно знать относительную величину жесткости  $C(\xi)$ .

В дальнейшем предполагаем, что угловые перемещения звеньев гусеницы невелики и точки контакта катков со звеньями находятся вблизи проекции их оси на горизонталь. Если все нижние точки катков и обводного колеса переместились по вертикали на величину  $\Delta y$  под действием вертикальной нагрузки на движитель  $G$ , то реакции, действующие на катки, можно определить как

$$R_i(\xi_i) = kC(\xi_i)\Delta y, \tag{1}$$

где  $\xi_i = x_i + vt$ .

С учетом вертикальной составляющей реакции сминаемого слоя при образовании гусеничным движителем колеи  $R_{\Pi}$  уравнение баланса вертикальных сил имеет вид:

$$\sum R_i(\xi_i) = G - R_{\Pi}. \tag{2}$$

Если пока пренебречь силой  $R_{\Pi}$ , из (2) получаем:

$$\sum kC(\xi_i)\Delta y = G.$$

Поскольку  $k\Delta y$  – константа, получаем ее значение в виде:

$$k\Delta y = \frac{G}{\sum C(\xi_i)}.$$

Тогда

$$R_i(\xi_i) = \frac{C(\xi_i)G}{\sum C(\xi_i)}. \tag{3}$$

Наличие здесь силы  $R_{\Pi}$  отражает факт, что сминаемый участок почвы фактически увеличивает длину опорной поверхности гусеницы. При приближенном определении этой силы считаем, что формирование колеи заканчивается под первым набегающим катком. За счет высоты амортизирующего башмака колея формируется не на свободном участке гусеницы криволинейной поверхности натяжного колеса (рис. 4), а под передней поверхностью набегающего опорного катка (обычно глубина колеи не превышает суммы радиуса катка  $r_k$  и высоты башмака  $h_3$ ).

Рассмотрим плоскую задачу вдавливания цилиндра радиусом  $r = r_k + h_3$  в почву, используя теорию контактных напряжений Герца. Согласно этой теории распределение давления по дуге контакта гусеницы

с почвой (поверхность гусеницы приближенно считаем непрерывной) имеет вид:

$$p = p_{max} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2}, \tag{4}$$

где  $a$  – длина горизонтальной хорды дуги контакта;

$$a = \sqrt{r^2 - (r - h)^2} \approx \sqrt{2rh},$$

где  $h$  – глубина колеи.

При этом

$$R_{\Pi} = \pi a p_{max} \approx \pi p_{max} \sqrt{2rh}. \tag{5}$$

Здесь  $p_{max}$  – давление под осью набегающего катка (определяется далее, как и для других катков), а глубина колеи определяется по формуле:

$$h = q \frac{m}{\gamma} \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \exp(-\pi tg \varphi) - \frac{km}{\gamma} ctg \varphi \left[ 1 - \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \exp(-\pi tg \varphi) \right] C, \tag{6}$$

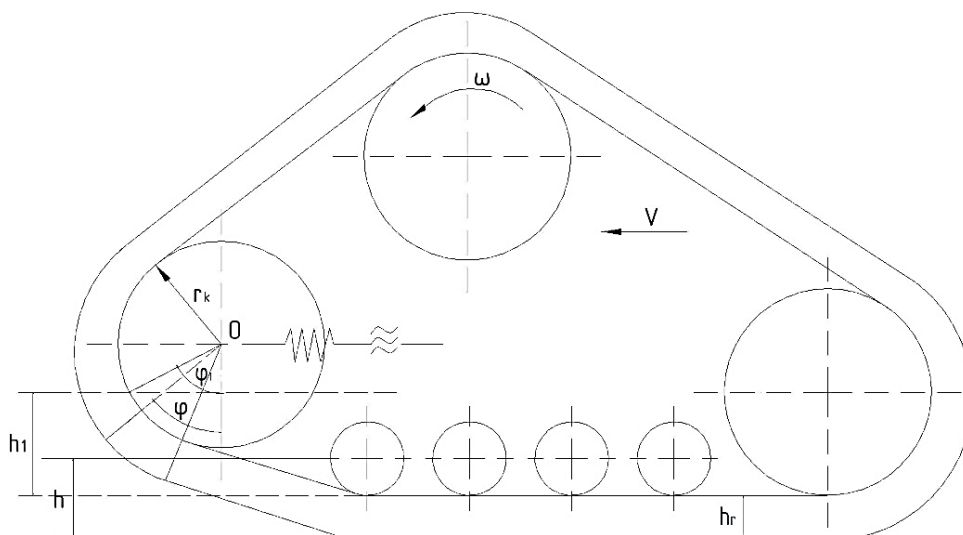
где  $k$  – коэффициент, учитывающий наличие дернового покрова почвы ( $k \approx 0,1$ );  $m$  – коэффициент, учитывающий влияние органической компоненты в корнеобитаемом слое почвы ( $k \approx 0,5$ );  $\varphi$  – угол внутреннего трения в почве;  $q$  рекомендуется принимать равным среднему давлению на опорной части гусеницы. Оно будет пропорционально величине  $G / BL_{он}$ , где  $B$  – ширина гусеницы;  $L_{он}$  – длина опорной части гусеницы.

Значения коэффициента, учитывающего наличие дернового покрова почвы и коэффициента, учитывающего влияние органической компоненты в корнеобитаемом слое почвы, установлены на основании аналитических и экспериментальных исследований пойменных почв [4, 8].

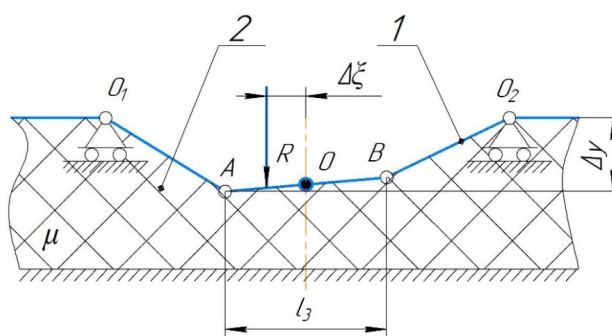
Таким образом, для учета этой силы достаточно умножить давление под набегающим катком на уменьшающий коэффициент.

Для определения относительной жесткости  $C(\xi)$  примем в первом приближении упрощенную схему взаимодействия опорных катков и гусеничной ленты (рис. 5).

Усилие со стороны единичного опорного катка  $R$ , приложенное к звену цепи  $AB$  на расстоянии  $\Delta \xi$  от середины звена – точки  $O$ , компенсируется реакцией упругого основания с погонной жесткостью  $\mu$  на прогиб звена  $AB$  и двух соседних звеньев ( $O_1A$  и  $O_2B$ ). При этом подразумевается упругое основание Винклера, то есть основание, состоящее из непрерывного множества отдельных независимых «пружинок», сжимающихся только в вертикальном направлении (касательные и горизонтальные напряжения в таком основании отсутствуют). Это основание



**Рис. 4. К определению реакции сминаемого слоя почвы при образовании колес**  
**Fig. 4. Determining the reaction of the crumpled soil layer in track formation**



**Рис. 5. Расчетная схема взаимодействия опорного катка с гусеничной лентой:**  
 1 – звено гусеничной цепи; 2 – упругое основание  
**Fig. 5. Analytic model of the interaction of the support roller with the track belt**  
 1 – track chain link; 2 – elastic foundation

имитирует как внешнюю амортизацию гусеничной цепи, так и податливость почвы под опорным участком гусеницы. Влиянием натяжения гусеницы на ее горизонтальном опорном участке пренебрегаем – оно будет учтено в дальнейшем на наклонных участках, огибающих крайние опорные катки. Поэтому считаем, что в точках  $O_1$  и  $O_2$  звенья закреплены шарнирно с возможностью свободного перемещения по горизонтали. Влияние других опорных катков в дальнейшем учитывается путем суммирования по принципу суперпозиции. Влияние прогиба более удаленных звеньев гусеничной цепи не изменяет качественной зависимости  $R(\Delta\xi)$ , незначительно изменяя ее численные параметры. Пренебрежение этим влиянием идет в запас надежности расчета неравномерности распределения давления на почву под гусеничной лентой. Прогиб гусеничной ленты в точке контакта с опорным катком обозначим как  $\Delta y$ . При составлении уравнений равновесия рассматриваемой системы трех звеньев гусеничной цепи заменим звено  $O_1A$  силой  $R_A$ , действующей со стороны этого звена,

на звено  $AB$  в шарнире  $A$ , а звено  $O_2B$  – силой  $R_B$ , действующей со стороны этого звена, на звено  $AB$  в шарнире  $B$ . Прогибы шарниров  $A$  и  $B$  обозначим через  $\Delta y_A$  и  $\Delta y_B$  соответственно.

Из условия равенства нулю суммы моментов, действующих на звено  $O_1A$  относительно точки  $O_1$ , получаем:

$$R_A l_{3B} = \Delta y_A \mu \frac{1}{2} l_{3B} \frac{2}{3} l_{3B},$$

откуда

$$R_A = \Delta y_A \mu \frac{1}{3} l_{3B}.$$

Аналогично  $R_B = \Delta y_B \mu \frac{1}{3} l_{3B}.$

Из условия равенства нулю суммы вертикальных сил, действующих на звено  $AB$ , с учетом предыдущих равенств получаем:

$$R = R_A + R_B + \frac{1}{2} (\Delta y_A + \Delta y_B) \mu l_{3B} = \frac{5}{6} (\Delta y_A + \Delta y_B) \mu l_{3B}.$$

Из условия равенства нулю суммы моментов сил относительно точки  $O$  –

$$R\Delta x = (R_A - R_B) \frac{1}{2} l_{зв} + \frac{1}{2} l_{зв} (\Delta y_A - \Delta y_B) \mu l_{зв} / 6 = \\ = \frac{1}{4} \mu (l_{зв})^2 (\Delta y_A - \Delta y_B).$$

Кроме того, имеем геометрическую пропорцию:

$$\frac{(\Delta y_A - \Delta y_B)}{(\Delta y - \Delta y_B)} = \frac{\frac{l_{зв}}{2} - \Delta \xi}{\frac{l_{зв}}{2} + \Delta \xi}.$$

Исключив из системы трех последних уравнений величины  $(\Delta y_A + \Delta y_B)$  и  $((\Delta y_A - \Delta y_B))$ , получаем:

$$R = \frac{5}{3} \mu \Delta y l_{зв} \frac{1}{1 + \frac{5w^2}{3}} = R_{max} \frac{1}{1 + \frac{5w^2}{3}}, R(w),$$

где обозначено:

$$R_{max} = \frac{5}{3} \mu \Delta y l_{зв};$$

$$w = \frac{\Delta \xi}{(l_{зв}/2)}.$$

Очевидно,  $R = R_{max}$  при  $w = 0$ . При движении опорного катка по одному звену гусеницы величина  $w$  изменяется от  $-1$  до  $+1$ . На следующем звене все повторяется.

Таким образом, относительная локальная жесткость основания  $C(w)$ , воспринимаемая катком, является периодической функцией, составленной из повторяющихся отрезков функции  $R(w) / R_{max}$ , взятой на интервале  $w = -1 \dots +1$ . Наибольшее значение относительной жесткости  $C$  равно  $R(0) / R_{max} = 1$ , наименьшее значение относительной жесткости  $C$  –

$$R(1) / R_{max} = \frac{1}{(1 + 5/3)} = 0,375.$$

Среднее значение определится интегралом:

$$C_{cp} = \int_0^1 \frac{dw}{1 + \frac{5w^2}{3}} = \sqrt{\frac{3}{5}} \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{5}{3}} \right) \approx 0,706.$$

С учетом построенных графиков теоретической зависимости относительной жесткости основания от продольной координаты, аппроксимирующей ее функции, линейной аппроксимации эпюры давлений гусеничной цепи на упругое основание и дальнейших преобразований получаем значение давления, приходящееся на точку приложения силы:

$$p_i(x) = f(x) = \frac{6R_i}{l_i \sqrt{2\pi}} \exp \left( -\frac{36(x - x_i)^2}{2l_i^2} \right).$$

Подставив в приведенные выше формулы выражения

$$R_i(x_i + vt) = C(x_i + vt) G / \sum C(x_i + vt);$$

$$C(x_i + vt) \approx 0,706 + 0,294 \cos \frac{2\pi}{l_{зв}} (x_i + vt), \quad (7)$$

получим зависимость давления на почву от переменных  $x$  и  $t$ . Числитель выражения (7) дает колебания соответствующей силы на основной частоте, а знаменатель – достаточно хаотичную составляющую с небольшой амплитудой колебаний. Если эту сумму усреднить, она будет равна  $0,706n$ , где  $n$  – число опорных катков.

Тогда

$$R_i(x_i + vt) \approx \frac{G}{n} \left( 1 + 0,416 \cos \frac{2\pi}{l_{зв}} (x_i + vt) \right),$$

соответствующий максимум давления в вершине функции  $p_i(0)$  при  $\cos \frac{2\pi}{l_{зв}} (x_i + vt) = 1$  равен  $1,2 \frac{2G}{l_i n} 1,416$ .

Для определения абсолютного максимума остается выбрать каток с минимальным значением  $l_i$ .

Полученные выше зависимости позволяют построить эпюры изменения давления, записываемые датчиками, установленными с интервалом  $1/4 l_{зв}$ , и найти среднее из максимумов (как это предусмотрено ГОСТ). Для этого нужно построить зависимости  $\sum p_i(x)$ , принимая 4 разные значения  $vt$  с интервалом  $1/4 l_{зв}$ , найти их максимумы и среднее из максимумов. Можно показать, что эта величина будет равна определенному выше абсолютному максимуму, деленному на 1,416, то есть получается сильно заниженной. Заметим, что данные рассуждения касаются только движителя рассматриваемой конструкции.

Выше не рассматривалось влияние смещения центра давления движителя на почву. Поскольку распределение давлений вдоль движителя все время изменяется, непрерывно перемещается и центр давления. Также не предполагалось, что центр давления незначительно смещается относительно линии действия силы  $G$ . Для определения действительного положения центра давления необходимо рассматривать моменты сил реакции  $R_i$ . Поскольку в нашем случае максимум давления явно находится в средней по длине части опорной поверхности гусеницы, маловероятно изменение этой величины при перекосе эпюры давлений при смещении центра давления. Это возможно лишь при очень большом смещении.

Определим абсолютный максимум давления под движителем на конкретном примере. При этом будем иметь в виду, что текущая координата  $x$  присутствует

в явном виде только в формулах для давления. Величины  $x_i$  – это константы – параметры конкретного движителя. Величина  $\xi_i = (x_i + vt)$  – функция текущего момента времени, в который рассматривается система сил  $R_i$ . В дальнейшем обозначаем через  $t_j$  момент времени, когда центр  $j$ -того катка находится над серединой очередного звена и, следовательно, создает наибольшее за свое время движения давление. При этом  $\cos \frac{2\pi}{l_{3B}}(x_i + vt_j) = 1$ ,

$$\frac{1}{l_{3B}}(x_j + vt_j) = N, \tag{8}$$

где  $N$  – любое целое число.

$$R_j = R_{j\max} = \frac{1}{\sum_{i=0}^n \left[ 0,706 + 0,294 \cos \frac{2\pi}{l_{3B}}(x_i + vt_j) \right]} G. \tag{9}$$

Реакции других катков в этот момент времени –

$$R_i(t_j) = \frac{G}{\sum_{i=0}^n \left[ 0,706 + 0,294 \cos \frac{2\pi}{l_{3B}}(x_i + vt_j) \right]} \times \left[ 0,706 + 0,294 \cos \frac{2\pi}{l_{3B}}(x_i + vt) \right] \tag{10}$$

При суммировании в знаменателе (9) крайние члены (при  $i = 0$  и  $i = n$ , где  $n$  – индекс набегающего катка) нужно прибавлять с коэффициентами 0,5. Однако для корректности увеличим эти коэффициенты, учитывая некоторое участие наклонных участков гусеницы в опирании на почву. В ГОСТ 26954-2019 для этого рекомендуется условно добавлять к опорной длине гусеницы длину одного ее звена. Поэтому добавим по половине длины звена к  $l_0 / 2$  и к  $l_n / 2$ . Таким образом, получим, соответственно, коэффициенты  $0,5(1 + l_{3B} / l_0)$  и  $0,5(1 + l_{3B} / l_n)$ .

Приведем расчет для предлагаемого движителя, показанного на рисунке 1, с длиной звена гусеницы 175 мм. Некоторые расчетные параметры приведены в таблице 1. Расчет жесткостей  $C_{ij} = 0,706 + 0,294 \cos \frac{2\pi}{l_{3B}}(x_i + vt_j)$  и их сумм приведен в таблице 2. Для удобства расчетов  $N$  принято равным 7 (при этом все  $t_j$  для заданных параметров движителя получаются положительными). При суммировании коэффициенты  $0,5(1 + l_{3B} / l_0) = 0,75$  и  $0,5(1 + l_{3B} / l_n) = 0,85$ .

По формулам (9) и (10) и по формуле  $p_{i\max} = 1,2 \frac{R_i}{l_i}$  рассчитаны максимумы давления (в единицах  $G / B$ ,

Таблица 1

Некоторые расчетные параметры движителя

Table 1

Some calculated parameters of the propulsion system

Параметры движителя	Опорное колесо, 0	Опорное колесо № 1	Опорное колесо № 2	Опорное колесо № 3	Опорное колесо № 4
$x_i$ , м	0	0,35	0,60	0,85	1,10
$l_i$ , м	0,70	0,60	0,50	0,50	0,50
$l_i / 2$ , м	0,35	0,30	0,25	0,25	0,25

Таблица 2

Расчет жесткости  $C_{ij} = 0,706 + 0,294 \cos \frac{2\pi}{l_{3B}}(x_i + vt_j)$

Table 2

Calculation of stiffness  $C_{ij} = 0,706 + 0,294 \cos \frac{2\pi}{l_{3B}}(x_i + vt_j)$

Номер катка над серединой звена $j$	Реакция под катком, $i = 0$	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	Суммарная жесткость, $\Sigma C_{ij}$
0	1	1	0,445	0,880	0,653	3,630
1	1	1	0,445	0,880	0,653	3,630
2	0,440	0,439	1	0,445	0,880	2,962
3	0,892	0,892	0,439	1	0,445	3,378
4	0,640	0,891	0,892	0,439	1	3,553

где  $B$  – ширина гусеницы) (табл. 3), а с использованием формулы

$$\sum p_i(x) = \sum \frac{6R_i}{l_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{36(x-x_i)^2}{2l_i^2}\right) \quad (11)$$

построены графики распределения давления под опорной частью гусеницы в моменты времени  $t_j$  (рис. 6). При определении положения центра

давления гусеничного движителя на почву относительно начала координат  $x = 0$  учтем, что

$$x_D = \frac{\sum M_0}{G},$$

то есть равно сумме моментов сил реакции под катками относительно центра обводного колеса  $O$ , деленной на сумму этих сил.

Таблица 3

Максимумы давления под центрами катков,  $p_p$ , 1/м

Table 3

Maximum pressure values under the roller centers,  $p_p$ , 1/m

Номер катка над серединой звена $j$	Давление под катком $i = 0$	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$
0	1,10	1,27	0,678	1,34	0,995
1	1,10	1,27	0,678	1,34	0,995
2	0,59	0,69	1,88	0,84	1,66
3	1,02	1,15	0,70	1,60	0,71
4	0,72	1,17	1,41	0,69	1,57

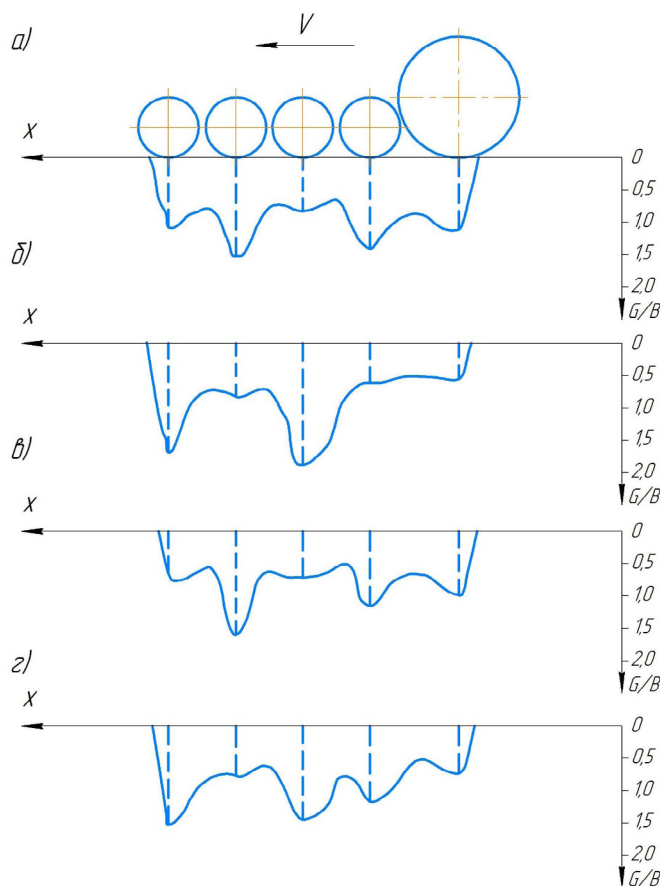


Рис. 6. Эпюры давления под опорной частью движителя для различных моментов времени  $t_j$ :

а)  $t_j = 0$  или 1; б)  $t_j = 2$ ; в)  $t_j = 3$ ; г)  $t_j = 4$

Fig. 6. Pressure plots under the supporting surface of the propulsion system for various time points  $t_j$ :

а)  $t_j = 0$  or 1; б)  $t_j = 2$ ; в)  $t_j = 3$ ; г)  $t_j = 4$

Если в (10) вместо  $t_j$  оставить текущее время  $t$ , то подставляя результаты в (11), можно создать анимацию изменения эпюры давления  $p(x)$  во времени.

Произведя математические исчисления с расстояниями центров катков от начала координат и значений таблицы 2, получаем данные таблицы 3, в которой определено расстояние до центра давления.

Из данных таблицы 3 следует, что абсолютный максимум давления составляет  $1,88G/B$  под катком № 2 в момент его прохождения над серединой очередного звена гусеницы и при длине опорной части 1,1 м, середина ее находится на расстоянии 0,55 м, а максимальные отклонения центра давления от нее составляют  $\pm 0,084$  м., то есть не превосходят 15%. Данные значения получены по аналитическим зависимостям разработанной физико-математической модели нагрузок, действующих на опорную ветвь треугольного неподрессоренного гусеничного движителя с опорным обводным колесом, с учетом которых построены эпюры давления и определены характеристики давления движителя на почву (рис. 6).

#### Список источников

1. Бурмистрова О.Н., Чемшикова Ю.М., Григорьев И.В. и др. Теоретическое обоснование параметров средошадающего движителя гусеничного вездехода // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 3 (43). С. 81-88. EDN: YAJJOYD
2. Okhitin A.A., Lipiec J., Tarkiewicz S., Sudakov A.V, Deformation of silty loam soil under the tractor tyre. *Soil & Tillage Research*. 1991;19(2-3):187-195. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(91\)90086-D](https://doi.org/10.1016/0167-1987(91)90086-D)
3. Poddubnyi V.I., Trächtler A., Warkentin A. Soil stresses due to a propulsion unit with a rubber caterpillar track. *Russian Engineering Research*. 2022;42:965968. <https://doi.org/10.3103/S1068798X22100252> EDN: SFZELY
4. Лапик В.П., Адылин И.П., Лапик П.В., Кубаткина О.В. Анализ и определение оценочных показателей воздействия гусеничных движителей на растительный покров и почвы // Вестник Брянской ГСХА. 2025. № 6 (112). С. 48-53. EDN: PNLVLYK
5. Емельянов А.М., Канделя М.В., Шпилев Е.М., Решетник Е.И. Треугольный гусеничный движитель с резиноармированными лентами в схеме зерноуборочного комбайна // Научное обозрение. 2014. № 9-2. С. 356-361. EDN: SZNXOL
6. Поддубный В.И., Трехтлер А., Варкентин А., Хенке К. Механико-математическая модель гусеничного движителя с треугольным обводом для решения задач вертикальной динамики гусеничной машины // Вестник машиностроения. 2020. № 12. С. 26-29. EDN: YJCTCS
7. Адылин И.П., Лапик В.П., Лапик П.В. Гусеничный движитель треугольной форм // Сельский механизатор. 2023. № 1-2. С. 16-17. EDN: ROXLIP
8. Стрельцов В.В., Лапик В.П., Адылин И.П. Характер деформирования переувлажненной пойменной почвы гусеничным движителем с резиноармированными гусеницами // Научное обозрение. 2014. № 8-1. С. 30-33. EDN: ТВВМIX

Представленные на рисунке 6 эпюры показывают отсутствие значительных пиков давления, которые и формируют глубину колеи на переувлажненных почвах. Распределение давления по длине гусеничного движителя показывает демпфирующие способности применяемых резинокордных траков, что соответствует результатам работы [4] и конструкции движителя в целом [7].

#### Выводы

Формирование давления движителя на почву можно описать как взаимодействие двух процессов с гармонической функцией в неподвижной относительно почвы системе координат и с последовательностью импульсов в подвижной, связанной с движителем. Анализ эпюр давления показывает минимизацию пиков давления под опорными колесами движителя, наибольшее давление на опорное основание имеет место при нахождении оси катка или обводного колеса над серединой звена гусеницы, а наименьшее – при прохождении им шарнира. Разработанная физико-математическая модель позволит установить оптимальные конструктивные параметры гусеничного движителя.

#### References

1. Burmistrova O.N., Chemshikova Yu.M., Grigoriev I.V., Kunitskay O.A., Tamby A.A. Theoretical justification of the parameters of environmentally acceptable motor of a tracked all-terrain vehicle. *Systems. Methods. Technologies*. 2019;3(43):81-88. (In Russ.)
2. Okhitin A.A., Lipiec J., Tarkiewicz S., Sudakov A.V, Deformation of silty loam soil under the tractor tyre. *Soil & Tillage Research*. 1991;19(2-3):187-195. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(91\)90086-D](https://doi.org/10.1016/0167-1987(91)90086-D)
3. Poddubnyi V.I., Trächtler A., Warkentin A. Soil stresses due to a propulsion unit with a rubber caterpillar track. *Russian Engineering Research*. 2022;42:965968. <https://doi.org/10.3103/S1068798X22100252>
4. Lapik V.P., Adylin I.P., Lapik P.V., Kubatkina O.V. Analysis and determination of evaluation indicators of the impact of tracked running gear systems on vegetation cover and soil. *Vestnik Bryanskoy GSKhA*. 2025;6:48-53. (In Russ.)
5. Emelyanov A.M., Kandelya M.V., Shpilev E.M., Reshetnik E.I. Triangular caterpillar mover with rubber-reinforced bands in the scheme of a grain harvesting combine. *Nauchnoe obozrenie*. 2014;9-2:356-361. (In Russ.)
6. Poddubnyi V.I., Trechtler A., Warkentin A., Khenke K. Mechanical and mathematical model of a caterpillar drive with a triangular contour for solving problems of vertical dynamics of a tracked vehicle. *Vestnik mashinostroeniya*. 2020;12:26-29. (In Russ.)
7. Adylin I.P., Lapik V.P., Lapik P.V. Caterpillar propulsion triangular shape. *Selskiy mekhanizator*. 2023;1-2:16-17. (In Russ.)
8. Streltsov V.V., Lapik V.P., Adylin I.P. Nature of over-moisturized floodplain soil deformation with a caterpillar mover with rubber reinforced caterpillars. *Nauchnoe obozrenie*. 2014;8-1:30-33. (In Russ.)

**Информация об авторах**

- <sup>1</sup> **Лапик Владимир Павлович**, д-р техн. наук, профессор кафедры технических систем в агробизнесе и дорожном строительстве; V.P. Lapick@mail.ru<sup>✉</sup>; SPIN-код: 7424-8509
- <sup>2</sup> **Адылин Иван Петрович**, канд. техн. наук, доцент кафедры технических систем в агробизнесе и дорожном строительстве; ivanpetrovich@adylin.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4735-1935>; SPIN-код: 1996-5243
- <sup>3</sup> **Кузнецов Андрей Евгеньевич**, Министр промышленности Республики Беларусь kuznetsov@bryanskselemash.ru
- <sup>4</sup> **Лапик Павел Владимирович**, инженер; pasha\_lapik@mail.ru
- <sup>5</sup> **Дьяченко Антон Вячеславович**, канд. техн. наук, доцент кафедры технических систем в агробизнесе и дорожном строительстве; avdyachenkoo@mail.ru; SPIN-код: 9509-0997
- <sup>6</sup> **Кубаткина Ольга Вячеславовна**, старший преподаватель кафедры автоматизации, физики и математики; olgadyachenk@yandex.ru; SPIN-код: 7379-5775
- <sup>1,2,5,6</sup> Брянский государственный аграрный университет; 243365, Российская Федерация, Брянская обл., Выгоничский р-н, с. Кокино, ул. Советская, 2а
- <sup>3</sup> Министерство промышленности Республики Беларусь; 220033, Республика Беларусь, г. Минск, Партизанский проспект, 2, корп. 4
- <sup>4</sup> АО «Транснефть Дружба»; 241020, Российская Федерация, г. Брянск, ул. Уральская, 113

**Вклад авторов**

Лапик В.П. – концептуализация, администрирование проекта; Адылин И.П. – создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование; Кузнецов А.Е. – методология, создание черновика рукописи; Лапик П.В. – визуализация; Дьяченко А.В. – визуализация; Кубаткина О.В. – визуализация.

Статья поступила 09.10.2025, после рецензирования и доработки 20.03.2026, принята к публикации 26.03.2026

**Author Information**

- Vladimir P. Lapik**<sup>1</sup>, DSc (Eng), Professor, the Department of Technical Systems in Agribusiness and Road Construction, <https://orcid.org/0000-0003-4735-1935>; V.P. Lapick@mail.ru<sup>✉</sup>
- Ivan P. Adylin**<sup>2</sup>, CSc (Eng), Associate Professor, the Department of Technical Systems in Agribusiness and Road Construction; <https://orcid.org/0000-0003-4735-1935>; ivanpetrovich@adylin.ru
- Andrey E. Kuznetsov**<sup>3</sup>, Minister of Industry of the Republic of Belarus, kuznetsov@bryanskselemash.ru
- Pavel V. Lapik**<sup>4</sup>, Engineer, pasha\_lapik@mail.ru
- Anton V. Dyachenko**<sup>5</sup>, CSc (Eng), Associate Professor, the Department of Technical Systems in Agribusiness and Road Construction; avdyachenkoo@mail.ru
- Olga V. Kubatkina**<sup>6</sup>, Senior Lecturer, the Department of Automation, Physics and Mathematics; olgadyachenk@yandex.ru
- <sup>1,2,5,6</sup> Bryansk State Agrarian University; 243365, Russian Federation, Bryansk Region, Vygonichi district, Kokino, Sovetskaya Str. 2a
- <sup>3</sup> Ministry of Industry of the Republic of Belarus; Republic of Belarus, Minsk, Partizansky Ave., 2, Bld 4
- <sup>4</sup> Transneft Druzhba AO; 241020, Russian Federation, Bryansk, Uralskaya Str., 113

**Author Contribution**

Lapik V.P. – conceptualization, project administration; Adylin I.P. – writing – review and editing of the manuscript; Kuznetsov A.E. – methodology, writing – original draft; Lapik P.V. – visualization; Dyachenko A.V. – visualization; Kubatkina O.V. – visualization.

Received 09.10.2025; Revised 20.03.2026; Accepted 26.03.2026

# ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ORIGINAL ARTICLE

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-47-55>

## Study of the anticorrosion properties of a carboxylate inhibitor in a coolant formulation

D.K. Quang<sup>1</sup>, V.G. Huy<sup>2</sup>, S.M. Gaidar<sup>3</sup>, A.M. Pikina<sup>4</sup>✉, A.E. Mukinov<sup>5</sup>, A.Yu. Alipichev<sup>6</sup>

<sup>1,2</sup> Vietnam-Russia Tropical Joint Science and Technology Research Center; Ho Chi Minh City, Vietnam

<sup>3,4,5,6</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

<sup>1</sup> quanghoang1510@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782>

<sup>2</sup> huy241989@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7441-8050>

<sup>3</sup> techmash@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>

<sup>4</sup> pikina@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0003-0237-0534>

<sup>5</sup> polk51\_51@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-3068-7062>

<sup>6</sup> alipichev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>

**Abstract.** The operation of internal combustion engines (ICE) using water as a liquid heat carrier leads to intense corrosion and deposit formation. Therefore, it is advisable to incorporate a corrosion inhibitor with a high protective effect into the coolant composition. The study aimed to evaluate the efficiency of a coolant containing a carboxylate corrosion inhibitor and the corrosion resistance of metal elements in an ICE cooling system. The authors developed a prototype coolant, VN-RU-30, with the following composition: 48% water, 48% ethylene glycol, and 4% carboxylate corrosion inhibitor. The prototype was compared with commercially available coolants, OZh-40 LENA and CoolStream Standard 40. According to GOST 28084-89, the physicochemical parameters of VN-RU-30, OZh-40 LENA, and CoolStream Standard 40 were determined, and their corrosive effects on samples of M1 copper, POS-40-2 solder, L-63 brass, St3 steel, SCH-20 cast iron, and AK-7 aluminum alloy were compared under static conditions. The protective effect of the VN-RU-30 prototype was found to be comparable to the reference coolants. To evaluate the protective efficiency of the VN-RU-30 coolant, the authors conducted tests on a model simulating an engine cooling system subjected to corrosion for 336 hours. It was established that VN-RU-30 neutralizes corrosion products on metal surfaces and effectively inhibits further corrosion processes (protective effect exceeding 98%). Field corrosion tests lasting 46 months demonstrated the integrity of the metal components in the ICE cooling system when using VN-RU-30, compared to water, which intensified corrosion and deposit formation. The results confirm the high protective efficiency of the VN-RU-30 coolant for ICE cooling systems; it is advisable for use in engine operation, restoration, and long-term preservation.

**Keywords:** coolant; internal combustion engine (ICE); coolant efficiency; inhibitor; carboxylate corrosion inhibitor; corrosive effect

**Acknowledgments.** This study was conducted as part of a research project supported by the Joint Vietnamese-Russian Tropical Research and Technology Centre. The authors express their sincere gratitude to the Centre for its financial support, provision of research infrastructure, and logistical assistance at all stages of the study.

**For citation:** Quang D.K., Huy V.V., Gaidar S.M., Pikina A.M., Mukinov A.E., Alipichev A.Yu. Study of the anticorrosion properties of a carboxylate inhibitor in a coolant formulation. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(2):47-55 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-47-55>

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 620.197

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-47-55>**Изучение антикоррозионных свойств карбоксилатного ингибитора в составе охлаждающей жидкости****Д.К. Хоанг<sup>1</sup>, В.Г. Ву<sup>2</sup>, С.М. Гайдар<sup>3</sup>, А.М. Пикина<sup>4</sup>✉, А.Е. Мукинов<sup>5</sup>, А.Ю. Алипичев<sup>6</sup>**<sup>1,2</sup> Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и технологический центр; г. Хошимин, Вьетнам<sup>3,4,5,6</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия<sup>1</sup> [quanghoang1510@gmail.com](mailto:quanghoang1510@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782><sup>2</sup> [huy241989@gmail.com](mailto:huy241989@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0002-7441-8050><sup>3</sup> [techmash@rgau-msha.ru](mailto:techmash@rgau-msha.ru); <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961><sup>4</sup> [pikina@rgau-msha.ru](mailto:pikina@rgau-msha.ru) ✉; <https://orcid.org/0000-0003-0237-0534><sup>5</sup> [polk51\\_51@mail.ru](mailto:polk51_51@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0009-3068-7062><sup>6</sup> [alipichev@rgau-msha.ru](mailto:alipichev@rgau-msha.ru); <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>

**Аннотация.** Эксплуатация двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с использованием воды в качестве жидкого теплоносителя приводит к интенсивной коррозии и образованию отложений. Целесообразно в составе охлаждающей жидкости применять ингибитор коррозии с высоким защитным эффектом. Исследования проведены с целью оценки эффективности охлаждающей жидкости, содержащей карбоксилатный ингибитор коррозии, и коррозионной стойкости металлических элементов системы охлаждения ДВС. Разработанный опытный образец охлаждающей жидкости VN-RU-30 имеет следующий состав: вода – 48%; этиленгликоль – 48%; карбоксилатный ингибитор коррозии – 4%. Опытный образец сравнивали с предлагаемыми на рынке ОЖ-40 «ЛЕНА» и CoolStreamStandard 40. Согласно ГОСТ 28084-89 определили физико-химические показатели VN-RU-30, ОЖ-40 «ЛЕНА» и CoolStreamStandard 40 и сравнили их коррозионное воздействие на образцы меди М1, припоя ПОС-40-2, латуни Л-63, стали Ст3, чугуна СЧ-20 и алюминиевого сплава АК-7 в статических условиях. Защитный эффект опытного образца VN-RU-30 оказался на уровне исследуемых жидкостей. С целью оценки защитной эффективности охлаждающей жидкости VN-RU-30 проведены испытания на модели, имитирующей систему охлаждения двигателя, подвергнутой коррозионному разрушению, в течение 336 ч. Установлено, что VN-RU-30 нейтрализует продукты коррозии на металлических поверхностях и эффективно подавляет дальнейшее развитие коррозионных процессов (защитный эффект – более 98%). Натурные коррозионные испытания длительностью 46 месяцев показали сохранность металлических элементов системы охлаждения ДВС при использовании VN-RU-30 в сравнении с водой, способствующей интенсификации коррозии и образованию отложений. Полученные результаты подтверждают высокую защитную эффективность охлаждающей жидкости VN-RU-30 системы охлаждения ДВС, и ее можно применять при эксплуатации, восстановлении и длительной консервации двигателя.

**Ключевые слова:** охлаждающая жидкость; ДВС; эффективность охлаждающей жидкости; ингибитор; карбоксилатный ингибитор коррозии; коррозионное воздействие

**Благодарности.** Настоящее исследование выполнено в рамках научно-исследовательского проекта, финансируемого Совместным Вьетнамо-Российским тропическим научно-исследовательским и технологическим центром. Авторы выражают искреннюю благодарность Центру за финансовую поддержку, предоставление исследовательской инфраструктуры и логистическую поддержку на всех этапах проведения исследования.

**Для цитирования:** Quang D.K., Huy V.V., Gaidar S.M., Pikina A.M., Mukinov A.E., Alipichev A.Yu. Study of the anticorrosion properties of a carboxylate inhibitor in a coolant formulation. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(2):47-55. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-47-55>

**Introduction**

The issue of corrosion resistance in internal combustion engine (ICE) cooling systems remains a critical challenge. The use of dissimilar metals and alloys, including aluminum alloys, cast iron, steel, copper, brass, and

solder – within cooling systems provides conditions conducive to galvanic and localized corrosion when exposed to electrolytes and dissolved salts [1]. Furthermore, employing hard water as a coolant in ICE systems without highly effective corrosion inhibitors leads to accelerated

electrochemical corrosion, deposit formation, and reduced heat exchange efficiency [2, 3, 4].

A comprehensive analysis of coolants and corrosion inhibitors [1] reveals that the type and combination of inhibitors are paramount in determining the protective anticorrosive properties of coolants. Inhibitors can be broadly categorized into three types: inorganic, organic, and mixed. Each category possesses distinct advantages and limitations, particularly concerning the protection of aluminum alloys and solder [5, 6, 7].

Conventional silicate and phosphate inhibitors effectively protect cast iron and steel. However, they may form problematic gel-like deposits on hot aluminum surfaces, thereby impairing heat transfer [8, 9]. In contrast, organic carboxylate inhibitors are widely adopted due to their high efficiency in heat exchange systems [10]. Their protective mechanism relies on the selective adsorption of carboxylate ions at areas with a damaged protective oxide film. This process safeguards the metal without forming a continuous insulating layer, thus preventing heat transfer degradation. This mechanism is particularly crucial for aluminum alloys commonly employed in the cylinder heads of modern engines [11].

However, most published works present results from laboratory tests of coolants in new or idealized cooling systems [12]. There is a notable lack of data regarding the coolant's influence on cooling systems that have already undergone corrosive damage or have been subjected to prolonged storage – conditions highly relevant to real-world operation and seasonal equipment use.

Therefore, field tests on the corrosion resistance of metals and alloys used in cooling systems, utilizing a carboxylate corrosion inhibitor-containing coolant, are essential to validate the hypothesis of its protective and stabilizing effect on metal surfaces within the cooling system [13, 14].

**The research objective** is to evaluate the efficacy of a coolant, enhanced with an organic carboxylate inhibitor for superior anticorrosion protection, within ICE cooling systems, employing both GOST methodologies and field trials.

### Materials and methods

The coolants investigated included VN-RU-30 (a prototype formulated with a carboxylate corrosion inhibitor) and two commercially available products: OZh-40 LENA and CoolStream Standard 40. The optimal composition of VN-RU-30 was determined following GOST 28084-89 guidelines.

Physicochemical properties of all coolants were assessed using standard methods recommended by GOST 28084-89. These included generally accepted measurement techniques for density, freezing point,

boiling point, pH, foaming characteristics, and alkalinity. The coolants' performance indicators were evaluated through comprehensive testing, encompassing both laboratory analyses and field studies to determine their operational properties.

Corrosion effects were studied in accordance with GOST 28084-89. The study examined six types of metal specimens: M1 copper (GOST 859-2014), POS-40-2 solder (GOST 21931-1976), L-63 brass (GOST 931-90), St3 steel (GOST 380-2005), SCH-20 cast iron (GOST 1412-85), and AK-7 aluminum alloy (GOST 1583-93), with three specimens of each metal used. Corrosion losses were determined by measuring the mass of the samples before and after the tests.

To evaluate the protective efficiency of the coolant, tests were conducted on a model simulating cooling system conditions that had undergone corrosive degradation due to the use of hard water. The tests were performed in the laboratory of the Joint Vietnam-Russia Tropical Science and Technology Research Center. The water used as a heat transfer fluid exhibited the following parameters: pH – 7.2; total hardness (as CaCO<sub>3</sub>) – 33.8 mg/L; chloride ion (Cl<sup>-</sup>) content – 8.8 mg/L; total iron content – less than 0.02 mg/L.

### Results and Discussion

The first phase of the investigation focused on determining the optimal composition of the VN-RU-30 coolant. The ideal ratio of water, ethylene glycol, and inhibitor should balance heat capacity, low-temperature performance, and anticorrosive properties, while adhering to the primary requirements of GOST 28084-89.

Initially, a coolant concentrate was prepared, consisting of a solution of the carboxylate corrosion inhibitor in ethylene glycol. Distilled water was then added in various proportions. The characteristics of the prepared coolant solutions and their corrosive effect on the specimens (determined by mass loss in g/m<sup>2</sup> · day) are presented in Table 1.

Results obtained from exposing the test specimens to coolant solutions with varying carboxylate corrosion inhibitor concentrations are as follows (Table 1):

- The alkalinity of the coolant solution containing 30% distilled water was 9.0 mL (standard: 10 mL), and the foam volume was 32.5 mL (standard: 30 mL). The corrosive effect did not exceed the standard allowable value

- In a highly diluted solution (70% distilled water), alkalinity reached 20.0 mL, and foam stability exceeded the standard value (3 s) at 4.81 s. The corrosive effect remained within the specified limits.

- For solutions containing 40-60% distilled water, the parameters for foaming, pH, alkalinity, and corrosive effect met the requirements of GOST 28084-89.

Table 1

Coolant VN-RU-30 characteristics with varying water content

Indicator	Standard according to GOST 28084-89	Amount of distilled water in the coolant composition, % by volume				
		30	40	50	60	70
Density at 20°C, g/cm <sup>3</sup>	–	1.030	1.052	1.069	1.078	1.094
Freezing point, °C	–	–60	–50	–35	–25	–15
Boiling point, °C	–	105	106	108	112	118
Corrosive effect on metal, g/m <sup>2</sup> · day in the sample:						
Copper	≤ 0.1	0.010	0.014	0.016	0.011	0.022
Solder	≤ 0.2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Brass	≤ 0.1	0.015	0.015	0.014	0.012	0.014
Steel	≤ 0.1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cast iron	≤ 0.1	–0.049	–0.049	–0.048	–0.045	–0.047
Aluminum	≤ 0.1	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000
Foaming tendency:						
foam volume, cm <sup>3</sup>	≤ 30	32.5	28.0	25.0	27.5	30.0
foam stability, s	≤ 3	2.13	2.06	2.10	2.80	4.81
pH value	7.5 to 11.0	8.5	8.4	8.4	8.3	8.0
Alkalinity, cm <sup>3</sup> , not less than	≥ 10	9.0	11.8	15.2	16.4	20.0

It should be noted that a reduction in distilled water content in the coolant solution leads to a lower boiling point and a higher crystallization temperature.

Diluting ethylene glycol with water improves the mixture's heat transfer due to water's higher specific heat capacity (4200 J/kg · K) compared to ethylene glycol (2433 J/kg · K), but this comes at the cost of reduced anticorrosive properties.

Based on the comprehensive set of performance indicators for the VN-RU-30 coolant (foaming, freezing and boiling points, heat transfer, and anticorrosive properties), the following composition recommended for practical application is as follows: water – 48%; ethylene glycol – 48%; carboxylate corrosion inhibitor – 4%.

The second phase of testing involved determining the physicochemical parameters of the three coolants according to GOST 28084-89. The results are presented in Table 2 and Figure 1.

Visual inspection of the samples tested for 14 days revealed a high protective effect from the coolants under study. Intense formation of corrosion products, localized damage, and surface degradation were not observed. It should be noted that negative values for the change in mass are due to the specifics of the post-testing cleaning of samples; they do not indicate the absence of corrosion processes. The consistency between visual and gravimetric data confirms the reliability of the assessment methods employed and the stable protective action of the coolants within the multi-element metallic system.

Corrosion test results for VN-RU-30 over 14 days at 88°C, as well as additional tests lasting 84 hours

at 92°C, showed that the coolant maintained its transparency and stability. The corrosion rates for all investigated samples were significantly below the maximum allowable values specified by the standard. Based on the totality of physicochemical parameters, VN-RU-30 is comparable to OZh-40 LENA and CoolStream Standard 40 coolants.

The third stage of the research verified the hypothesis regarding the protective and stabilizing action of the VN-RU-30 coolant, containing a carboxylate corrosion inhibitor, on an in-use cooling system exhibiting signs of corrosion.

To assess the protective efficiency of VN-RU-30, the authors modeled conditions simulating the operation of an engine cooling system degraded by the use of hard water. This approach allowed for the simulation of realistic operating conditions where corrosion products are already present on metal surfaces.

Initially, corrosion tests were conducted on metal samples in water, adhering to GOST 28084-89 requirements. This simulated the operation of a cooling system using water as a heat transfer fluid and formed a corrosion-active surface on the metals.

Subsequently, the samples, pre-corroded in water, were immersed in VN-RU-30 coolant to investigate its ability to suppress further corrosion development.

The test results demonstrate a clear difference in the nature of the corrosion processes when using water (Fig. 2a) versus the coolant (Fig. 2b). After 336 hours of testing in a glass vessel with water, a significant amount of corrosion products (deposits) was observed,

Table 2

Coolant testing according to GOST 28084-89

Indicator	Standard according to GOST 28084-89	Coolant		
		OZh-40 LENA	CoolStreamStandard40	VN-RU-30
Appearance	–	Clear homogeneous green liquid		
Freezing point, °C	–	<–40	<–40	<–40
Boiling point, °C	–	108	108	108
Corrosive effect over 336 h at 88°C on the sample, g/(m <sup>2</sup> ·day):				
Copper	≤ 0.1	0.790	0.005	0.005
Solder	≤ 0.2	0.053	0.007	0.009
Brass	≤ 0.1	0.026	0.005	–0.007
Steel	≤ 0.1	0.000	0.013	0.000
Cast iron	≤ 0.1	–0.163	–0.295	–0.059
Aluminum	≤ 0.1	0.050	0.006	0.000
Corrosive effect over 84 h at 92°C on the sample, g/(m <sup>2</sup> ·day):				
Copper	–	0.252	0.000	0.032
Solder	–	0.019	0.000	0.038
Brass	–	0.000	0.000	0.065
Steel	–	0.000	–0.077	–0.065
Cast iron	–	–0.280	–0.183	–0.140
Aluminum	–	0.071	–0.044	0.056
Foaming tendency:				
foam volume, cm <sup>3</sup>	≤ 30	20	25	25
foam stability, s	≤ 3	1.9	2.3	1.8
pH value	7.5 to 11	9.5	8.0	8.4
Alkalinity, cm <sup>3</sup> , not less than	≥ 10	13.7	2.3	14.6

precipitated on the sample surfaces and at the bottom of the vessel.

The sample surfaces underwent intense degradation (Fig. 2a). The highest corrosion rate, 8.84 g/(m<sup>2</sup>·day), was recorded for the steel sample. Compared to the requirements of GOST 28084-89, the corrosion rate for steel exceeded the standard value by a factor of 88.4, for cast iron by a factor of 53.2, for solder by a factor of 28.7, and for aluminum by a factor of 23.6.

When using VN-RU-30 coolant, the sample surfaces remained practically unchanged after 336 hours of testing, and the corrosion zones did not expand (Fig. 2b). The solution remained transparent, with no formation of sediment or corrosion products. Quantitative corrosion impact data are presented in Table 3.

Visual analysis and the results of quantitative measurements (Table 3) indicate a stabilization of the metallic surfaces, with no propagation of corrosion foci or secondary deposit formation. This suggests that VN-RU-30 exhibits not only a preventive but also a stabilizing effect in previously used cooling systems. The protective effect of VN-RU-30 against ferrous and non-ferrous metals exceeded 98%.

The fourth stage of the research involved field tests simulating the long-term storage of an engine cooling system.

The objective of these field tests was to comprehensively assess the corrosive behavior of a multi-element engine cooling system during prolonged storage when using water and VN-RU-30, and to determine the protective efficiency of the VN-RU-30 coolant.

Sets of samples for long-term corrosion tests were prepared in accordance with GOST 28084-89 requirements. Each set of samples was placed in a separate 1-liter glass vessel filled with the respective fluid. Tests were conducted in two media: water and VN-RU-30 coolant.

The glass vessels were hermetically sealed and stored for 46 months in a covered warehouse, simulating the conditions of long-term engine cooling system storage. Upon completion of the tests, the samples were extracted and cleaned according to GOST 28084-89 requirements. Corrosion was assessed based on visual analysis of the sample surface condition and determination of mass loss. The test results are presented in Figure 3 and Table 4.

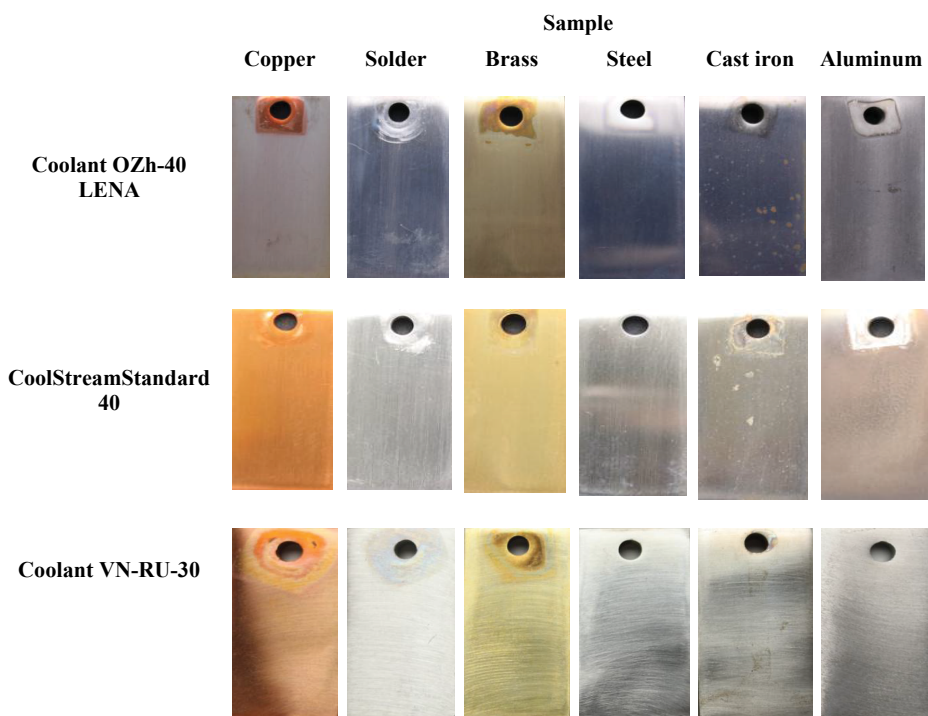


Fig. 1. Appearance of samples after 336 h (14 days) of testing according to GOST 28084-89

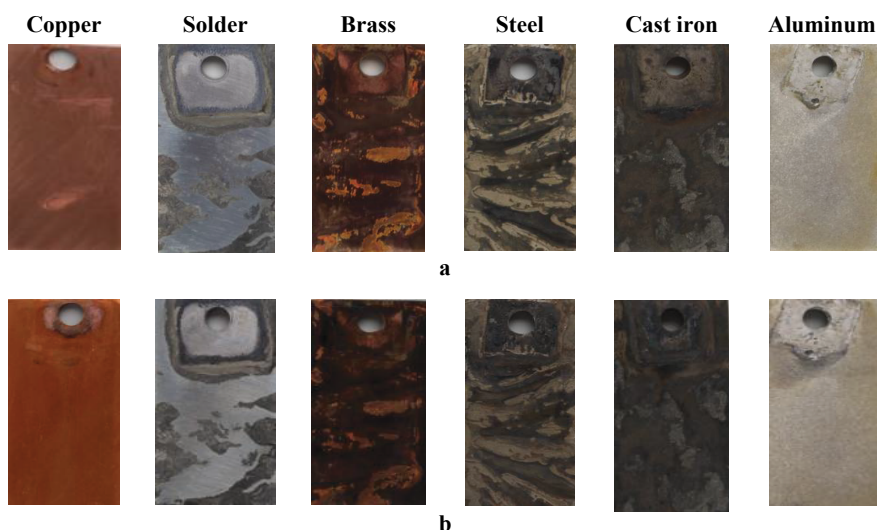


Fig. 2. Appearance of samples after 336 h of corrosive exposure: a – in water (Stage 1); b – in VN-RU-30 coolant (Stage 2)

Table 3

Corrosive effects of water and VN-RU-30 on samples over 336 h

Medium	Corrosive Effect on Samples g/(m <sup>2</sup> ·day)					
	Copper	Solder	Brass	Steel	Cast iron	Aluminum
Water	0.18	2.87	0.15	8.84	5.32	2.36
VN-RU-30	0.08	0.04	0.12	0.05	0.30	0.16

Analysis of Figure 3 and the data in Table 4 leads to the following conclusions. In water, signs of active corrosion processes were observed early in the tests. After one week, the solution turned yellow, and after one month, a significant amount of corrosion products was detected at the bottom of the vessels and on the sample

surfaces. Throughout the entire test period, corrosion processes were intense and accompanied by deposit formation. Upon completion of the 46-month tests, the sample surfaces exhibited pronounced corrosive degradation, particularly for solder, steel, cast iron, and aluminum. The most intensive corrosion was observed for cast iron

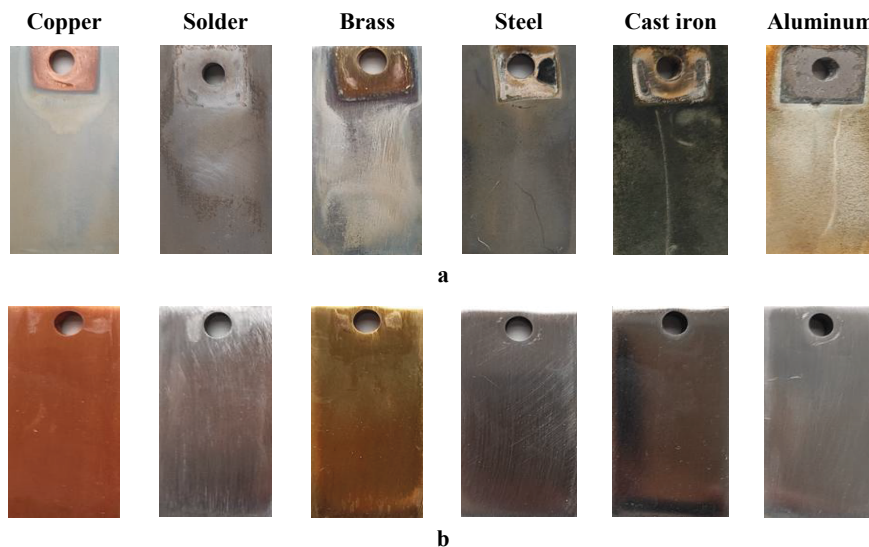


Fig. 3. Sample surfaces after 46 months of field testing in water (a) and VN-RU-30 coolant (b)

Table 4

Corrosive effects of two media on the cooling system over 46 months

Medium	Corrosive effect on samples g/(m <sup>2</sup> •day)	Samples					
		Copper	Solder	Brass	Steel	Cast iron	Aluminum
Water	Mass loss, mg	-4.0	66.7	-1.1	129.0	273.6	47.7
	Corrosion rate over the storage period, g/m <sup>2</sup>	1.42	21.53	0.41	48.69	85.61	13.33
VN-RU-30	Mass loss, mg	-1.0	-1.6	-0.7	-1.3	-6.2	-0.7
	Corrosion rate over the storage period, g/m <sup>2</sup>	0.34	0.52	0.26	0.49	1.94	0.20

and steel, with mass losses of 273.6 and 129.0 mg, respectively, and corrosion rates of 85.61 and 48.69 g/m<sup>2</sup>.

In the VN-RU-30 coolant, a pronounced protective effect was observed. The solution remained transparent and chemically stable throughout the 46-month test period. The samples showed no signs of uniform or localized corrosion, and no deposits formed. For all investigated samples, mass loss and corrosion rates were minimal. This effect can be attributed to the formation of stable protective films and the stabilization of electrochemical processes on the surfaces of metals and alloys.

The results of the 46-month field tests confirm the highly effective anticorrosion properties of the VN-RU series coolants. In contrast, the use of water leads to intense corrosion and the accumulation of deposits.

The totality of results from both comprehensive laboratory and field tests allows VN-RU-30 coolant to be considered an effective agent for use in ICE cooling systems. The application of a theoretically grounded methodology for comprehensive validation, oriented towards real operating conditions, enabled a reliable assessment of ICE coolant effectiveness.

### Conclusions

The organic carboxylate corrosion inhibitor incorporated into the coolant formulation maintains its

anticorrosive properties. The recommended coolant composition (48% water, 48% ethylene glycol, 4% corrosion inhibitor) ensures a balance between corrosion protection and thermophysical properties.

The corrosion rates of copper, brass, solder, steel, cast iron, and aluminum alloys in the VN-RU-30 coolant medium are significantly lower than the maximum allowable values stipulated by regulatory documents, which attests to the high effectiveness of the employed corrosion inhibitor.

Model tests of a cooling system previously subjected to corrosive degradation demonstrated that VN-RU-30 coolant not only prevents the development of new corrosion effects but also stabilizes the condition of already damaged metallic surfaces, effectively suppressing the further propagation of corrosion foci.

46-month field tests, simulating the storage process of an engine cooling system, showed intense corrosion and deposit formation when water was used. In contrast, VN-RU-30 ensured a stable condition of metal elements and alloys without corrosive damage.

The comprehensive set of obtained results provides grounds to recommend VN-RU-30 coolants for use in both new and previously operated engine cooling systems, including modes of operation, restoration, and long-term preservation.

## References

1. Farid R., Sarkar D.K., Das S. Studies of corrosion inhibition performance of inorganic inhibitors for aluminum alloy. *Materials*. 2025;18(3):595. <https://doi.org/10.3390/ma18030595>
2. Huy V.V., Quang H.D., Katolik A., Dan N.T., Gaidar S.M. The development of corrosion inhibitor used in the automotive coolant. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2021;94(12):1577-1584. <https://doi.org/10.1134/S1070427221120028>
3. Gandham S., Nettem V.C., Peddy V.C. Rao, Rajiv Kumar T.A., Vadapalli S. Corrosion characteristics of an automotive coolant formulation dispersed with nano-materials. *Corrosion Reviews*. 2019;37(3):245-257. <https://doi.org/10.1515/correv-2018-0033>
4. Liu Y., Cheng Y.F. Effects of coolant chemistry on corrosion of 3003 aluminum alloy in automotive cooling system. *Materials and Corrosion*. 2009;61(7):574-579. <https://doi.org/10.1002/maco.200905323>
5. Karelina M.Y., Gaidar S.M., Quang H.D. et al. Vehicle life when using corrosion inhibitors. *Russian Engineering Research*. 2022;42:172-174. <https://doi.org/10.3103/S1068798X22020113>
6. Zainulabdeen A.A., Betti Z.A., Jamil D.M. et al. Inhibition mechanism and corrosion protection of mild steel in hydrochloric acid using 2-hydroxynaphthaldehyde thiosemicarbazone (2HNT): Experimental and theoretical analysis. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2024;13(2):935-961. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2024-13-2-16>
7. Jabbar A.M., Abdalnabi A.S. Corrosion inhibitors for carbon steel N80 in an acidic medium by using the compound (E)-N-(benzo[djthiazol-2-yl)-1-(2,3-dihydrobenzo[ $\epsilon$ ][1,4]dioxin-6-yl)methanimine. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2024;13(2):1146-1163. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2024-13-2-27>
8. Ma I.A.W., Ammar S., Kumar S.S.A., Ramesh K., Ramesh S. A concise review on corrosion inhibitors: Types, mechanisms and electrochemical evaluation studies. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2022;19(1):241-268. <https://doi.org/10.1007/s11998-021-00547-0>
9. Pellet R., Bartley L., Hunsicker D. The role of carboxylate-based coolants in cast iron corrosion protection. *SAE Technical Papers*. 2001. <https://doi.org/10.4271/2001-01-1184>
10. Gemicioğlu A., Demircan T. Experimental analysis of the effects of using different water-ethylene glycol mixture rates on heat transfer performance in a heat exchanger. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislikve Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 2021;29(2):145-157. <https://doi.org/10.31796/ogummf.870256>
11. Kuznetsov Y.I., Andreev N.N., Marshakov A.I. Physicochemical aspects of metal corrosion inhibition. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2020;94(3):505-515. <https://doi.org/10.1134/S0036024420030152>
12. Kartoshkin A.P., Spiridonova A.N. Corrosive effect of coolants on metals during operation. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2019;57:162-167. (In Russ.)
13. Bing Lin, Yu Zuo. Corrosion inhibition of carboxylate inhibitors with different alkylene chain lengths on carbon steel in an alkaline solution. *RSC Adv*. 2019 Mar 1;9(13):7065-7077. <https://doi.org/10.1039/c8ra10083g>. PMID: 35519962; PMCID: PMC9061107.
14. Gaidar S.M., Quang H.D., Huy V.V., Konoplev V.E., Pikina A.M., Lapsar O.M. Investigation of the synergistic effect of anodic and cathodic contact inhibitors in steel corrosion protection. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2024;13(2):1043-1055. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2024-13-2-22>

## Список источников

1. Farid R., Sarkar D.K., Das S. Studies of corrosion inhibition performance of inorganic inhibitors for aluminum alloy. *Materials*. 2025;18(3):595. <https://doi.org/10.3390/ma18030595>
2. Huy V.V., Quang H.D., Katolik A., Dan N.T., Gaidar S.M. The development of corrosion inhibitor used in the automotive coolant. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2021;94(12):1577-1584. <https://doi.org/10.1134/S1070427221120028>
3. Gandham S., Nettem V.C., Peddy V.C. Rao, Rajiv Kumar T.A., Vadapalli S. Corrosion characteristics of an automotive coolant formulation dispersed with nano-materials. *Corrosion Reviews*. 2019;37(3):245-257. <https://doi.org/10.1515/correv-2018-0033>
4. Liu Y., Cheng Y.F. Effects of coolant chemistry on corrosion of 3003 aluminum alloy in automotive cooling system. *Materials and Corrosion*. 2009;61(7):574-579. <https://doi.org/10.1002/maco.200905323>
5. Karelina M.Y., Gaidar S.M., Quang H.D. et al. Vehicle life when using corrosion inhibitors. *Russian Engineering Research*. 2022;42:172-174. <https://doi.org/10.3103/S1068798X22020113>
6. Zainulabdeen A.A., Betti Z.A., Jamil D.M. et al. Inhibition mechanism and corrosion protection of mild steel in hydrochloric acid using 2-hydroxynaphthaldehyde thiosemicarbazone (2HNT): Experimental and theoretical analysis. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2024;13(2):935-961. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2024-13-2-16>
7. Jabbar A.M., Abdalnabi A.S. Corrosion inhibitors for carbon steel N80 in an acidic medium by using the compound (E)-N-(benzo[djthiazol-2-yl)-1-(2,3-dihydrobenzo[ $\epsilon$ ][1,4]dioxin-6-yl)methanimine. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2024;13(2):1146-1163. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2024-13-2-27>
8. Ma I.A.W., Ammar S., Kumar S.S.A., Ramesh K., Ramesh S. A concise review on corrosion inhibitors: Types, mechanisms and electrochemical evaluation studies. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2022;19(1):241-268. <https://doi.org/10.1007/s11998-021-00547-0>
9. Pellet R., Bartley L., Hunsicker D. The role of carboxylate-based coolants in cast iron corrosion protection. *SAE Technical Papers*. 2001. <https://doi.org/10.4271/2001-01-1184>
10. Gemicioğlu A., Demircan T. Experimental analysis of the effects of using different water-ethylene glycol mixture rates on heat transfer performance in a heat exchanger. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislikve Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 2021;29(2):145-157. <https://doi.org/10.31796/ogummf.870256>
11. Kuznetsov Y.I., Andreev N.N., Marshakov A.I. Physicochemical aspects of metal corrosion inhibition. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2020;94(3):505-515. <https://doi.org/10.1134/S0036024420030152>
12. Картошкин А.П., Спиридонова А.Н. Коррозионное воздействие охлаждающих жидкостей на металлы при эксплуатации // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2019. № 57. С. 162-167. EDN: VPJNU
13. Лин Б., Цзо Ю. Ингибирование коррозии карбоксилатными ингибиторами с разной длиной алкиленовой цепи на углеродистой стали в щелочном растворе. *RSC Adv*. 2019. Mar 1;9(13):7065-7077. <https://doi.org/10.1039/c8ra10083g>. PMID: 35519962; PMCID: PMC9061107
14. Gaidar S.M., Quang H.D., Huy V.V., Konoplev V.E., Pikina A.M., Lapsar O.M. Investigation of the synergistic effect of anodic and cathodic contact inhibitors in steel corrosion protection. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2024;13(2):1043-1055. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2024-13-2-22>

**Author Information**

**Hoang Duc Quang**<sup>1</sup>, PhD (Chem); quanghoang1510@gmail.com;  
ScopusAuthorID: 57201699580

**Vu Van Huy**<sup>2</sup>; huy241989@gmail.com

**Sergey M. Gaidar**<sup>3</sup>, DSc (Eng), Professor;  
techmash@rgau-msha.ru;  
<https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>;  
ScopusAuthorID: 57191589797; ResearcherID: I-4723-2018

**Anna M. Pikina**<sup>4</sup>, CSc (Eng), Associate Professor;  
pikina@rgau-msha.ru<sup>✉</sup>;  
<https://orcid.org/0000-0001-7116-3526>

**Andrey E. Mukinov**<sup>5</sup>, External Doctoral Candidate / Applicant

**Aleksei Yu. Alipichev**<sup>6</sup>, CSc (Ed), Associate Professor;  
alipichev@rgau-msha.ru;  
<https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>;  
ScopusAuthorID: 57194385594

<sup>1,2</sup> Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Center;  
3/2 Street, Ward 10, Ho Chi Minh City, Vietnam

<sup>3,4,5,6</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev  
Agricultural Academy; Timiryazevskaya Str. 49,  
Moscow, Russia

**Author Contribution**

H.D. Quang – writing – review and editing of the manuscript;

V.V. Huy – investigation;

S.M. Gaidar – research supervision, conceptualization, data verification, writing – review and editing of the manuscript;

A.M. Pikina – writing – original draft;

A.E. Mukinov – investigation;

A.Yu. Alipichev – English translation.

**Conflict of interests**

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

Received 22.12.2025; Revised 17.03.2026; Accepted 26.03.2026

**Информация об авторах**

<sup>1</sup> **Хоанг Дык Куанг**, канд. хим. наук,  
quanghoang1510@gmail.com;  
ScopusAuthorID: 57201699580

<sup>2</sup> **Ву Ван Гуи**, huy241989@gmail.com

<sup>3</sup> **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

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

<sup>5</sup> **Мукинов Андрей Елемесович**, соискатель

<sup>6</sup> **Алипичев Алексей Юрьевич**, канд. пед. наук, доцент,  
alipichev@rgau-msha.ru;  
<https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>;  
ScopusAuthorID: 57194385594

<sup>1,2</sup> Российско-Вьетнамский Тропический  
научно-исследовательский и технологический центр; 3,  
ул. 3/2, район 10, г. Хошимин, Вьетнам

<sup>3,4,5,6</sup> Российский государственный аграрный университет –  
МСХА имени К.А. Тимирязева; ул. Тимирязевская 49,  
г. Москва, Россия

**Вклад авторов**

Д.К. Хоанг – создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

В.Г. Ву – проведение исследований;

С.М. Гайдар – руководство исследованиями, концептуализация, верификация данных, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

А.М. Пикина – создание черновика рукописи;

А.Е. Мукинов – проведение исследований;

А.Ю. Алипичев – англоязычный перевод.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 22.12.2025, после рецензирования и доработки 17.03.2026, принята к публикации 26.03.2026

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.79.03:631.331

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-56-66>

## Критериальное обоснование выбора технических средств для способа приварки ремонтной детали к диску сошника

*М.Н. Ерохин<sup>1</sup>, А.Г. Пастухов<sup>2</sup>, Е.П. Тимашов<sup>3</sup>, С.П. Казанцев<sup>4</sup>, С.Ф. Вольвак<sup>5</sup>, М.И. Волков<sup>6</sup>*

<sup>1,4</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

<sup>2,3,5</sup> Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина; г. Белгород, Россия

<sup>6</sup> ЗАО «Сокол-АТС»; г. Белгород, Россия

<sup>1</sup> [er.mihn@mail.ru](mailto:er.mihn@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-8249-8970>

<sup>2</sup> [pastukhov\\_ag@mail.ru](mailto:pastukhov_ag@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>

<sup>3</sup> [timachov@mail.ru](mailto:timachov@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0003-0740-8714>

<sup>4</sup> [kazansev@rgau-msha.ru](mailto:kazansev@rgau-msha.ru); <https://orcid.org/0000-0002-7158-1709>

<sup>5</sup> [volvak.s@yandex.ru](mailto:volvak.s@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-6955-7144>

<sup>6</sup> [volkov.mikhail2017@yandex.ru](mailto:volkov.mikhail2017@yandex.ru); <https://orcid.org/0009-0009-0267-5224>

**Аннотация.** Работоспособный двухдисковый сошник, формируя плотное и равномерно заглубленное ложе для семян, обеспечивает хорошую всхожесть и урожайность зерновых культур. Значительный абразивный диаметральный износ дисков сошников при эксплуатации обуславливает необходимость их частого восстановления. Цель исследований – обосновать выбор технических средств для реализации приварки ремонтной детали в виде фрагментов колец на примере дисков сошников. Выбор технических средств для реализации приварки ремонтной детали проводили на основе их многокритериальной оценки. Методика основана на ранговом сравнении характеристик и параметров с последующим критериальным условием максимума или минимума показателей. Учитывали технико-экономический критерий (сварочный аппарат и вид сварки), технологический критерий (марку электрода), критерий, характеризующий сварной шов (диаметр электрода), и прочностной критерий (материал ремонтной детали). Окончательную оценку выполняли с использованием обобщенного интегрального критерия – минимального расстояния до цели, полученного в результате анализа оценочных графов многокритериальных моделей. Рассмотрели 4 типа сварочных аппаратов, 7 марок электродов диаметром 2,5; 3,0; 3,2; 4,0 мм, и в качестве материала ремонтной детали – 4 типа стали. На основании выполненных расчетов и обобщенного интегрального критерия минимального расстояния до цели выбрали следующие технические средства: сварочный аппарат марки Кедр ВД-500.01 ( $\mu_{1min} = 3,66$ ); электрод марки УОНИ-13/45 ( $\mu_{2min} = 4,19$ ); электрод диаметром 3,2 мм ( $\mu_{3min} = 3,87$ ); материал ремонтной детали – сталь 30MnB5 ( $\mu_{4min} = 4,00$ ). Выбранные основные технические средства на основе эвристического метода многокритериальной оценки 23 показателей по обобщенному интегральному критерию расстояния до цели рекомендуется применять при реализации технологического процесса восстановления дисков сошников путем приварки ремонтной детали в виде фрагментов колец.

**Ключевые слова:** сошник сеялки; диск сошника; приварка; материал ремонтной детали; электрод; технические средства; критерий; ранг; оценочный радар

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках проекта по созданию и развитию инжинирингового центра РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (соглашение № 075-15-2025-543 от 16 июня 2025 г.).

**Для цитирования:** Ерохин М.Н., Пастухов А.Г., Тимашов Е.П., Казанцев С.П., Вольвак С.Ф., Волков М.И. Критериальное обоснование выбора технических средств для способа приварки ремонтной детали к диску сошника // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 2. С. 56-66. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-56-66>

## ORIGINAL ARTICLE

## Criterion-based selection of technical means for welding a repair part to the coulter disk

M.N. Erokhin<sup>1</sup>, A.G. Pastukhov<sup>2✉</sup>, E.P. Timashov<sup>3</sup>, S.P. Kazantsev<sup>4</sup>, S.F. Volvak<sup>5</sup>, M.I. Volkov<sup>6</sup>

<sup>1,4</sup>Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

<sup>2,3,5</sup>Belgorod State Agrarian University named after V. Ya. Gorin; Belgorod, Russia

<sup>6</sup>Sokol-ATS ZAO; Belgorod, Russia

<sup>1</sup>er.mihn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8249-8970>

<sup>2</sup>pastukhov\_ag@mail.ru✉; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>

<sup>3</sup>timachov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0740-8714>

<sup>4</sup>kazansev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7158-1709>

<sup>5</sup>volvak.s@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6955-7144>

<sup>6</sup>volkov.mikhail2017@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0009-0267-5224>

**Abstract.** A serviceable double-disc coulter, forming a dense and evenly embedded seedbed, ensures good germination and yield of grain crops. Significant abrasive diametral wear of the coulter discs during operation necessitates their frequent restoration. The study aimed to justify the selection of technical means for welding a repair part in the form of ring fragments, using coulter discs as an example. The selection of technical means for welding the repair part was based on a multi-criteria evaluation. The methodology employs a ranking comparison of characteristics and parameters, followed by a criterion-based condition of maximizing or minimizing indicators. The following criteria were considered: technical–economic criterion (the welding machine and welding type); technological criterion (the electrode grade); weld joint criterion (the electrode diameter); and strength criterion (the repair part material). The final evaluation was performed using a generalized integral criterion – the minimum distance to the goal – obtained through analysis of evaluation graphs of multi-criteria models. The authors examined four types of welding machines, seven electrode grades with diameters of 2.5, 3.0, 3.2, and 4.0 mm, and four steel types as the repair part material. Based on the calculations and the generalized integral criterion of minimum distance to the goal, the following technical means were selected: the welding machine Kedr VD-500.01 ( $\mu_1_{\min} = 3.66$ ); the electrode grade: UONI-13/45 ( $\mu_2_{\min} = 4.19$ ); the electrode diameter: 3.2 mm ( $\mu_3_{\min} = 3.87$ ); and the repair part material: 30MnB5 steel ( $\mu_4_{\min} = 4.00$ ). The selected primary technical means, based on a heuristic multi-criteria evaluation of 23 indicators using the generalized integral criterion of distance to the goal, are recommended for implementation in the technological process of restoring coulter discs by welding repair parts in the form of ring fragments.

**Keywords:** seeder coulter; coulter disc; welding; repair part material; electrode; technical means; criterion; rank; evaluation radar

**Acknowledgments.** The study was performed as part of the project aimed at establishing and developing the Engineering Center of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Agreement No. 075-15-2025-543 of June 16, 2025).

**For citation:** Erokhin M.N., Pastukhov A.G., Timashov E.P., Kazantsev S.P., Volvak S.F., Volkov M.I. Criterion-based selection of technical means for welding a repair part to the coulter disk. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(2):56-66 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-56-66>

### Введение

С целью научно-технологического обеспечения реализации задачи продовольственной безопасности Российской Федерации необходимо разрабатывать инновационные отечественные технологии обеспечения работоспособности сельскохозяйственной техники с целью повышения технического уровня – в частности, производственной ремонтной базы [1]. Анализ опыта ремонта сельскохозяйственной техники показывает, что при дефектации машин после

разборки пригодными к дальнейшей эксплуатации остаются примерно 45% деталей. При этом около 50% деталей подлежат восстановлению и порядка 5% их направляются на утилизацию [2]. Однако анализ диаметрального износа дисковых сошников сеялок СЗ-3,6 и СЗТ-3,6А показал, что по опытному распределению данных из 96 дисков 10% имеют износ 0...10 мм, 37,6% – 10,0...24,0 мм, а остальные 52,4% – свыше 24 мм; это свидетельствует о необходимости их выбраковки и утилизации [3].

При проектировании технологических процессов в сельскохозяйственном машиностроении и ремонтном производстве для обоснования технологических процессов, выбора материалов и инструментов ранее применялись технический, технологический и технико-экономический критерии [5, 6].

Анализ источников в области многокритериальной инженерной оценки показывает, что применительно к автомобильному транспорту распространены критерии оценки техники и технологий по показателям экономической эффективности, качества и конкурентоспособности [7], трансформируемые в трехступенчатую оценочную модель по экономической эффективности грузовых автомобилей за период эксплуатации [8]. В машиностроении используют комплексный экономический критерий, учитывающий этапы производства и эксплуатации материалов деталей [9, 10]. С учетом весовой значимости характеристик автотракторной техники применяют методы многокритериальной оценки конкурентоспособности технических изделий с выходом на интегральный конечный критерий [11, 12].

Предлагаем выбор технических средств для технологического процесса восстановления дисков сошников проводить на основе многокритериальной оценки их характеристик и параметров.

**Цель исследований:** обосновать выбор технических средств для реализации приварки ремонтной детали в виде фрагментов колец на примере дисков сошников.

### Материалы и методы

Для повторного использования изношенных дисков сошников предложены приспособление (RU1777811) и способ восстановления путем приварки ремонтной детали в виде фрагментов колец<sup>1</sup> [2, 4].

Многокритериальная оценка учитывает выбор сварочного аппарата (вида сварки) по технико-экономическому критерию, марку электрода по технологическому критерию, диаметр электрода (режимы сварки) по критерию характеристик сварных швов и марку материала ремонтной детали по прочностному критерию.

Основу методики составляет ранговое сравнение характеристик и параметров с последующим критериальным условием максимума или минимума

<sup>1</sup> Бердышев В.Е., Валиев А.Р., Зиганшин Б.Г. и др. Сельскохозяйственные машины. Машины для посева. Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2022. 239 с. EDN: PEFTAU

показателей<sup>2</sup> [5, 6]. В процессе практической обработки многокритериальной оценки применен эвристический метод оценки технических и технологических решений на основе обобщенного интегрального критерия расстояния до цели [13].

Сущность обобщенного интегрального критерия расстояния до цели заключается в обосновании идеального варианта и в оценке меры приближения к нему каждого из альтернативных вариантов. Идеальный вариант характеризует такую систему, для которой каждый из критериев достигает идеализированного значения, обоснованного теоретически или практически.

В процедуре многокритериальной оценки выбора вариантов решения учтены следующие правила: 1) цели выражаются в критериальной форме, что является условием количественной оценки приближения вариантов к цели; 2) критерии являются взаимно независимыми, что обуславливает одноразовый учет существенных для достижения цели факторов и снижение числа критериев; 3) критерии сводятся к виду, при котором их улучшение происходит в одинаковом направлении (в сторону увеличения или уменьшения) [13].

Практическая реализация метода осуществлена в виде графической модели по следующим правилам: 1) шкалы критериев изображаются в виде лучей, выходящих из одного центра; 2) значения критериев сравниваемых вариантов откладываются на радиально размещенных шкалах таким образом, чтобы улучшение критерия происходило к центру; 3) при соединении точек на шкалах для  $j$ -го варианта образуется замкнутая фигура в виде многоугольника; 4) по идеальным значениям критериев строится многоугольник идеализированного варианта; 5) лучшим считается вариант, для которого площадь построенного многоугольника наиболее близка к площади идеализированного варианта.

Для придания количественной оценки выполнена ранговая оценка показателей при условии, что минимальный ранг присваивается наиболее благоприятному значению соответствующего параметра, а максимальный – неблагоприятному значению. Окончательная оценка выполнена по обобщенному критерию расстояния до цели ( $\mu_i$ ), определяемого в виде отношения площади каждого рассматриваемого

<sup>2</sup> Кравченко И.Н., Пузряков А.Ф., Корнеев В.М. и др. Технологические процессы в техническом сервисе машин и оборудования: Учебное пособие для учебных заведений, реализующих программу среднего профессионального образования по специальности 35.02.07 «Механизация сельского хозяйства». М.: Инфра-М, 2020. 346 с. EDN: RIFSAT

мого варианта ( $S_{Pi}$ ) к площади идеализированного варианта ( $S_{Po}$ ):

$$S_{Pi} = \sin\left(\frac{360^\circ}{n}\right) \cdot \frac{1}{2} (A_1A_2 + A_2A_3 + \dots + A_nA_1), \mu_i = \frac{S_{Pi}}{S_{Po}}$$

где  $n$  – число осей радара (оценочные показатели);  $A_1 \dots A_n$  – координаты показателей на соответствующих осях (ранги).

Меньшее значение обобщенного критерия расстояния до цели определяет лучшее, оптимальное решение, ближе всего подходящее к идеальному решению [13].

### Результаты и их обсуждение

Обоснование выбора технических средств для реализации способа восстановления дисков сошников путем приварки фрагментов колец на основе многокритериальной оценки и выбора решения по минимальному расстоянию до цели рассмотрим с учетом выделения в исследуемом технологическом процессе 4 этапов: 1 – выбор сварочного аппарата (вида сварки); 2 – выбор марки электрода; 3 – выбор диаметра электрода (режима сварки); 4 – выбор материала ремонтной детали.

При выборе сварочного аппарата рассмотрим наиболее распространенные варианты: 1 – ручная электродуговая сварка, Кедр ВД-500.01<sup>3</sup>; 2 – полуавтоматическая сварка, ПТК Rilon ARC250 С<sup>4</sup>; 3 – аргодуговая сварка «Аврора», система 200 АС/DC Пульс<sup>5</sup>;

4 – контактная точечная сварка, NordBerg Automotive WS6<sup>6</sup>. На основе паспортных данных сварочных аппаратов (табл. 1) проведено сравнение их показателей: 1) габаритные размеры и масса сварочного аппарата для определенного вида сварки при критериальном условии стремления к минимуму; 2) мощность сварочного аппарата, определяющая способность сваривать различные металлы и сложные соединения, при критериальном условии стремления к максимуму; 3) напряжение электрического тока, влияющее на легкость зажигания сварочной дуги, при критериальном условии стремления к максимуму; 4) диапазон регулировки сварочного тока, обуславливающий возможность процесса сварки, при критериальном условии стремления к максимуму; 5) коэффициент полезного действия (КПД), характеризующий эффективность сварочной системы в отношении преобразования и передачи энергии, при критериальном условии стремления к максимуму; 6) стоимость сварочного аппарата, определяющая исходные капиталовложения, при критериальном условии стремления к минимуму.

На основании данных таблицы 1 выполнена графическая иллюстрация рангов для рассматриваемых сварочных аппаратов в виде оценочного радара (рис. 1). По сумме рангов наиболее предпочтительным является вариант 1 – ручная электродуговая сварка, Кедр ВД-500.01 (табл. 1, рис. 1).

Технико-экономические характеристики сварочных аппаратов

Таблица 1

Technical and economic characteristics of welding machines

Table 1

Вариант	Показатель 1		Показатель 2		Показатель 3		Показатель 4		Показатель 5		Показатель 6		Сумма рангов
	Размеры / масса, мм/кг	Ранг	Мощность, кВА	Ранг	Напряжение, В	Ранг	Регулирование по току, А	Ранг	КПД, %	Ранг	Стоимость, тыс. руб.	Ранг	
1	550×260×430 / 28,6	3	22,5	1	90	1	20...500	1	85	1	81,4	4	11
2	560×300×435 / 14,5	2	10,7	4	65	2	30...250	3	80	2	35,5	1	14
3	470×210×380 / 13,3	1	20,0	2	68	3	30...200	4	80	2	54,3	2	14
4	700×960×460 / 70,0	4	19,0	3	13	4	50...5000	2	–	3	54,7	3	19

<sup>3</sup> Аппарат инверторный КЕДР ВД-500.01. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.ligasvarki.ru/catalog/svarochnoe\\_oborudovanie/svarochnye\\_apparaty\\_1/ruchnay\\_dugovaya\\_svarka\\_invertornyy\\_ked\\_vd\\_500\\_01\\_pro/](https://www.ligasvarki.ru/catalog/svarochnoe_oborudovanie/svarochnye_apparaty_1/ruchnay_dugovaya_svarka_invertornyy_ked_vd_500_01_pro/) (дата обращения: 30.01.2026).

<sup>4</sup> ПТК RILON ARC250 С. [Электронный ресурс]. URL: <https://ptk-svarka.ru/product/ptk-rilon-arc-250-c> (дата обращения: 07.11.2025).

<sup>5</sup> Аппарат аргодуговой сварки аврора система 200 АС/DC ПУЛЬС (2 ПОКОЛЕНИЕ). [Электронный ресурс]. URL: <https://evrotek.spb.ru/catalog/product/68941/> (дата обращения: 07.11.2025).

<sup>6</sup> Аппарат точечной сварки NORDBERG WS6 (380 В). [Электронный ресурс]. URL: <https://centr-to.ru/good-170-apparat-tochechnoy-svarki-nordberg-ws6-220-v-380-v> (дата обращения: 07.11.2025).

Для выбора марки электрода рассмотрели применяемые на производстве варианты: 1 – УОНИ-13/45; 2 – АНО-4 (Э46); 3 – МР-3 (Э46); 4 – ОЗС-4 (Э46); 5 – МК-46.00 (Э50А); 6 – ЦУ-5 (Э50А); 7 – ОК-46.00. Сравнение провели по технологическому критерию (табл. 2), анализируя следующие показатели<sup>7-8</sup>: 1) покрытие электродов, определяющее качество сварного шва, – основное, рутиловое, рутилово-карбонатное, рутилово-целлюлозное и др. покрытия (для сварки углеродистых сталей предпочтительным является основное покрытие); 2) коэффициент наплавки, характеризующий количество расплавленного металла, переходящего в сварной шов (критериальное условие – стремление к максимуму); 3) количество электродов на 1 кг наплавленного металла, характеризующее расход электродов в процессе (критериальное условие – стремление к минимуму); 4) производительность сварки, обусловленная различными параметрами сварочных аппаратов (критериальное условие – стремление к максимуму); 5) предел прочности при разрыве, характеризующий максимальное напряжение, которое может выдержать

наплавляемый материал (критериальное условие – стремление к максимуму).

Графическая иллюстрация рангов для рассматриваемых марок электродов (табл. 2) в виде оценочного радара представлена на рисунке 2. Анализ данных (табл. 2, рис. 2) показывает, что наиболее предпочтительным в технологическом процессе приварки ремонтной детали является электрод марки УОНИ-13/45 (вариант 1).

При выборе диаметра электрода и соответствующих режимов приварки рассмотрели 4 варианта, в которых диаметры электродов наиболее близки к толщине свариваемых деталей 3 мм: 1 – 2,5 мм; 2 – 3,0 мм; 3 – 3,2 мм; 4 – 4,0 мм.

Сравнение осуществляли по критерию характеристик сварных швов на основании анализа технических данных<sup>9,10</sup> (табл. 3): 1) толщины металла фрагментов кольца, обусловленной толщиной диска 3 мм (принимается в диапазоне 2...6 мм, критериальное условие – приближение к толщине диска); 2) силы тока согласно рекомендуемой для толщины металла 3 мм – 65...100 А (критериальное

Таблица 2

Технологические характеристики сварочных электродов

Table 2

Process characteristics of welding electrodes

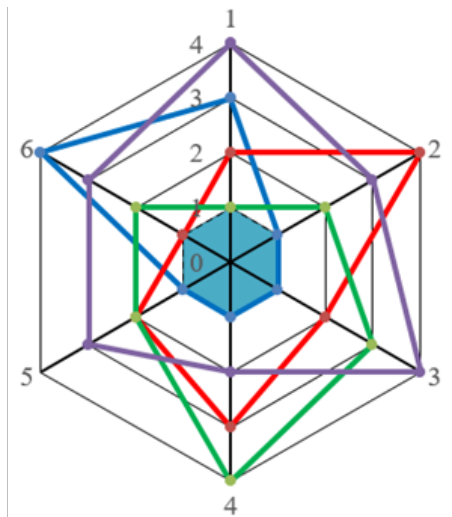
Вариант	Показатель 1		Показатель 2		Показатель 3		Показатель 4		Показатель 5		Сумма рангов
	Покрытие	Ранг	Коэффициент наплавки, г/Ач	Ранг	Расход электродов, ед.	Ранг	Производительность, кг/ч	Ранг	Предел прочности, МПа	Ранг	
1	Основное	1	9,5	1	1,6	1	1,3	3	460	4	10
2	Рутилово-карбонатное	2	8,3	3	1,7	2	1,4	2	450	5	14
3	Рутиловое	4	8,5	2	1,7	2	1,7	1	500	2	11
4	Рутиловое	4	8,5	2	1,6	1	1,4	2	490	3	12
5	Рутиловое	4	8,0	4	1,6	1	0,9	4	460	4	17
6	Основное	1	9,5	1	1,7	2	0,9	4	490	3	11
7	Рутилово-целлюлозное	3	8,5	2	1,7	2	0,9	4	510	1	12

<sup>7</sup>ГОСТ 10052-75. Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами. Типы: Введ. 1977-01-01. М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2004. 10 с.

<sup>8</sup> СпецЭлектрод – лучший в 2023 году. Каталог сварочных электродов. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.spetselectrode.ru/catalog.html?ysclid=mm48t6089528802234>. Загл. с экрана (дата обращения: 05.11.2025).

<sup>9</sup>ГОСТ 14771-76. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры: Введ. 1977-01-01. М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2007. 39 с.

<sup>10</sup>ГОСТ Р ИСО 2553-2017. Сварка и родственные процессы. Условные обозначения на чертежах. Сварные соединения: Введ. 2017-10-01. М.: Госстандарт России: «Стандартинформ», 2017. 49 с.



**Рис. 1. Оценочный радар по выбору сварочного аппарата:**

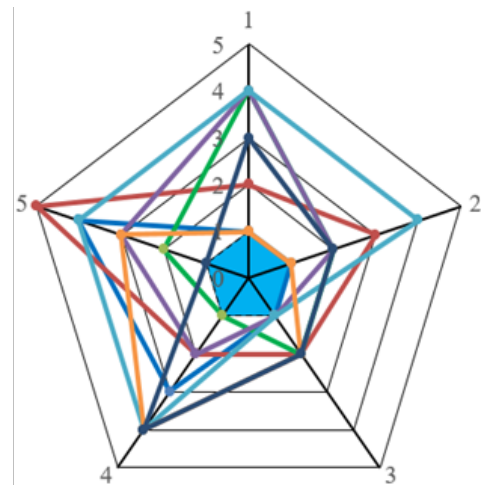
Оси 1, 2, 3, 4, 5, 6 – показатели из таблицы 1;  
 Идеал; вариант 1; вариант 2; вариант 3; вариант 4

**Fig. 1. Evaluation radar of welding machine selection:**

Axes 1, 2, 3, 4, 5, 6 – indicator from Table 1;  
 Ideal, option 1, option 2, option 3, option 4

условие – минимальная разность со средним значением 82,5 А); 3) расположения сварного шва при сварке деталей толщиной 3 мм, которое может быть двусторонним, односторонним и односторонним на съемной подкладке (критериальное условие – минимальная сложность процесса сварки в приспособлении); 4) протяженности сварного шва – сплошного или прерывистого (точечного, в шахматном порядке, цепного), определяемой условиями работы диска в абразивной среде и обеспечением запаса прочности (критериальное условие – стремление к максимальной прочности шва); 5) количества электродов, ед., отнесенных к массе, кг, наплавленного металла (критериальное условие – стремление к минимуму); 6) массы, кг, наплавленного металла, отнесенной к массе, кг, расходуемых электродов (критериальное условие – стремление к максимуму); 7) длины электрода, связанной с изменением времени сварки и его затратами на смену электрода (критериальное условие – стремление к максимуму).

На основании данных таблицы 3 выполнили графическую иллюстрацию рангов для показателей характеристик сварных швов в виде оценочного радара (рис. 3). Анализ данных таблицы 3 и рисунка 3 свидетельствует о том, что для приварки ремонтной детали к диску по сумме рангов в равной степени оптимальными являются варианты 3 и 4 (электроды диаметром 3,2 и 4,0 мм). При этом следует



**Рис. 2. Оценочный радар по выбору марки электрода:**

Оси 1, 2, 3, 4, 5 – показатели из таблицы 2;  
 Идеал; вариант 1; вариант 2; вариант 3; вариант 4; вариант 5; вариант 6; вариант 7

**Fig. 2. Evaluation radar of electrode grade selection:**

Axes 1, 2, 3, 4, 5 – indicator from Table 2;  
 Ideal, option 1, option 2, option 3, option 4, option 5, option 6, option 7

учитывать технологические особенности формирования сварных швов.

Для выбора марки материала ремонтной детали рассмотрели варианты марок сталей, применяемых для изготовления дисков сошников: 1 – 65Г ГОСТ 14959-2016; 2 – 30MnB5 EN-10083-3; 3 – 45 ГОСТ 1050-2013; 4 – 60C2A ГОСТ 14959-2016. Сравнение осуществляли по критерию прочности на основании анализа физико-механических характеристик сталей (табл. 4) [14]: 1) назначения, определяющего выбор марки стали с указанием в технических требованиях конструкторской документации (критериальное условие – стремление к максимуму механических свойств) [15, 16]; 2) твердости, определяющей износостойкость материала с учетом режима работы дисков в абразивном материале (критериальное условие – стремление к максимуму) [17, 18]; 3) предела прочности при разрыве, обеспечивающей общую прочность диска (критериальное условие – стремление к максимуму) [16, 19]; 4) относительного удлинения, по которому дается оценка способности материала испытывать остаточную деформацию при механической нагрузке – вплоть до разрушения (критериальное условие – стремление к минимуму) [16, 19]; 5) стоимости, определяющей доступность и распространенность материала, расходы на производство (критериальное условие – стремление к минимуму) [14, 18, 20]. На основании данных таблицы 4 представлена графическая иллюстрация рангов для

выбора марки материала ремонтной детали в виде оценочного радара (рис. 4).

Анализ данных (табл. 4, рис. 4) показывает, что по сумме рангов в качестве ремонтной детали в равной степени применимы 3 варианта: 1, 2 и 4 (сталь 65Г, 30MnB5 и 60C2A). Следует учесть,

что в отечественном производстве дисков сошников наиболее применима сталь 65Г, в зарубежном – сталь 30MnB5, а сталь 60C2A выступает в качестве аналога для замены. Поэтому при выборе материала на производстве следует учитывать наличие материала на складе или имеющихся остатков деловых отходов.

Таблица 3

Характеристики сварных швов

Table 3

Characteristics of welds

Вариант	Показатель 1		Показатель 2		Показатель 3		Показатель 4		Показатель 5		Показатель 6		Показатель 7		Сумма рангов
	Толщина металла, мм	Ранг	Сила тока, А	Ранг	Расположение шва	Ранг	Протяженность шва	Ранг	Количество, ед/кг	Ранг	Наплавленный металл, кг/кг	Ранг	Длина электрода, мм	Ранг	
1	2,0...3,0 / 2,5	3	60...100 / 80	1	Двухсторонний	3	Точечный	4	88	4	0,90	4	350	2	21
2	3,0...4,0 / 3,5	1	80...160 / 120	2	Двухсторонний	3	Шахматный порядок	3	62	3	1,15	3	350	2	17
3	3,0...3,2 / 3,1	2	90...170 / 130	3	Односторонний	1	Цепной	2	57	2	1,20	2	350	2	14
4	4,0...6,0 / 5,0	4	120...200 / 160	4	Односторонний на съемной накладке	2	Сплошной	1	31	1	2,00	1	450	1	14

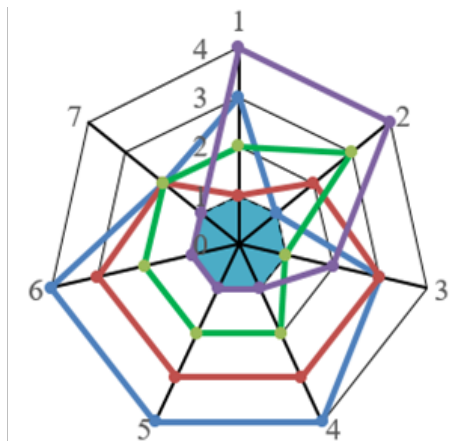
Таблица 4

Характеристики материала ремонтной детали

Table 4

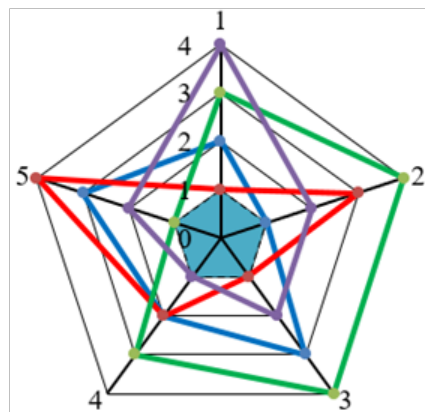
Characteristics of repair part material

Вариант	Показатель 1		Показатель 2		Показатель 3		Показатель 4		Показатель 5		Сумма рангов
	Назначение	Ранг	Твердость, НВ	Ранг	Предел прочности, МПа	Ранг	Остаточное удлинение, %	Ранг	Стоимость, тыс. руб/т	Ранг	
1	Детали с требованием повышенной износостойкости, работающие без ударных нагрузок	2	285	1	740	3	12	2	94,1	3	11
2	Детали, обладающие хорошей износостойкостью и устойчивостью к динамическим воздействиям	1	240	3	1050	1	12	2	95,2	4	11
3	Детали, работающие на трение, от которых требуется повышенная прочность	3	229	4	675	4	15	3	68,2	1	15
4	Ответственные детали, подверженные высоким нагрузкам	4	269	2	980	2	8	1	77,5	2	11



**Рис. 3. Оценочный радар по выбору диаметра электрода:**  
Оси 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – показатели из таблицы 3;  
— Идеал; — вариант 1; — вариант 2;  
— вариант 3; — вариант 4

**Fig. 3. Graphical interpretation by electrode diameter selection:**  
Axes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – indicator from Table 3;  
— Ideal, — option 1, — option 2,  
— option 3, — option 4



**Рис. 4. Оценочный радар по выбору материала ремонтной детали:**  
Оси 1, 2, 3, 4, 5 – показатели из таблицы 4;  
— Идеал; — вариант 1; — вариант 2;  
— вариант 3; — вариант 4

**Fig. 4. Evaluation radar of repair part material selection:**  
Axes 1, 2, 3, 4, 5 – indicator from Table 4;  
— Ideal, — option 1, — option 2,  
— option 3, — option 4

Обобщенная многокритериальная оценка технических средств для приварки

Таблица 5

Summary multi-criteria evaluation of welding tools

Table 5

Сварочный аппарат			Марка электрода			Диаметр электрода			Материал детали		
Вариант	Площадь, кв. ед.	$\mu_1$	Вариант	Площадь, кв. ед.	$\mu_2$	Вариант	Площадь, кв. ед.	$\mu_3$	Вариант	Площадь, кв. ед.	$\mu_4$
1	9,52	3,66	1	9,98	4,19	1	25,0	9,12	1	10,9	4,58
			2	17,1	7,18				2	9,51	4,00
2	13,9	5,35	3	11,4	4,79	2	16,8	6,13	2	9,51	4,00
			4	14,3	6,01						
3	14,7	5,65	5	26,6	11,2	3	10,6	3,87	3	21,9	9,24
			6	12,4	5,21						
4	25,5	9,81	7	11,9	5,00	4	12,9	4,7	4	11,4	4,79
Идеал	2,60	–	Идеал	2,38	–	Идеал	2,74	–	Идеал	2,38	–

С целью окончательного решения при выборе сварочного аппарата, марки электрода, диаметра электрода и материала ремонтной детали проведем многокритериальную оценку на основе обобщенного интегрального критерия расстояния до цели  $\mu$ . Для этого сведем результаты определения площадей фигур и обобщенного интегрального критерия  $\mu$ , характеризующих рассматриваемые и идеальный варианты (рис. 1-4). Результаты представлены в таблице 5.

На основании анализа данных обобщенной многокритериальной оценки (табл. 5) по выбору

технических средств для приварки ремонтной детали к диску сошника по обобщенному интегральному критерию минимального расстояния до цели отмечаем следующие результаты: 1) среди рассматриваемых сварочных аппаратов наиболее предпочтительным является аппарат ручной электродуговой сварки Кедр ВД-500.01 ( $\mu_{1min} = 3,66$ ); 2) из применяемых при приварке деталей марок электродов выбираем УОНИ-45/13 ( $\mu_{2min} = 4,19$ ); 3) среди диаметров электродов 2,5...4,0 мм предпочтительным является диаметр 3,2 мм ( $\mu_{3min} = 3,87$ ); 4) среди рассматриваемых

материалов для ремонтной детали выбираем сталь 30MnB5 ( $\mu_{4\min} = 4,00$ ).

Таким образом, при обработке технологического процесса приварки ремонтной детали к дискам сошников следует использовать выбранные технические средства.

### Выводы

1. При значительном износе дисков сошников рекомендуется их восстанавливать приваркой ремонтной детали в виде фрагментов колец, что обеспечивает возврат качественного металла из утилизации и повторное использование дисков.

2. Выбор технических средств для технологического процесса восстановления детали обоснован многокритериальной оценкой по обобщенному интегральному критерию. По технико-экономическому критерию принят сварочный

аппарат марки Кедр ВД-500.01. По технологическому критерию принят электрод марки УОНИ-13/45. По критерию характеристик сварных швов принят электрод диаметром 3,2 мм. По прочностному критерию принят материал ремонтной детали сталь 30MnB5.

3. Принятие решения о выборе технических средств основано на анализе оценочных графов и значения обобщенного критерия минимального расстояния до цели: для сварочного аппарата  $\mu_{1\min} = 3,66$ ; для марки электрода  $\mu_{2\min} = 4,19$ ; для диаметра электрода  $\mu_{3\min} = 3,87$ ; для материала ремонтной детали  $\mu_{4\min} = 4,00$ .

4. Выбранные технические средства рекомендуется вносить в маршрутно-операционные карты технологического процесса восстановления дисков сошников путем приварки ремонтной детали в виде фрагментов колец.

### Список источников

1. Черноиванов В.И. История развития ремонтной базы сельскохозяйственной техники в России // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18, № 1. С. 4-12. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-1-4-12>
2. Лялякин В.П. Развитие индустрии по восстановлению деталей для сельскохозяйственных машин в России // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18, № 2. С. 4-10. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-2-4-10>
3. Пастухов А.Г., Кравченко И.Н., Волков М.И. Исследование износа дисковых сошников сеялки СЗТ-3,6А // *Инновации в АПК: проблемы и перспективы*. 2019. № 3 (23). С. 55-68. EDN: PTHQTC
4. Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Миронова А.В. Основные направления повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17, № 1. С. 41-50. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50>
5. Пастухов А.Г., Бережная И.Ш. Методика и результаты критериальной оценки инструмента электроискрового наращивания // *Инновации в АПК: проблемы и перспективы*. 2019. № 2 (22). С. 67-78. EDN: WFELLN
6. Пастухов А.Г., Бережная И.Ш., Слободюк А.П. Выбор коррозионно-стойкой стали для изготовления литого патрубка выхлопной системы // *Инновации в АПК: проблемы и перспективы*. 2022. № 2 (34). С. 66-73. EDN: JODVJM
7. Фасхiev X.A. Метод оценки грузового автомобиля по критериям экономической эффективности, качества и конкурентоспособности с целью выбора // *Автотранспорт: эксплуатация, обслуживание и ремонт*. 2025. № 7. С. 7. EDN: SDXYU
8. Баязитов Р.Б., Фасхiev X.A. Многокритериальная оценка подвижного состава автомобильного транспорта с целью выбора // *Автомобилестроение: проектирование, конструирование, расчет и технологии ремонта и производства: Материалы V Всероссийской научно-практической конференции, г. Ижевск, 29-30 апреля 2021 г. Ижевск: Издательство УИР ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2021. С. 42-47. EDN: AUCYVB*
9. Вайцехович С.М., Власов Ю.В. Комплексная система оценки эффективности производства и потребления продукции машиностроения // *Вестник Пермского национального*

### References

1. Chernoiivanov V.I. The history of agricultural machinery repair system in Russia. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024;18(1):4-12. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-1-4-12>
2. Lyalyakin V.P. Evolution of agricultural machinery parts restoration industry in Russia. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024;18(2):4-10. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-2-4-10>
3. Pastukhov A.G., Kravchenko I.N., Volkov M.I. Study of wear of disc coulters SZT-3.6A. *Innovations in the Agricultural Complex: Problems and Perspectives*. 2019;3(23):55-68. (In Russ.)
4. Lobachevskiy Ya.P., Mironov D.A., Mironova A.V. Increasing the operating lifetime of wearable working bodies of agricultural machines. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(1):41-50. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50>
5. Pastukhov A.G., Berezhnaya I.Sh. Technique and results of criteria estimation of the electro-spiritual development tool. *Innovations in the Agricultural Complex: Problems and Perspectives*. 2019;2(22):67-78. (In Russ.)
6. Pastukhov A.G., Berezhnaya I.Sh., Slobodyuk A.P. The choice of corrosion-resistant steel for the manufacture of cast exhaust pipe. *Innovations in the Agricultural Complex: Problems and Perspectives*. 2022;2(34):66-73. (In Russ.)
7. Faskhiev Kh.A. Method of evaluating a truck according to criteria of economic efficiency, quality and competitiveness in order to choose it. *Avtotransport: ekspluatatsiya, obsluzhivanie i remont*. 2025;7. (In Russ.)
8. Bayazitov R.B., Faskhiev Kh.A. Multi-criteria assessment of the rolling stock of road transport for the purpose of its selection. *Avtomobilstroyeniye: proyektirovaniye, konstruirovaniye, raschet i tekhnologii remonta i proizvodstva: Proceedings of the V All-Russian Scientific and Practical Conference, Izhevsk, April 29-30, 2021. Izhevsk: Publishing house UIR IzhSTU named after M.T. Kalashnikov. 2021;42-47. (In Russ.)*
9. Vaytsekhovich S.M., Vlasov Yu.V. Comprehensive assessment of production efficiency and product consumption in machine building industry. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta*.

исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки. 2020. № 2. С. 146-167. <https://doi.org/10.15593/2224-9354/2020.2.12>

10. Вайцехович С.М., Власов Ю.В. Построение модели экономической эффективности производства и потребления конструкционных материалов в машиностроении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки. 2020. № 2. С. 168-194. <https://doi.org/10.15593/2224-9354/2020.2.13>. EDN: RACEPO

11. Мазунова Л.Н., Беляков В.В., Ерофеева Л.Н., Бушуева М.Е. Обзор подходов к оценке качества и подвижности автотракторной техники, основанных на методах многокритериальной оценки качества // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21, № 3. С. 170-179. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-170-179>

12. Мазунова Л.Н., Беляков В.В., Макаров В.С. и др. Сравнительный анализ методов многокритериальной оценки конкурентоспособности и подвижности автотракторной техники с учетом весовой значимости характеристик // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 1 (136). С. 125-136. [https://doi.org/10.46960/1816-210X\\_2022\\_1\\_125](https://doi.org/10.46960/1816-210X_2022_1_125). EDN: WYVBCW

13. Вольбак С.Ф., Шаповалов В.И., Пастухов А.Г. и др. Теория и практика многокритериальной оценки и выбора решений по методу расстояния до цели: Монография / Министерство сельского хозяйства Российской Федерации; ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ. Белгород: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2025. 184 с. EDN: VNABBP

14. Щербаков А.П., Пушкарев А.Е., Максимов С.Е. Замена материала рабочего органа как путь повышения надежности дорожно-строительных машин // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2021. Т. 18, № 6 (82). С. 646-661. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-646-661>

15. Михальченков А.М., Ульянова Н.Д., Феськов С.А., Гущан А.А. Механические свойства термоупрочненной стали 65Г, поверхностно-армированной наплавкой твердым сплавом // Агроинженерия. 2021. № 3 (103). С. 63-68. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-3-63-68>

16. Соболевский И.В., Турин Е.Н., Калафатов И.И. Повышение ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин с учетом почвенных условий Республики Крым // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2021. Т. 14, № 3 (70). С. 42-50. EDN: TXSLEX

17. Колосовский А.М., Рожков А.С., Ожегов Н.М., Черкасов В.Е. Упрочнение рабочих органов сельскохозяйственных машин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2023. № 6 (362). С. 43-51. EDN: JSFDIG

18. Агеева Е.В., Серебровский В.В., Семькин В.А., Кончин В.А. Оценка износостойкости плазменных покрытий лап культиваторов // Технический сервис машин. 2023. Т. 61, № 4 (153). С. 83-89. EDN: VADWMJ

19. Михальченков А.М., Феськов С.А., Козарез И.В., Слезко Е.И. Изменение микроструктуры и микротвердости стали 65Г после термоупрочнения и наплавки малоуглеродистым электродом // Технический сервис машин. 2021. № 1 (142). С. 107-114. EDN: TTZBVJ

20. Кретинин В.И., Теппоев А.В., Соколова В.А. Особенности моделирования технологического процесса упрочнения деталей лесохозяйственных машин методом газотермического напыления // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 1 (53). С. 142-148. EDN: NAAWMC

*Sotsialno-ekonomicheskiye nauki*. 2020;2:146-167. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/2224-9354/2020.2.12>

10. Vaytsekhovich S.M., Vlasov Yu.V. A model of economic efficiency of structural materials production and consumption in machine building industry. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Sotsialno-ekonomicheskiye nauki*. 2020;2:168-194. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/2224-9354/2020.2.13>

11. Mazunova L.N., Belyakov V.V., Erofeeva L.N., Bushueva M.E. Overview of approaches to assessing the quality and mobility of automotive vehicles and tractors based on multi-criteria quality assessment methods. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2023;21;3:170-179. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-170-179>

12. Mazunova L.N., Belyakov V.V., Makarov V.S. et al. Comparative analysis of methods of multi-criteria assessment of competitiveness and mobility of automotive equipment, taking into account the weight significance of characteristics. *Trudy NGTU imeni R.E. Alekseeva*. 2022;1(136):125-136. (In Russ.) [https://doi.org/10.46960/1816-210X\\_2022\\_1\\_125](https://doi.org/10.46960/1816-210X_2022_1_125)

13. Volvak S.F., Shapovalov V.I., Pastukhov A.G. et al. Theory and practice of multi-criteria evaluation and decision selection using the distance-to-target method: Monograph. Ministry of Agriculture of the Russian Federation; Belgorod State Agricultural University. Belgorod: Belgorod State Agricultural University, 2025. 184 p.

14. Scherbakov A.P., Pushkarev A.E., Maksimov S.E. Replacement working body material as a way to increase reliability of road construction machines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021;18(6):646-661. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-646-661>

15. Mikhailchenkov A.M., Ulyanova N.D., Feskov S.A., Gutsan A.A. Mechanical properties of heat-strengthened steel 65G, surface-reinforced hard alloy surfacing. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2021;3:63-68. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-3-63-68>

16. Sobolevskiy I.V., Turin E.N., Kalafatov I.I. Resource increasing of the working bodies of tillage machinery with consideration to the soil conditions of the Republic of Crimea. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2021;14;(3):42-50. (In Russ.)

17. Kolosovskii A.M., Rozhkov A.S., Ozhegov N.M., Cherkasov V.E. The hardening of agricultural machines working bodies. *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. 2023;6:43-51. (In Russ.)

18. Ageeva E.V., Serebrovsky V.V., Semykin V.A., Konchin V.A. Evaluation of wear resistance of plasma coatings of cultivators' paws. *Machinery Technical Service*. 2023;61(4):83-89. (In Russ.)

19. Mikhal'chenkov A.M., Fes'kov S.A., Kozarez I.V., Slezko E.I. Changes in the microstructure and microhardness of 65g steel after thermal hardening and surfacing with a low-carbon electrode. *Machinery Technical Service*. 2021;1:107-114. (In Russ.)

20. Kretinin V.I., Teppoev A.V., Sokolova V.A. Peculiarities of modeling the technological process of hardening the details of forestry machines by gas-thermal spraying method. *Systems. Methods. Technologies*. 2022;1:142-148. (In Russ.)

**Информация об авторах**

- <sup>1</sup> **Ерохин Михаил Никитьевич**, д-р техн. наук, профессор, академик РАН; er.mihn@mail.ru; SPIN-код: 3499-4405, <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>
- <sup>2</sup> **Пастухов Александр Геннадиевич**, д-р техн. наук, профессор; pastukhov\_ag@mail.ru<sup>✉</sup>; SPIN-код: 3891-3927; <https://orcid.org/0000-0001-8249-8970>
- <sup>3</sup> **Тимашов Евгений Петрович**, д-р техн. наук, доцент; timachov@mail.ru; SPIN-код: 8763-5343; <https://orcid.org/0000-0003-0740-8714>
- <sup>4</sup> **Казанцев Сергей Павлович**, д-р техн. наук, профессор; kazansev@rgau-msha.ru; SPIN-код: 4175-7998; <https://orcid.org/0000-0002-7158-1709>
- <sup>5</sup> **Вольвак Сергей Федорович**, канд. техн. наук, профессор; volvak.s@yandex.ru; SPIN-код: 7701-7068; <https://orcid.org/0000-0002-6955-7144>
- <sup>6</sup> **Волков Михаил Иванович**, инженер-конструктор; volkov.mikhail2017@yandex.ru; SPIN-код: 6573-0950; <https://orcid.org/0009-0009-0267-5224>
- <sup>1,4</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Россия, 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49
- <sup>2,3,5</sup> Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина; 308503, Россия, Белгородская обл., Белгородский р-н, п. Майский, ул. Вавилова, 1
- <sup>6</sup> ЗАО «Сокол-АТС»; 308023, Россия, г. Белгород, Богдана Хмельницкого просп., 137

**Вклад авторов**

М.Н. Ерохин – общее руководство исследованиями;  
 А.Г. Пастухов – концептуализация и методология, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование;  
 Е.П. Тимашов – обзор технических средств, создание и редактирование рабочей рукописи;  
 С.П. Казанцев – обзор источников литературы и администрирование данных;  
 С.Ф. Вольвак – методология и проведение исследований, формирование рабочей рукописи;  
 М.И. Волков – проведение исследований.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 04.02.2026, после рецензирования и доработки 05.03.2026, принята к публикации 26.03.2026

**Author Information**

- Mikhail N. Erokhin**<sup>1</sup>, Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor; er.mihn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>
- Alexander G. Pastukhov**<sup>2✉</sup>, DSc (Eng), Professor; pastukhov\_ag@mail.ru<sup>✉</sup>; <https://orcid.org/0000-0001-8249-8970>
- Evgeny P. Timashov**<sup>3</sup>, DSc (Eng), Associate Professor; timachov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0740-8714>
- Sergey P. Kazantsev**<sup>4</sup>, DSc (Eng), Professor; kazansev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7158-1709>
- Sergey F. Volvak**<sup>5</sup>, CSc (Eng), Professor; volvak.s@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6955-7144>
- Mikhail I. Volkov**<sup>6</sup>, design engineer; volkov.mikhail2017@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0009-0267-5224>
- <sup>1,4</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow 127434, Russian Federation
- <sup>2,3,5</sup> Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin; 1 Vavilova Str., Maysky, Belgorod Region, 308503, Russian Federation
- <sup>6</sup> Sokol-ATS ZAO; 137 B. Khmel'nitskogo Str., Belgorod, 308023, Russian Federation

**Author Contributions**

M.N. Erokhin – research supervision;  
 A.G. Pastukhov – conceptualization; methodology; writing – review and editing of the manuscript;  
 E.P. Timashov – resources; writing – original draft, review and editing of the manuscript;  
 S.P. Kazantsev – literature review; data curation;  
 S.F. Volvak – methodology; investigation; writing – original draft;  
 M.I. Volkov – investigation.

**Conflict of interests**

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

Received 04.02.2026; Revised 05.03.2026; Accepted 26.03.2026

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.363

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-67-76>

## Применение аддитивных технологий при изготовлении ножей смесителей-кормораздатчиков

*Д.М. Скороходов*

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

[d.skorokhodov@rgau-msha.ru](mailto:d.skorokhodov@rgau-msha.ru); <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>

**Аннотация.** Импортозамещение запасных частей сельскохозяйственных машин и оборудования в условиях импортозависимости является актуальной задачей. Аддитивные технологии позволяют создать ножи с заданными физико-механическими свойствами, адаптированными к условиям эксплуатации. Цель исследований – используя аддитивные технологии, разработать нож смесителя-кормораздатчика с обоснованием геометрических параметров посадки соединяемых элементов ножа. Исследовали квадратные и звездообразные ножи, применяемые в горизонтальных смесителях-кормораздатчиках KUNN и Seko. Предложена конструкция сборного ножа смесителя-кормораздатчика. Режущие части его изготовлены методом SLM-печати из стали 17-4PH и 316L, а фланец – методом FDM-печати из инженерного термопласта REC X-Line ForMAX на основе ABS с добавлением 15% углеродных волокон. Прочность соединения сборного ножа подтверждена имитационным моделированием в программе SolidWorks. Установлено критическое значение натяга – не более 0,16 мм. Экспериментально подтверждено высокое качество аддитивного производства. Твердость стали 17-4PH составила 51,4 HRC, что на 15% ниже уровня эталонной серийной стали 9XC, полученной объемной закалкой (60,4 HRC). Твердость фланца 86,7 ед. по Шору свидетельствует об оптимальных режимах FDM-печати. Сталь 17-4PH с оптимальным сочетанием износостойкости и коррозионной стойкости рекомендуется для изготовления модифицированных ножей методом 3D-прототипирования. Повысить долговечность ножей можно заданием определенных физико-механических свойств печатающему материалу с дальнейшим поверхностным упрочнением методом сверхвысокочастотного индукционного нагрева в борсодержащих обмазках, обеспечивающего формирование износостойких слоев глубиной до 1,2 мм с повышенной твердостью. Практическая реализация разработанного сборного ножа смесителя-кормораздатчика позволит оперативно заменять изношенные ножи при отсутствии оригинальных запасных частей, исключая простои техники и снижая импортозависимость.

**Ключевые слова:** импортозамещение запасных частей; аддитивные технологии; нож; изношенные ножи; нож смесителя-кормораздатчика; долговечность ножей; простои техники

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках проекта по созданию и развитию инжинирингового центра РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (соглашение № 075-15-2025-543 от 16 июня 2025 г.).

**Для цитирования:** Скороходов Д.М. Применение аддитивных технологий при изготовлении ножей смесителей-кормораздатчиков // *Агроинженерия*. 2026. Т. 28, № 2. С. 67-76. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-67-76>

## ORIGINAL ARTICLE

## Application of innovative technologies in the production of knives for feed mixers and dispensers

*D.M. Skorokhodov*

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

[d.skorokhodov@rgau-msha.ru](mailto:d.skorokhodov@rgau-msha.ru); <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>; Scopus Author ID: 57223623999

**Abstract.** Against the backdrop of the dependence on imports, import substitution of spare parts for agricultural machinery and equipment is a pressing issue. The use of additive technologies opens up new prospects for designing working parts with specified physical and mechanical properties adapted to specific operating conditions. The study aims to develop knives for feed mixers based on innovative technologies for the

modernization of agricultural machinery, based on the substantiation of the geometric parameters of the knife's connecting elements. The objects of study were square and star-shaped knives used in KUHN and Seko horizontal feed mixers. The author proposes a design for a prefabricated (modular) knife for a feed mixer and dispenser. The cutting parts of the experimental knives are manufactured using SLM printing from 17-4PH and 316L steels, and the flange is manufactured using FDM printing from ABS-based engineering thermoplastic reinforced with 15% carbon fibers (REC X-Line ForMAX). The feasibility of achieving an interference-fit connection on semi-circular splines, secured by a flange collar, was theoretically substantiated and confirmed using simulation modeling. The critical interference fit value was determined to be less than 0.16 mm. The high quality of additive manufacturing was experimentally confirmed. The hardness of 17-4PH steel reached 51.4 HRC, approaching the level of serial 9XC steel (60.4 HRC); the flange hardness was 86.7 Shore D, indicating optimal FDM printing conditions. Steel 17-4PH is the optimal material for manufacturing modified knives using 3D prototyping, providing the best combination of wear and corrosion resistance. The durability of knives can be further increased by using SLM printing to impart specific physical and mechanical properties to the printing material, followed by surface hardening using ultra-high-frequency induction heating in boron-containing coatings. This method produces wear-resistant layers up to 1.2 mm deep and with increased hardness. The practical implementation of the developed prefabricated feed mixer knife will enable the rapid production of worn knives in the absence of original spare parts, thus eliminating equipment downtime and reducing reliance on imports.

**Keywords:** import substitution of spare parts; additive technologies; knife; worn knives; knife of a feed mixer-dispenser; knife durability; equipment downtime

**Acknowledgments.** The study was performed as part of the project aimed at establishing and developing the Engineering Center of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Agreement No. 075-15-2025-543 of June 16, 2025).

**For citation:** Skorokhodov D.M. Application of innovative technologies in the production of knives for feed mixers and dispensers. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(2):67-76 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-67-76>

## Введение

Полнорационное и сбалансированное кормление животных способствует росту их продуктивности и получению высококачественных продуктов питания [1]. В структуре себестоимости продукции животноводства 50...70% всех затрат приходится на корма [2]. Равномерность смешивания компонентов корма зависит от конструкционных особенностей смесителей и режимов их работы [3]. Комбинированный рабочий орган (шнек, интегрированный ножами) позволяет достичь необходимой степени измельчения корма непосредственно в процессе смешивания, что является важным условием его сбалансированности, однородности, и как следствие – полнорационного кормления.

Оборудование животноводческих ферм и комплексов является импортным почти на 95% [4]. В животноводстве для приготовления полнорационного корма широко используются импортные смесители-кормораздатчики фирм Trioliet Solomix (Нидерланды), KUHN (Франция), DeLaval (Швеция), Selikel (Турция), Strautmann (Германия) и др. Рабочие органы тоже являются импортными. Цельнометаллические режущие элементы (ножи) преимущественно изготавливаются традиционными методами – ковкой

и штамповкой. Высокая стоимость рабочих органов и ограничение поставок оригинальных запасных частей в санкционных условиях сформировали их острый дефицит, в том числе расходных элементов (ножей).

Импортозамещение запасных частей рабочих органов отечественными, обладающими высокой износостойкостью и работоспособностью, требует разработки новых материалов и технологий [4].

Перспективным направлением модернизации сельскохозяйственной техники и решением проблемы импортозамещения запасных частей является применение аддитивных технологий и 3D-сканирования [5, 6], позволяющих перейти от стандартных способов изготовления деталей к инновационным – с заданными физико-механическими свойствами материала со сложной внутренней структурой. Аддитивные технологии открывают возможность перехода от монолитных конструкций к инновационным сборным решениям.

Текущая импортозависимость формирует актуальную научно-техническую задачу по разработке материалов и эффективных упрочняющих технологий для конкурентоспособных отечественных рабочих органов кормосмесителей.

**Цель исследований:** используя аддитивные технологии, разработать ножи смесителей-кормораздатчиков с обоснованием геометрических параметров посадки соединяемых элементов ножа.

### Материалы и методы

Объектом исследований являются квадратные и звездообразные ножи (рис. 1), применяемые в горизонтальных смесителях-кормораздатчиках KUHN и Seko.

Для изготовления режущей кромки экспериментальных ножей сборной конструкции использовали коррозионностойкую нержавеющую сталь

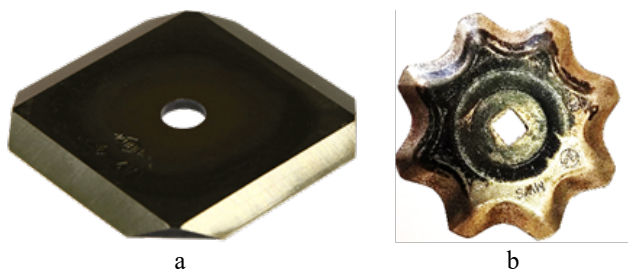
марок 17-4PH и 316L. Режущая часть ножа изготовлена методом SLM-печати (Selective Laser Melting) на установке SLM-280HL в атмосфере аргона. В SLM-технологии металлический порошок расплавляется лазерным лучом высокой мощности. Фланец ножа изготовлен FDM-методом (Fused Deposition Modeling) на 3D-принтере Uti Steel 2 путем послойного нанесения расплавленного инженерного термопласта REC X-Line ForMAX на основе ABS с добавлением 15% углеродных волокон (рис. 2).

Методы аддитивного производства SLM и FDM применяются на начальном этапе разработки цифровой 3D-модели в CAD-системе, когда задаются технологические параметры построения детали.

Прочностные расчеты соединения с натягом сборного рабочего органа (ножа) выполнены с применением имитационного моделирования в программе SolidWorks.

Исследование на износостойкость экспериментальных ножей проводилось согласно методике ресурсных испытаний режущих элементов сельскохозяйственных машин для животноводства и кормопроизводства<sup>1</sup>.

Долговечность полученных режущих частей оценивалась на испытательном стенде, имитирующем работу горизонтального смесителя-кормораздатчика. В качестве субстрата применен мелкозернистый кварцевый песок с добавлением кислотных добавок и опилок.



**Рис. 1. Режущие элементы (ножи)**

**импортных смесителей-кормораздатчиков:**

*a* – квадратный нож смесителя-кормораздатчика Seko;

*b* – звездообразный нож

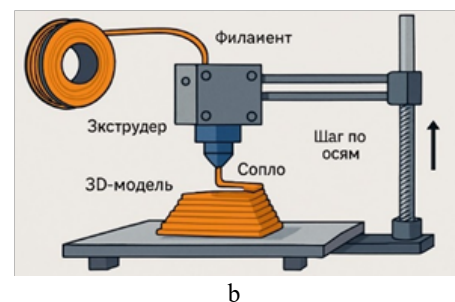
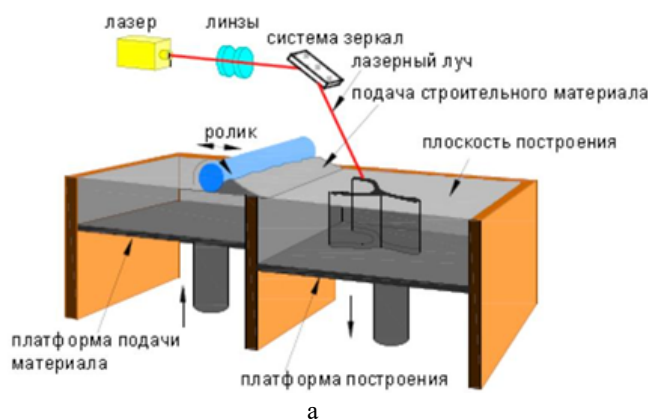
смесителя-кормораздатчика KUHN

**Fig. 1. Cutting elements (knives)**

**of imported feed mixers-and-dispensers:**

*a* – square knife of the Seko feed mixer-and-dispenser;

*b* – star-shaped knife of the KUHN feed mixer-and-dispenser



**Рис. 2. Общий вид технологических процессов аддитивного производства:**

*a* – метод Selective Laser Melting (SLM)<sup>2</sup>; *b* – метод Fused Deposition Modeling (FDM)<sup>3</sup>

**Fig. 2. General view of the technological processes of the SLM and FDM additive manufacturing methods:**

*a* – Selective Laser Melting (SLM) method; *b* – Fused Deposition Modeling (FDM) method

<sup>1</sup> Методика ресурсных испытаний режущих элементов сельскохозяйственных машин для животноводства и кормопроизводства / М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев, Д.М. Скороходов и др. М.: Российский государственный аграрный университет, 2025. 28 с. EDN: TSOVRK.

<sup>2</sup> Представленная технологическая схема регионального инжиниринга центра. Технология селективного лазерного сплавления металлических порошков (<https://www.slideserve.com/kalyca/3662124>).

<sup>3</sup> Представленная технологическая схема FDM печати ([https://meritogroup.ru/blog/technology-reviews/kak-rabotaet-fdm-pechat-ekstruziya-soplo-i-shag-po-osi/?utm\\_medium=organic&utm\\_source=yandexsmartcamera](https://meritogroup.ru/blog/technology-reviews/kak-rabotaet-fdm-pechat-ekstruziya-soplo-i-shag-po-osi/?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera)).

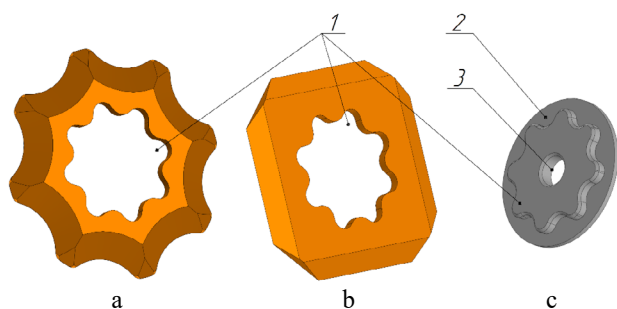
### Результаты и их обсуждение

Анализ конструктивных параметров исследуемых ножей смесителей-кормораздатчиков KUNN и Seko позволил определить их основные геометрические параметры:

- звездообразные ножи с наружным диаметром 96 мм изготовлены с 8 обоюдоострыми лучами. Заточка выполнена по составному профилю: острие ножа заточено под углом 34°, переходящим в угол заточки 24° основной режущей кромки;
- квадратные ножи габаритного размера 84 × 84 мм оснащены 4 режущими кромками с углом заточки 26°.

На основе анализа параметров ножей создана 3D-модель сборного рабочего органа (ножа)<sup>2,3</sup> для последующей печати его режущей части и фланца с применением аддитивных технологий (рис. 3).

При изготовлении режущей части ножа (рис. 3а, б) мощность лазера варьировалась в диапазоне 250...400 Вт в зависимости от зоны сканирования: заполнение основного объема ножа осуществлялось при 250 Вт, тонкие стенки режущей кромки печатали при 400 Вт. Скорость сканирования составляла



**Рис. 3. 3D-модель сборного рабочего органа (ножа) смесителя-кормораздатчика:**

- a* – режущая часть звездообразного ножа;
- b* – режущая часть квадратного ножа; *c* – фланец;
- 1* – шлицевое соединение с полукруглым профилем;
- 2* – бурт; *3* – технологическое отверстие

**Fig. 3. 3D model of the prefabricated working element (knife) of the feed mixer-and-dispenser:**

- a* – cutting part of the star-shaped knife;
- b* – cutting part of the square knife; *c* – flange;
- 1* – splined joint with a semicircular profile;
- 2* – flange; *3* – technological hole

<sup>2</sup> Патент на полезную модель № 237124 U1 Российская Федерация, МПК А01F 29/09. Сборный режущий элемент рабочего органа горизонтальных смесителей-кормораздатчиков / М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев, Д.М. Скороходов и др.: заявл. 23.05.2025; Оpubл. 11.09.2025.

<sup>3</sup> Патент на изобретение № 2856926 С1 Российская Федерация, МПК А01F 29/06 (2006.01). Способ изготовления ножей сельскохозяйственных машин с высокой износостойкостью / М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев, Д.М. Скороходов и др.: заявл. 23.05.2025; Оpubл. 25.02.2026.

800 мм/с, толщина слоя – 30 мкм, стратегия сканирования – полосы с поворотом на 67° между слоями. После печати деталь отделялась от платформы (стола) с оставлением припуска (лазерное удаление). С помощью плоскогубцев или кусачек удалялись поддержки. Далее для снятия поверхностных напряжений, удаления остатков поддержек и придания однородной матовой поверхности проводилась пескоструйная обработка детали с последующей термообработкой: старение для стали 17-4PH, отпуск для стали 316L.

Конструктивно на фланце предусмотрены бурт 2, служащий упором для режущей части, и технологическое отверстие 3 для крепления сборного ножа к винту шнекового рабочего органа смесителя-кормораздатчика (рис. 3с). При печати фланца приняты технические параметры: температура экструдера – 270°C, температура стола – 110°C, скорость печати – 80 мм/с, заполнение – 100% с паттерном grid (сетка). После печати выполнялось охлаждение изделия и проводилась механическая зачистка от поддержек при их наличии.

Сборка рабочего органа (ножа) осуществляется посадкой с натягом режущей части (наружной стороной) на шлицевое соединение с полукруглым профилем 1 до соприкосновения с буртом 2 фланца (рис. 4). Такая схема обеспечивает передачу крутящего момента, жесткое соединение и надежную осевую фиксацию ножа в сборе со шнековым рабочим органом.

Соединение в натяг создает контактное давление *p* на поверхности сопряжения режущей части и фланца, что обеспечивает передачу нагрузки и препятствует взаимному смещению.

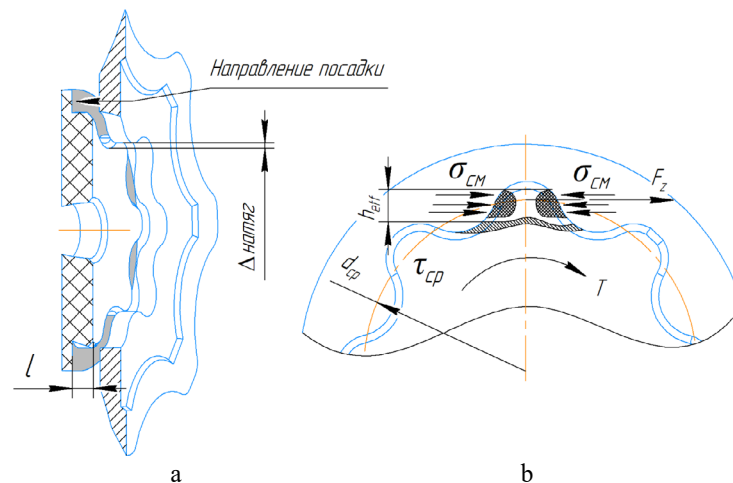
Давление (*p*, МПа) на посадочной поверхности, создаваемое натягом Δ, можно определить по формуле Ламе<sup>4</sup>:

$$\Delta = p \cdot d_{cp} \cdot \left( \frac{C_1}{E_M} + \frac{C_2}{E_{Пл}} \right) \cdot 10^3. \quad (1)$$

$$\text{Выражаем } p = \frac{\Delta}{d_{cp} \cdot \left( \frac{C_1}{E_M} + \frac{C_2}{E_{Пл}} \right) \cdot 10^3},$$

где Δ – расчетный (эффективный) натяг, мкм; *C*<sub>1</sub> и *C*<sub>2</sub> – коэффициенты жесткости для металлической режущей части и пластикового фланца ножа соответственно; *E*<sub>М</sub> и *E*<sub>Пл</sub> – модули упругости металла и пластика, МПа.

<sup>4</sup> Ерохин М.Н., Карп А.В., Соболев Е.И. и др. Детали машин и основы конструирования: Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по агроинженерным специальностям. М.: КолосС, 2005. 462 с. EDN: YOMANN.



**Рис. 4. Общий вид посадки с натягом ножа на шлицевое соединение:**

*a* – схема посадки с натягом фланца и режущей части; *b* – напряжения, действующие на один шлиц фланца;  $F_z$  – нагрузка на один шлиц, Н;  $d_{cp}$  – средний делительный диаметр по шлицам с полукруглым профилем, мм;  $l$  – глубина посадки поверхности режущей части на фланец, мм;  $\sigma_{см}$  – напряжение смятия пластика, МПа;  $\tau_{ср}$  – напряжения среза пластика МПа;  $h_{eff}$  – эффективная рабочая высота шлица, мм

**Fig. 4. General view of the interference fit of the cutting part (outer side) on the spline connection:**

*a* – diagram of the interference fit of the flange and the cutting part; *b* – acting stresses on one flange spline;  $F_z$  – load on one spline, N;  $d_{cp}$  – average pitch diameter along the splines with a semicircular profile, mm;  $l$  – fit depth of the cutting part surface on the flange, mm;  $\sigma_{см}$  – crushing stress of plastic, МПа;  $\tau_{ср}$  – shear stress of plastic, МПа;  $h_{eff}$  – effective working height of the spline, mm

Коэффициент жесткости для металлической режущей части  $C_1$  инновационного ножа –

$$C_1 = \frac{1 + q_M^2}{1 - q_M^2} + \mu_M, \quad (2)$$

где  $q_M = d / D_M$ ;  $D_M$  – наружный диаметр режущей части ножа, мм;  $\mu_M$  – коэффициент Пуассона (для стали ~0,3).

Коэффициент жесткости для пластикового фланца  $C_2$  ножа:

$$C_2 = \frac{1 + q_{пл}^2}{1 - q_{пл}^2} - \mu_{пл}, \quad (3)$$

где  $q_{пл} = d_{внут} / d_{ср}$ ;  $d_{внут}$  – внутренний диаметр фланца, мм;  $\mu_{пл}$  – коэффициент Пуассона (для пластика ~0,35...0,4).

Соединение должно выдерживать осевую силу  $N$  и крутящий момент  $T$ .

Условие против осевого сдвига имеет выражение:

$$p \cdot \pi \cdot d_{ср} \cdot l \cdot \gamma_1 \geq N, \quad (4)$$

где  $\gamma_1$  – коэффициент трения при сдвиге в осевом направлении.

Условие против проворачивания:

$$p \cdot \frac{\pi \cdot d_{ср}^2 \cdot l}{2} \cdot \gamma_2 \geq T, \quad (5)$$

где  $\gamma_2$  – коэффициент трения при сдвиге в окружном направлении.

В рассматриваемом случае натяг определяется в основном сжатием пластика. Исходя из этого

расчетный натяг  $\Delta$  сборного рабочего органа (ножа) имеет следующее выражение:

$$\Delta \approx p \cdot d_{ср} \cdot \left( \frac{1 + \mu_M}{E_M} + \frac{1 - \mu_{пл}}{E_{пл}} \right) \cdot 10^3 \approx p \cdot d_{ср} \cdot \frac{1}{E_{пл}} \cdot 10^3. \quad (6)$$

Основным критерием работоспособности шлицевого соединения с полукруглым профилем является смятие боковых поверхностей шлицев.

Напряжения смятия рассчитываются для самого слабого материала (пластика) по формуле<sup>5</sup>:

$$\sigma_{см} \approx \frac{2T}{d_{ср} \cdot z \cdot h_{eff} \cdot l} \leq [\sigma_{см}], \quad (7)$$

где  $T$  – крутящий момент, передаваемый шнековым рабочим органом, Н·м;  $d_{ср}$  – средний делительный диаметр, мм;  $z$  – количество шлицев, шт.;  $h_{eff}$  – эффективная рабочая высота шлица, мм;  $l$  – длина сопряжения (глубина, на которую шлиц входит в паз), мм;  $[\sigma_{см}]$  – допускаемые напряжения смятия пластика, МПа.

Дополнительно выполняется при необходимости расчет на срез условного сечения у основания шлица по формуле:

$$\tau_{ср} \approx \frac{2T}{d_{ср} \cdot z \cdot h_{eff} \cdot l} \leq [\tau_{ср}], \quad (8)$$

где  $[\tau_{ср}]$  – допускаемые напряжения среза, для пластика  $[\tau_{ср}] = (0,5 \dots 0,7) \sigma_{см}$  МПа.

<sup>5</sup>Ерохин М.Н., Казанцев С.П. Детали машин. М.: ТРАНСЛОГ, 2018. 410 с. EDN: YKZILJ

С учетом условия против проворачивания (5) определено необходимое количество ( $z = 8$ ) шлицев с полукруглым профилем для рассматриваемого рабочего органа (ножа). Такое количество позволяет равномерно распределить контактную нагрузку между шлицами, предотвращая концентрацию напряжений и локальную пластическую деформацию материала фланца.

Прочностной расчет соединения в натяг, выполненный с учетом упругопластических свойств материалов, позволил определить критическое значение натяга. Анализируя зависимости максимальных напряжений в деталях от величины натяга (рис. 5), можно заключить, что для предотвращения пластической деформации фланца натяг не должен превышать 0,16 мм.

Имитационное моделирование напряжений для натяга 0,15 мм (рис. 6) позволило определить критические зоны деталей сборки. На фланце это зона боковых поверхностей шлицев.

Таким образом, подтверждается, что расчетным критерием на работоспособность является расчет на смятие, а полученное значение  $\sigma_{max} = 75,4$  МПа находится в пределах допуска для исследуемого материала с учетом запаса прочности. При посадке с натягом режущей части наружной стороной до упора в бурт фланца на режущей части возникают напряжения по наружному диаметру шлицев, составляя  $\sigma_{max} = 599$  МПа. Данное значение намного ниже предела текучести стали 17-4PH, что гарантирует ее упругую работу и отсутствие остаточных

деформаций. Оптимальный натяг 0,12...0,15 мм обеспечивает формирование надежного прессового соединения.

Изготовление экспериментальных образцов при помощи аддитивных технологий позволило сохранить геометрию острия и угол заточки неизменными. Общий вид ножей в сборе представлен на рисунке 7.

Твердость стали марок 17-4PH и 316L, полученных аддитивным способом, сравнили с эталонным образцом 9XC (рис. 8).

Твердость эталонного образца из стали 9XC, полученной объемной закалкой, больше на 15% твердости стали 17-4PH после термической обработки при температуре 900°F и в 1,82 раза выше, чем у стали 316L (рис. 8). Полученные результаты подтверждают, что аддитивная сталь близка к традиционному инструментальному материалу. Полученное значение твердости стали 316L является характерным для данного класса материалов, однако эта сталь обладает хорошей коррозионной стойкостью.

Твердость фланца из пластика REC X-Line FORMAX 87,6 ед. по Шору D свидетельствует о том, что выбранные параметры FDM-печати обеспечили формирование образца с высокими показателями твердости.

Результаты исследований микроструктуры образцов стали, изготовленных методом аддитивных технологий при различных режимах печати [7, 8], показывают, что на свойства микроструктуры стали значительно влияют мощность лазера, скорость сканирования и толщина слоя.

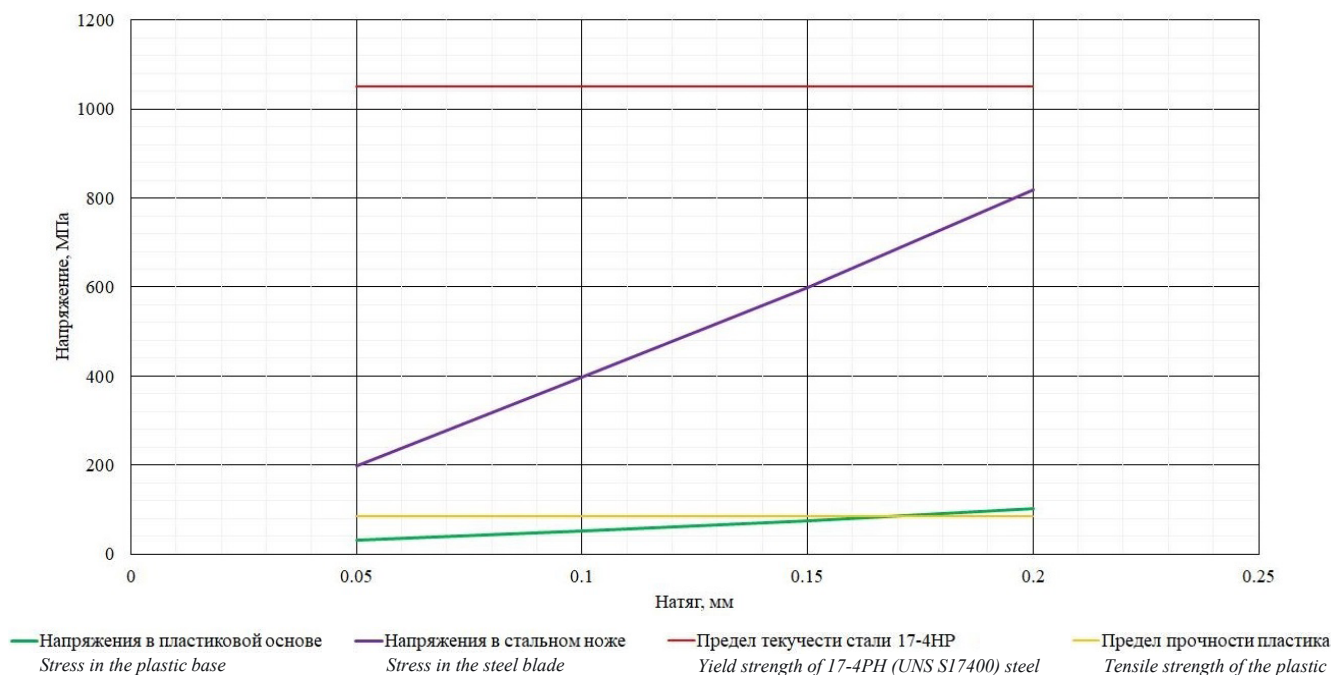
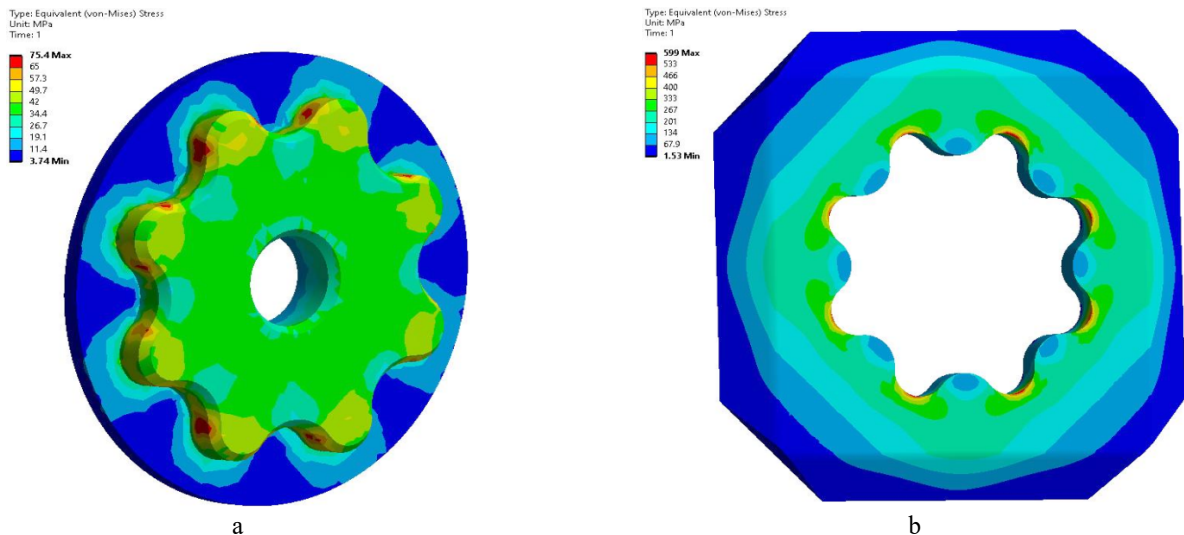


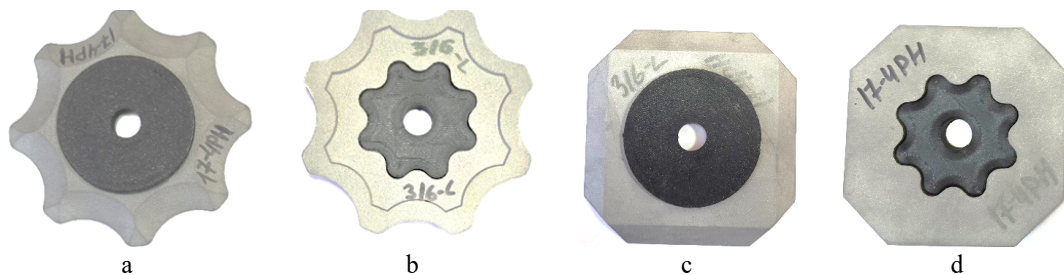
Рис. 5. Зависимость максимальных напряжений исследуемых деталей от натяга

Fig. 5. Relationship between maximum stresses of the studied parts and interference



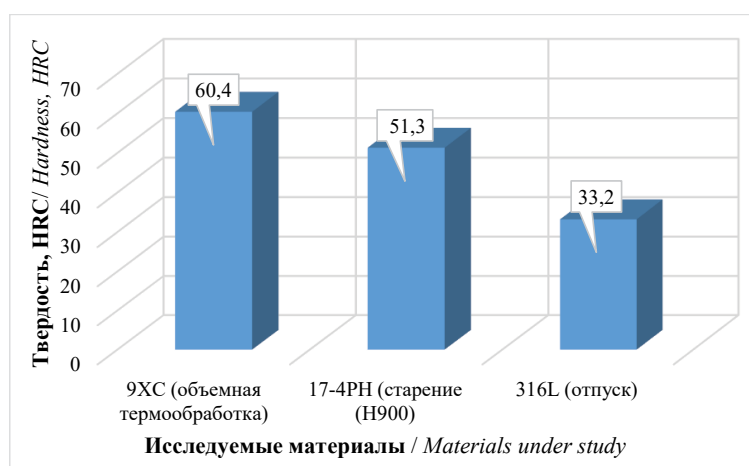
**Рис. 6. Результаты имитационного моделирования напряжений для натяга 0,15 мм:**  
*a* – на фланце (материал REC X-Line ForMAX); *b* – на режущей части (сталь 17-4PH)

**Fig. 6. Stress simulation results for an interference fit of 0.15 mm:**  
*a* – on the flange (REC X-Line ForMAX material); *b* – on the cutting part (17-4PH steel)



**Рис. 7. Общий вид экспериментальных образцов (ножей) в сборе:**  
*a* – звездообразный нож из стали 17-4PH (вид спереди); *b* – звездообразный нож из стали 316L (вид сзади);  
*c* – квадратный нож из стали 316L (вид спереди); *d* – звездообразный нож из стали 17-4PH (вид сзади)

**Fig. 7. General view of the experimental samples (knives) in assembly:**  
*a* – star-shaped knife made of 17-4PH steel (front view); *b* – star-shaped knife made of 316L steel (rear view);  
*c* – square knife made of 316L steel (front view); *d* – star-shaped knife made of 17-4PH steel (rear view)



**Рис. 8. Сравнение твердости исследуемых образцов стали 17-4PH и 316L с эталоном 9XC**

**Fig. 8. Hardness comparison of the studied 17-4PH and 316L steel samples with the 9XC**

Добавка бора и карбидообразующих элементов в небольших количествах способствует значительно-му повышению прочностных характеристик стали [9].

Полученные данные свидетельствуют о том, что механические свойства стали, изготовленной методом аддитивных технологий, могут быть значительно

улучшены добавлением бора. Соответственно при производстве деталей появляется возможность формировать заданные физико-механические свойства материала от конкретных условий эксплуатации. Микротвердость боридных покрытий на сталях, полученных с использованием различных составов борировующих смесей, рассмотрена в работе [10].

Результаты исследований износа режущих частей ножей представлены на рисунке 9.

В условиях абразивно-коррозионного воздействия наибольшую износостойкость сохраняет сталь 9ХС: ее массовый износ за 40 ч испытаний составил 6 г. Сталь 17-4РН продемонстрировала износ, который на 10% выше эталонного образца. Наименьшую износостойкость продемонстрировала сталь 316L, что в 1,35 раза выше, чем у стали 9ХС.

Таким образом, коррозионностойкая сталь 17-4РН с меньшей массой и отсутствием хрупкого разрушения, имеющая износостойкость 90% относительно эталона, является весьма перспективной для дальнейших исследований.

Помимо количественной оценки потери массы, проведен визуальный и микроскопический контроль состояния поверхности ножа и режущих кромок. Явные следы коррозионного поражения наблюдались на поверхности ножа из стали 9ХС уже при 20 ч наработки. Коррозионные следы на стали 17-4РН и 316L отсутствовали. Поскольку продукты коррозии легко сдираются абразивной средой, обнажая свежий металл, который вновь подвергается коррозии, то необходимо провести производственные испытания и выявить наиболее эффективный способ повышения износостойкости.

Результатом предложенного решения является возможность замены изношенной режущей части ножа

новой, изготовленной из высокопрочных материалов методом 3D-прототипирования металла, при повторном использовании фланца. Данное технологическое решение позволит своевременно заменять изношенные рабочие органы (ножи) новыми при отсутствии запасных частей на складах сельскохозяйственных предприятий, тем самым исключая простои смесителей-кормораздатчиков. При этом долговечность новых сборных ножей может быть выше, чем у оригинальных ножей, за счет подбора материала с заданными физико-механическими свойствами при печати в зависимости от условий эксплуатации и сезонного периода использования смесителей-кормораздатчиков, а также за счет современных упрочняющих технологий [11, 12, 13].

Стоимость изготовления режущей части методом SLM-печати складывается из затрат на металлический порошок, электроэнергию, амортизацию оборудования и постобработку. При единичном производстве стоимость может превышать цену серийного аналога, однако удельные затраты на единицу наработки могут сократиться на 20...30% по сравнению с использованием оригинальных ножей. Кроме того, оперативное изготовление ножей «по требованию» исключает простои техники в ожидании поставки оригинальных запасных частей, что дает дополнительный экономический эффект, особенно в условиях санкционных ограничений.

Для повышения износостойкости режущей части сборного рабочего органа следует рассмотреть возможность упрочнения ее рабочей поверхности с применением метода сверхвысокочастотного индукционного нагрева в борсодержащих обмазках. Данный метод позволит нагревать исключительно поверхностный слой упрочняемого ножа на небольшую глубину (до 1,2 мм), тем самым исключая коробление детали.

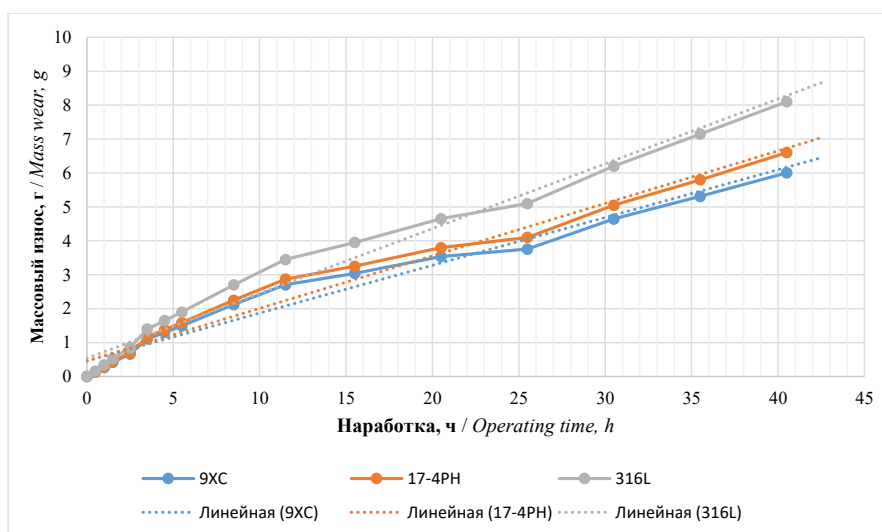


Рис. 9. Кривые износа исследуемой стали  
Fig. 9. Wear curves of the studied steel grades

## Выводы

1. Конструкция сборного ножа горизонтальных смесителей-кормораздатчиков состоит из режущей кромки (SLM-печать, износостойкая и коррозионностойкая сталь) и фланца (FDM-печать, инженерный пластик), соединяемых посадкой с натягом на шлицы полукруглого профиля с фиксацией до упора в бурт. Натяг 0,12...0,15 мм и 8 шлицев обеспечивают формирование надежного прессионого соединения, при котором пластиковый фланец остается в области упругих деформаций, а металлическая кромка имеет значительный запас прочности.

2. Экспериментально подтверждено высокое качество аддитивного производства. Твердость стали 17-4PH составила 51,4 HRC, что приближается к уровню эталонной стали 9XC (60,4 HRC); твердость фланца составила 86,7 ед. по Шору D, что свидетельствует об оптимальных режимах FDM-печати.

3. Сталь 17-4PH, обеспечивая наилучшее сочетание износостойкости и коррозионной стойкости, является оптимальным материалом для изготовления модифицированных ножей методом 3D-прототипирования.

4. Повысить долговечность ножей можно, задавая определенные физико-механические свойства печатающему материалу при SLM-печати и формируя износостойкие слои глубиной до 1,2 мм с повышенной твердостью поверхностным упрочнением методом сверхвысокочастотного индукционного нагрева в борсодержажщих обмазках.

5. Практическая реализация разработанного сборного ножа смесителя-кормораздатчика позволит оперативно заменять изношенные ножи при отсутствии оригинальных запасных частей, исключая простои техники и снижая импортозависимость.

## Список источников

1. Кудрин М.Р., Кислякова Е.М. Полноценное кормление – основа высокой молочной продуктивности коров // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана. 2015. Т. 223, № 3. С. 96-101. EDN: UIWYSH
2. Babajanyan A., Pakhomov V., Rudoy D. et al. The results of the study of the amino acid composition of compound feeds during the extrusion of wheat grain with the addition of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens* L.). E3S Web of Conferences: International Scientific Conference «Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East» (AFE-2022). 2023;371(10):01074. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337101074>
3. Овечкина Л.Ю., Бузоверов С.Ю., Лобанов В.И. Повышение эффективности процесса смешивания комбикормов путем модернизации рабочего органа смесителя // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2021. № 4-1 (55). С. 75-78. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2021-4-1-75-78>
4. Ерохин М.Н., Гайдар С.М., Скороходов Д.М. и др. Износостойкость низколегированных сталей в абразивной среде // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 3. С. 72-78. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-72-78>
5. Сенин П.В., Чаткин М.Н., Кильмяшкин Е.А. Аддитивные технологии для производства и ремонта сельскохозяйственной техники // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 4. С. 584-596. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.584-596>. EDN: JHHJG
6. Катаев Ю.В., Гончарова Ю.А., Свиридов А.С., Тузиллин С.П. Применение технологий 3D-печати и 3D-сканирования при изготовлении и ремонте сельскохозяйственной техники // Техника и оборудование для села. 2023. № 1 (307). С. 34-38. EDN: YLNGXU
7. Bakhtiar M., Omidvar H., Mashhuriazar A. et al. The effects of SLM process parameters on the relative density and hardness of austenitic stainless steel 316L. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024;29:1616-1629. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.237>
8. Murr L.E., Martinez E., Hernandez J. et al. Microstructures and properties of 17-4 PH stainless steel

## References

1. Kudrin M.R., Kislyakova E.M. Substantial feeding is the basis of cows high milk productivity. *Uchenyye zapiski Kazanskoy akademii veterinarnoy meditsiny im. N.E. Baumana*. 2015;223(3):96-101. (In Russ.)
2. Babajanyan A., Pakhomov V., Rudoy D., Braginet S., Maltseva T. The results of the study of the amino acid composition of compound feeds during the extrusion of wheat grain with the addition of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens* L.). *E3S Web of Conferences: International Scientific Conference "Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East" (AFE-2022)*. 2023;371:01074. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337101074>
3. Ovechkina L.Yu., Buzoverov S.Yu., Lobanov V.I. Improving the efficiency of the feed mixing process by upgrading the mixer working body. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2021;4-1:75-78. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2021-4-1-75-78>
4. Erokhin M.N., Gaidar S.M., Skorokhodov D.M. et al. Wear resistance of low-alloy steels in the abrasive environment. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(3):72-78. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-72-78>
5. Senin P.V., Chatkin M.N., Kilmyashkin E.A. Additive technologies for production and repair of agricultural equipment. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(4):584-596. (In Russ.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.584-596>
6. Kataev Yu.V., Goncharova Yu.A., Sviridov A.S., Tuzhilin S.P. Application of 3D printing and 3D scanning technologies in the manufacture and repair of agricultural machinery. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;1(307):34-38. (In Russ.)
7. Bakhtiar M., Omidvar H., Mashhuriazar A. et al. The effects of SLM process parameters on the relative density and hardness of austenitic stainless steel 316L. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024;29:1616-1629. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.237>
8. Murr L.E., Martinez E., Hernandez J. et al. Microstructures and properties of 17-4 PH stainless steel fabricated by selective laser melting. *Journal of Materials Research and Technology*. 2012;1(3):167-177. [https://doi.org/10.1016/S2238-7854\(12\)70029-7](https://doi.org/10.1016/S2238-7854(12)70029-7)

fabricated by selective laser melting. *Journal of Materials Research and Technology*. 2012;1(3):167-177. [https://doi.org/10.1016/S2238-7854\(12\)70029-7](https://doi.org/10.1016/S2238-7854(12)70029-7)

9. Zheng Q., Chen H.S., Zhou J. et al. Effect of boron element on microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel manufactured by selective laser melting. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;26:3744-3755. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.148>

10. Скороходов Д.М., Басов С.С., Денисов В.А., Свиридов А.С. Исследование микротвердости боридных покрытий, полученных на стали 65Г из различных составов борированных смесей // Технический сервис машин. 2021. № 2 (143). С. 144-150. EDN: DEJMUF

11. Чупятов Н.Н. Применение карбидосодержащих материалов, полученных из газовой фазы, для упрочнения деталей сельскохозяйственной техники // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2016. № 1 (71). С. 29-33. EDN: VNXNNL

12. Serov A.V., Latypov R.A., Burak P.I., Serov N.V. Technological processes of the electrocontact welding of functional coatings: Part 1. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2025;2025(1):176-179. EDN: TEYQGE

13. Серов А.В., Серов Н.В., Бурак П.И. Функциональные покрытия // Электротехнология. 2020. № 11. С. 25-33. EDN: BTCIJX

#### Информация об авторе

Дмитрий Михайлович Скороходов, канд. техн. наук, доцент; Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Россия; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49; [d.skorokhodov@rgau-msha.ru](mailto:d.skorokhodov@rgau-msha.ru); <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>; Scopus Author ID: 57223623999; Researcher ID: AFH-8012-2022

Статья поступила 12.02.2026, после рецензирования и доработки 15.03.2026, принята к публикации 26.03.2026

9. Zheng Q., Chen H.S., Zhou J. et al. Effect of boron element on microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel manufactured by selective laser melting. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;26:3744-3755. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.148>

10. Skorokhodov D.M., Basov S.S., Denisov V.A., Sviridov A.S. Microhardness of boride coatings obtained on 65G steel from different compositions of borating mixtures. *Machinery Technical Service*. 2021;2:144-150. (In Russ.)

11. Chupyatov N.N. Application of carbide-containing materials obtained from the gas phase to harden farm machinery parts. *Vestnik of Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin"*. 2016;1:29-33. (In Russ.)

12. Serov A.V., Latypov R.A., Burak P.I., Serov N.V. Technological Processes of the Electrocontact Welding of Functional Coatings: Part 1. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2025;2025(1):176-179.

13. Serov A.V., Serov N.V., Burak P.I. Functional coatings. *Electrometallurgiya*. 2020;11:25-33. (In Russ.)

#### Author Information

Dmitry M. Skorokhodov, CSc (Eng), Associate Professor; Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49; [d.skorokhodov@rgau-msha.ru](mailto:d.skorokhodov@rgau-msha.ru); <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>; Scopus Author ID: 57223623999

Received 12.02.2026; Revised 15.03.2026; Accepted 26.03.2026

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.77.04

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-77-83>

## Перспективы применения технологии 3D-печати сваркой в сельском хозяйстве

*Ю.В. Катаев*<sup>1✉</sup>, *А.В. Чавдаров*<sup>2</sup><sup>1,2</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия<sup>1</sup> [ykataev@mail.ru](mailto:ykataev@mail.ru)<sup>✉</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-0832-3608><sup>2</sup> [info@firma-tom.ru](mailto:info@firma-tom.ru); <https://orcid.org/0000-0002-9825-306X>

**Аннотация.** Значительный износ металлических деталей сельскохозяйственных машин и оборудования предопределяет необходимость их восстановления наиболее рациональными и недорогими методами. Исследования проведены с целью определения наиболее перспективного и экономически выгодного способа создания и ремонта деталей сельскохозяйственных машин аддитивными технологиями. Анализ методов 3D-печати металлом по стоимости оборудования и сложности технологического процесса показывает целесообразность использования устройств для пространственной ориентации сварочной горелки при использовании широко применяемых сварочных проволок различного состава. Для сельскохозяйственных предприятий при восстановлении геометрии изношенных деталей и изготовлении новых пространственных конструкций из металла наиболее рационально использовать технологии полуавтоматической сварки. Технология DED-W/WAAM/3DMP отличается наибольшей производительностью (до 800 см<sup>3</sup>/ч) и наименьшей стоимостью среди принтеров по металлу (без применения специальных роботов). При этом возможно использование фрезерно-гравировальных станков как для печати металлом, так и для последующей механической обработки. Результаты полевых испытаний рабочих органов, упрочненных прерывистыми износостойкими валиками WAAM-методом, показывают, что при наработке в 24,785 га на лемех износ линейного размера режущей кромки по ширине упрочненных лемехов в среднем на 10...11 мм меньше, чем у неупрочненных. Внедрение аддитивных технологий в систему технического обслуживания и ремонта крупных и средних сельскохозяйственных предприятий на основе фрезерно-гравировальных станков и комплекта для полуавтоматической сварки позволит повысить эффективность использования 3D-печати сваркой при восстановлении деталей машин, снизив при этом скорость изнашивания на 30...40%.

**Ключевые слова:** сельскохозяйственная техника; аддитивные технологии; технология ремонта; 3D-печать; упрочнение; полевые испытания; эффективность

**Для цитирования:** Катаев Ю.В., Чавдаров А.В. Перспективы применения технологии 3D-печати сваркой в сельском хозяйстве // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 2. С. 77-83. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-77-83>

## ORIGINAL ARTICLE

## Prospects for the application of 3D printing by welding in agriculture

*Yu. V. Kataev*<sup>1✉</sup>, *A. V. Chavdarov*<sup>2</sup><sup>1,2</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia<sup>1</sup> [ykataev@mail.ru](mailto:ykataev@mail.ru)<sup>✉</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-0832-3608><sup>2</sup> [info@firma-tom.ru](mailto:info@firma-tom.ru); <https://orcid.org/0000-0002-9825-306X>

**Abstract.** Significant wear of metal components in agricultural machinery and equipment necessitates their restoration using the most rational and cost-effective methods. The research aimed to identify the most promising and economically viable method for the designing and repair of agricultural machinery parts using additive technologies. An analysis of metal 3D printing methods based on equipment cost and process complexity indicates the feasibility of using devices for spatial orientation of the welding torch when employing widely available welding wires of various compositions. For agricultural enterprises, the most rational approach for restoring the geometry of worn parts and manufacturing new spatial metal structures is the use of semi-automatic welding technologies. The DED-W/WAAM/3DMP technology offers the highest productivity (up to 800 cm<sup>3</sup>/h) and the lowest cost among metal printers (without the use of specialized robots). Additionally, milling and engraving machines can be utilized both for metal printing and for subsequent mechanical processing. Field test results of working elements reinforced with intermittent wear-

resistant beads using the WAAM method show that after 24.785 hectares of operation, the linear wear of the blade width on reinforced shares is, on average, 10-11 mm less than that of non-reinforced shares. The integration of additive technologies into the maintenance and repair system of large and medium-sized agricultural enterprises – based on milling and engraving machines and semi-automatic welding kits – will enhance the efficiency of 3D printing by welding in the restoration of machine components while reducing the wear rate by 30-40%.

**Keywords:** agricultural machinery; additive technologies; repair technology; 3D printing; hardening; field testing; efficiency

**For citation:** Kataev Yu.V., Chavdarov A.V. Prospects for the application of 3D printing by welding in agriculture. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(2):77-83 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-77-83>

### Введение

Аддитивные технологии (АТ) активно используются в разных отраслях промышленности во всем мире [1, 2]. По данным Research and Markets, объем мирового рынка аддитивных технологий в 2021 г. составил \$14,4 млрд. К 2030 г. он может увеличиться до \$83,6 млрд. Российский рынок оборудования и услуг 3D-печати к 2022 г. достиг 4,5 млрд руб. В «Белой книге» НИУ ВШЭ отмечено: «В период с 2024 по 2030 гг. на территории России создадут серийное производство материалов и оборудования для 3D-печати, комплектующих и оборудования для постобработки изделий». В результате к 2030 г. объем российского рынка аддитивных технологий может достигнуть 58 млрд руб.

Применение АТ предполагает в большинстве случаев использование программируемого перемещения условно печатающей головки для послойного создания изделий по заранее созданной математической модели. В качестве головки может выступать сопло для подачи и плавления пластиковой проволоки, или электрическая дуга совместно с порошком или проволокой. Головка должна перемещаться согласно управляющей программе. При написании управляющей программы должно учитываться множество факторов, зависящих от используемой технологии и материалов. Если для используемого на практике пластикового филамента и оборудования уже существуют практические рекомендации и шаблоны программ, то для печати металлом существует очень мало апробированных методик. В развитии АТ принимают участие молодые ученые разных регионов России [3, 4].

Печать металлом (порошком или проволокой) позиционируется не только как метод изготовления деталей [5, 6], но и как способ восстановления геометрической формы изношенных или вышедших из строя изделий [7, 8]. Практика показывает, что около 80% изношенных деталей могут быть восстановлены в номинальный размер наплавкой, напылением и другими способами. При этом затраты на ремонт, как правило, не превышают 25...35% от стоимости новой детали [9, 10].

Внедрение аддитивных технологий при ремонте сельскохозяйственной техники и оборудования способствует поддержанию работоспособности машинно-тракторного парка, эксплуатируемого в сложных полевых и метеорологических условиях [11, 12, 13]. Внедрение новой технологии требует внимательного подхода и оценки ее практического использования.

**Цель исследований:** определить наиболее перспективные и экономически выгодные способы создания и ремонта деталей сельскохозяйственных машин на основе применения аддитивных технологий.

### Материалы и методы

Анализ применения технологий 3D-печати металлом выполнялся на основе нормативно-правовых документов, открытых публикаций научных трудов в этой области исследований. Осуществлена систематизация АТ-методов печати металлическими материалами по стоимости оборудования и сложности процессов.

При составлении управляющих программ упрочняющей наплавки лемехов использовали программу ESI Visual-Weld и Visual-Mesh 12.5. Опытная партия упрочненных рабочих органов в количестве 46 ед. проходила испытания в полевых условиях. Износ определяли измерением геометрических размеров в поперечном сечении в нескольких сечениях. Полученные результаты обрабатывали статистическим методом.

### Результаты и их обсуждение

Известно большое количество способов печати металлическими материалами. Анализ используемых источников энергии и применяемых материалов позволил составить общую схему процессов 3D-печати (рис. 1).

Наиболее широкое применение в промышленности получил синтез из порошков на подложке. Чаще всего используется прямое лазерное спекание, при котором готовую деталь получают без постобработки. К недостаткам способа следует отнести высокую стоимость оборудования и расходных материалов. В России подобное оборудование используется

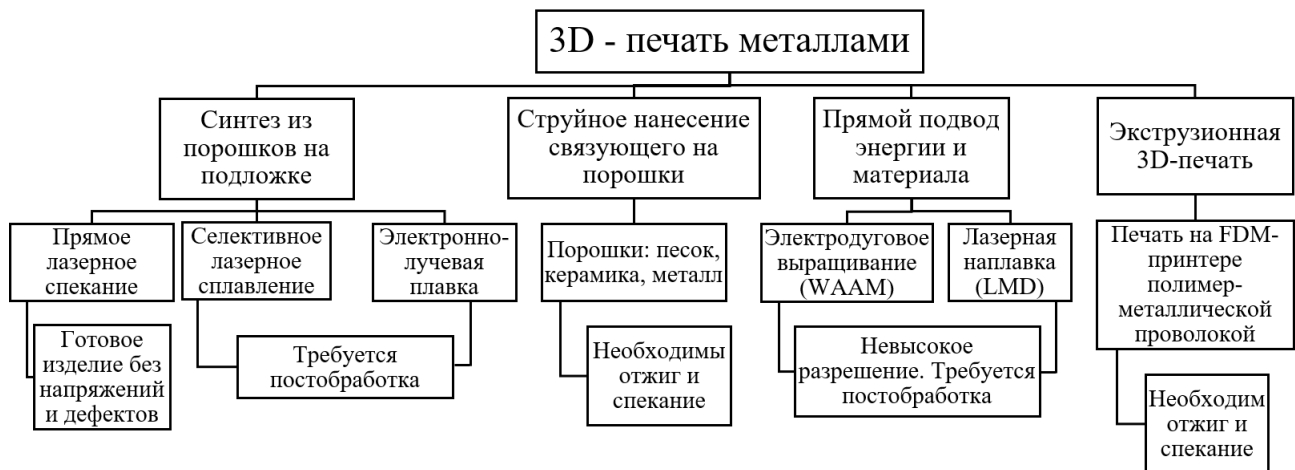


Рис. 1. Схема процессов 3D-печати металлом

Fig. 1. Diagram of metal 3D printing processes

в основном в авиастроении, энергетическом комплексе, в медицине и приборостроении.

Струйное нанесение связующего на порошки чаще применяют в металлургии и тяжелом машиностроении для «выращивания» крупногабаритных деталей. На металлургических комбинатах (Череповец, Челябинск) активно используются данная технология и электродуговое выращивание (WAAM), особенно по программам импортозамещения.

Способ печати на обычном принтере полимер-металлической проволокой в России пока не получил широкого применения по причине отсутствия материалов и необходимости последующего удаления связующего и спекания изделия. При составлении управляющей программы необходимо учитывать, что при термообработке происходит значительная усадка детали. Величина усадки в большей степени зависит от количества и марки используемого наполнителя, и в настоящее время этот фактор является основополагающим при выборе метода получения изделия.

Метод WAAM стал активно использоваться после появления первых программируемых логических контроллеров (ПЛК) и серводвигателей с энкодерами, позволяющих с высокой точностью перемещать инструмент. Установка для наплавки концов рельсов РЖД представлена на рисунке 2 [14].

Программа управления двумя серводвигателями позволяет выполнить восстановительную наплавку на любой площади. Оператор вводит координаты реперных точек и задает шаг наплавки, далее процесс выполняется автоматически. Эта универсальная установка также широко используется при восстановлении рабочих органов сельскохозяйственных машин.

Большое внимание внедрению новых и перспективных технологий уделяется региональными ведомственными службами и хозяйствами. Большой опыт

работы ФНАЦ ВИМ, ООО «Калужская МТС» и передовых хозяйств Московской, Тульской и Калужской областей по увеличению ресурса деталей сельскохозяйственной техники показал, что существуют два основных класса однотипных деталей, требующих восстановления или упрочнения: детали типа «Вал» и почвообрабатывающие изделия (бороны, плуги, долота, лемеха). В первой группе деталей типа «Вал» износ чаще всего происходит в местах сопряжений с ответной деталью. Для восстановления этих мест требуется выполнение наплавки с последующей механической обработкой. В этих случаях в хозяйствах чаще всего используют ручную электродуговую сварку штучными электродами или полуавтоматическую MIG-сварку. Для снижения износа второй группы деталей (рабочих органов) используют наплавку упрочняющих валиков. Установка для упрочнения, в которой управляющая программа составлена в G-кодах аналогично программам для ЧПУ станков, представлена на рисунке 3. Подобные автоматизированные установки ФНАЦ ВИМ внедрены в ООО «Калужская МТС» и МГТУ им. Н.Э. Баумана для учебного процесса.



Рис. 2. Автоматическая установка для наплавки рельсов

Fig. 2. Automatic rail surfacing unit



**Рис. 3. Автоматизированная установка для наплавки рабочих органов:**  
 1 – сварочный полуавтомат; 2 – компьютер; 3 – блок управления; 4 – рабочий орган;  
 5 – станок с программным управлением

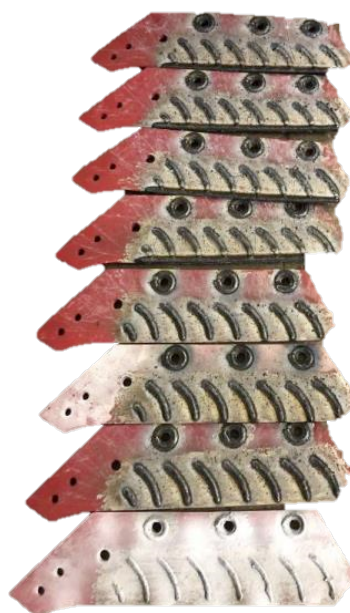
**Fig. 3. Automated unit for surfacing working parts:**  
 1 – semi-automatic welding machine; 2 – computer; 3 – control unit; 4 – working tool;  
 5 – computer-controlled machine tool (CNC machine)

Нанесение упрочняющих валиков возможно только при наличии специальной управляющей программы и только в автоматическом режиме. Наплавленные на этой установке лемеха представлены на рисунке 4.

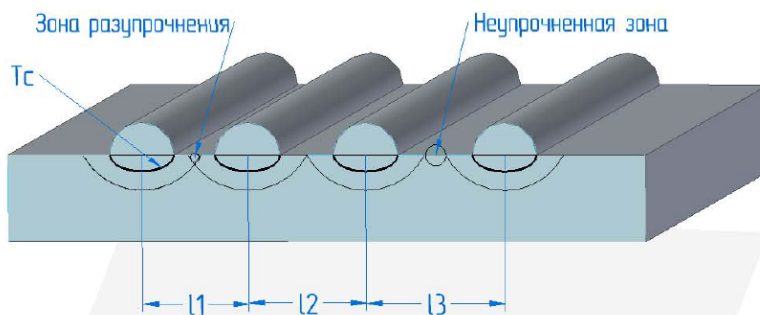
Технология нанесения валиков и управляющая программа базируются на математическом исследовании теплового баланса в изделии для предотвращения образования разупрочненных областей и оказания минимального влияния на тяговое усилие при обработке почвы. Оценка теплового состояния лемеха осуществлялась с использованием специализированной программы для моделирования сварки и наплавки ESI Visual-Weld и Visual-Mesh 12.5 (рис. 5).

На основе экспериментальных исследований выявлено, что валики длиной 25...30 мм обеспечивают наиболее эффективное упрочнение. В связи с этим на модели принята длина валиков 30 мм (рис. 6).

Отметим, что затраты на выполнение работ по упрочнению повысили стоимость рабочего органа примерно на 15...20%, но при этом скорость



**Рис. 4. Упрочненные дуговой наплавкой лемеха**  
**Fig. 4. Ploughshares reinforced by arc surfacing**



**Рис. 5. Схема нанесения наплавленных валиков для оценки теплового состояния лемеха в процессе его упрочнения**  
**Fig. 5. Diagram of deposited roller arrangement for assessing the thermal condition of a ploughshare during its hardening**

изнашивания снизилась на 35...45%. В таблице 1 представлены результаты полевых испытаний лемеха и долота, упрочненных прерывистыми износостойкими валиками. Наплавка выполнялась с использованием проволоки Castolin EnDO 30 диаметром 1,2 мм в среде защитного газа.

На основании проведенных испытаний (рис. 7) можно заключить, что упрочненные лемеха, прошедшие полевые испытания, подвержены меньшему износу в отличие от неупрочненных лемехов. При наработке в 24,785 га на лемех износ линейного размера режущей кромки по ширине упрочненных лемехов в среднем на 10...11 мм меньше, чем у неупрочненных.

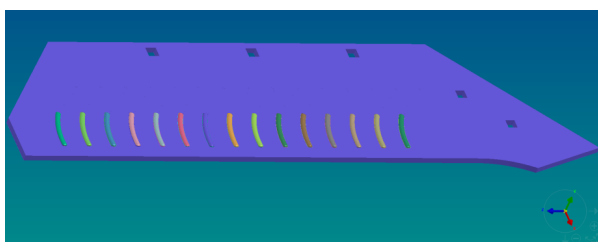


Рис. 6. Оценка теплового состояния лемеха в процессе наплавки упрочняющих валиков

Fig. 6. Assessment of the thermal condition of a ploughshare during surfacing of hardening rollers

При расчете экономической эффективности покупки и внедрения АТ-технологии определяющим фактором является стоимость оборудования для печати металлом и расходных материалов. Ориентировочная стоимость оборудования приведена в таблице 2.

Следует учитывать, что приведенные в таблице 2 цены относятся только к покупке самой (установки) и не включает в себя расходы на дополнительное оборудование для постобработки полученных деталей и покупку программного обеспечения. С учетом этого общая стоимость может повыситься в 2-5 раз в зависимости от технологии печати.

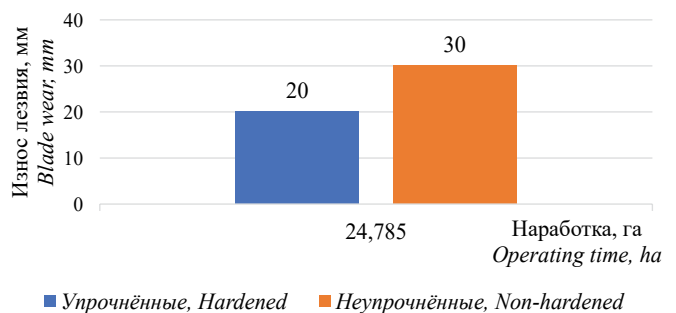


Рис. 7. Износ лезвия лемехов при наработке 24,785 га

Fig. 7. Wear of the ploughshare blade after 24,785 ha of operation

Результаты полевых испытаний наплавленных рабочих органов

Таблица 1

Field test results of surfaced working elements

Table 1

Вид упрочненной детали	Рабочий орган после испытаний	Условия эксплуатации	Результаты полевых испытаний
		Лемех основного корпуса ВЕЛОТА правый. Дата установки: 19.09.2019 г. Дата снятия: 04.10.2019 г. Район обработки: Тарусский. Почвы: дерново-подзолистые	При наработке в 24,758 га износ лезвийной части снизился в среднем на 10...11 мм
		Лемех основного корпуса ВЕЛОТА левый. Дата установки: 08.11.2019 г. Район обработки: Козельский. Почвы: серые лесные.	При наработке в 4,375 га износ лезвийной части составил 1...2 мм
		Долото левое. Дата установки: 21.10.2019 г. Дата снятия: 17.11.2019 г. Район обработки: Козельский. Почвы: серые лесные.	Снижение скорости изнашивания на 25...30% по сравнению с заводским исполнением
		Долото правое. Дата установки: 21.10.2019 г. Дата снятия: 17.11.2019 г. Район обработки: Козельский. Почвы: серые лесные.	При наработке в 18,312 га износ лезвийной части снизился в среднем на 9...11 мм

Таблица 2

## Стоимость оборудования для 3-D печати металлом

Table 2

## Cost of equipment for metal 3D printing

Бренд	Установка	Примерная цена, тыс. руб.	Технология	Применяемые металлы
BCN3D	Epsilon Series	819	FDM	Нержавеющая сталь 316L, 17-4 PH
Raise3D	Metalfuse Forge1	1080	FDM	Нержавеющая сталь 316L, 17-4 PH
One Click Metal	MPrint+	8100	Лазерное плавление порошка	Нержавеющая сталь 316L, инструментальная сталь, алюминий
H3D HBD	HBD150	18 000	Лазерное плавление порошка	Нержавеющая сталь 316L, инструментальная сталь, алюминий, кобальт-хром, медь, титан
HP	Metal Jet S100	35 910	Струйная печать связующим	Нержавеющая сталь 316L, 17-4 PH
GE Additive	Arcam EBM Q10plus	> 45000	Электронно-лучевая плавка	Титан, кобальт-хром, медь
WAAM3D	RoboWAAM	>45000	Дуговая наплавка	Нержавеющая сталь, инструментальная сталь, алюминий, молибден, никель, титан и др.

Применительно к сельскому хозяйству, где, как правило, требуются гибкость технологии и сокращенное время для ремонта техники, наиболее рациональным является приобретение полнокомплектных установок для WAAM-процессов (рис. 3.) Стоимость фрезерно-гравировального станка, используемого в конструкции данного вида установок, составляет от 150 000 до 300 000 тыс. руб. в зависимости от рабочего поля. Стоимость полного комплекта оборудования для полуавтоматической сварки будет составлять около 250 000 руб. Программное обеспечение поставляется вместе со станком.

## Выводы

1. Анализ основных способов печати металлов с применением аддитивных технологий выявил преимущества способа электродугового

выращивания (WAAM) при восстановлении и ремонте машинно-тракторного парка АПК. Технология DED-W/WAAM/3DMP отличается наибольшей производительностью (до 800 см<sup>3</sup>/ч) и наименьшей стоимостью среди принтеров по металлу (без применения специальных роботов).

2. Полевыми испытаниями подтверждено увеличение срока работы упрочненных методом WAAM рабочих органов на 50%.

3. Внедрение в систему технического обслуживания и ремонта крупных и средних сельскохозяйственных предприятий фрезерно-гравировального станка и комплекта для полуавтоматической сварки позволяет повысить эффективность использования метода выращивания при восстановлении деталей машин, снизив при этом скорость изнашивания на 30...40%.

## Список источников

1. Григорьянц А.Г., Лутченко А.В. Современные проблемы развития аддитивных технологий в машиностроении // Научно-технические технологии в машиностроении. 2022. № 8 (134). С. 27-30. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-8-27-30>
2. Толочко Н.К., Авраменко П.В., Кравцов В.Б., Голинский П.В. Теоретическое обоснование использования металлических многослойных структур при изготовлении и ремонте сельскохозяйственной техники // Агроинженерия. 2025. № 27 (3). С. 64-73. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-64-73>
3. Дорохов А.С., Свиридов А.С. Применение аддитивных технологий при техническом сервисе садовой техники // Агроинженерия. 2020. № 6 (100). С. 39-44. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-6-39-44>
4. Егоров И.Б., Поздняков Н.А. Применение аддитивной технологии WAAM для ремонта сельскохозяйственных машин и оборудования // Молодые ученые: Современный взгляд на будущее АПК: Сборник X Международной научно-практической конференции, р.п. Краснообск, 15 апреля 2025 г. Новосибирск: Агронаука, 2025. С. 280-284. EDN: MKBHF1

## References

1. Grigoryants A.G., Lutchenko A.V. Modern problems of technological development of additive techniques in mechanical engineering. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2022;8(134):27-30. (In Russ.) <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-8-27-30>
2. Tolochko N.K., Auramenka P.V., Kravtsov V.B., Golitskiy P.V. Theoretical grounds for the use of metal multilayer structures in the manufacturing and repair of agricultural machinery. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(3):64-73. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-64-73>
3. Dorokhov A.S., Sviridov A.S. Application of additive technologies in the technical service of garden equipment. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2020;6:39-44. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-6-39-44>
4. Egorov I.B., Pozdnyakov N.A. Application of additive WAAM technology for the repair of agricultural machinery and equipment. *Molodye uchenye: Sovremenniy vzglyad na budushchee APK: Proceedings of the X International scientific and practical conference,*

5. Катаев Ю.В., Гончарова Ю.А., Свиридов А.С., Тужилин С.П. Применение технологий 3D-печати и 3D-сканирования при изготовлении и ремонте сельскохозяйственной техники // *Техника и оборудование для села*. 2023. № 1 (307). С. 34-38. EDN: YLNGXU
6. Славкина В.Э., Мирзаев М.А., Лопатина Ю.А. Применение технологии 3D-печати для оптимизации ремонта зубчатых передач // *Технический сервис машин*. 2020. № 1 (138). С. 58-64. EDN: WPQPOE
7. Слинко Д.Б., Дорохов А.С., Денисов В.А., Лялякин В.П. Практика применения плазменно-порошковой наплавки при восстановлении изношенных деталей машин // *Технология машиностроения*. 2019. № 3. С. 32-37. EDN: VFRRXP
8. Сенин П.В., Чаткин М.Н., Кильмяшкин Е.А. Аддитивные технологии для производства и ремонта сельскохозяйственной техники // *Инженерные технологии и системы*. 2024. Т. 34, № 4. С. 584-596. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.584-596>. EDN: JHHJIG
9. Ценч Ю.С., Миронов Д.А., Пыжов В.В. Развитие методов восстановления деталей тракторных двигателей // *Технический сервис машин*. 2025. Т. 63, № 1. С. 102-110. EDN: AYJBHM
10. Черноиванов В.И., Денисов В.А., Катаев Ю.В., Соломашкин А.А. Новая стратегия технического обслуживания и ремонта машин // *Техника и оборудование для села*. 2021. № 9 (291). С. 33-36. EDN: DQBNRT
11. Кузьмин В.Н., Гаврилов А.В. Организация ремонта и технологии восстановления деталей машин в АПК // *Технический сервис машин*. 2024. Т. 62, № 3. С. 33-39. EDN: OFDIRY
12. Kulikov A.A., Nebyshinets Yu.V., Sidorova A.V., Balanovskii A.E. 3D printing technology for metal products: from an automatic design system to a real part. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(4):728-739. EDN: SOWWOR
13. Ерохин М.Н., Дорохов П.В., Дорохов А.С. К вопросу о концентрации напряжений и оптимизации формы переходной поверхности ступенчатого вала // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2020. № 3. С. 45-55. EDN: JRRWZP
14. Установка для автоматической наплавки рельсовых путей: Патент № RU44682 U1, МПК В23К9/04 / С.А. Бульканов, А.В. Чавдаров, М.М. Берзин, В.С. Деденев, В.Н. Пурехов; заявл. 22.12.2004; Опубли. 27.03.2005. EDN: NJBUVW

### Информация об авторах

- <sup>1</sup> Катаев Юрий Владимирович, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник; [ykataev@mail.ru](mailto:ykataev@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0832-3608>; SPIN-код: 3082-3850
- <sup>2</sup> Чавдаров Анатолий Валентинович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; [info@firma-tom.ru](mailto:info@firma-tom.ru); <https://orcid.org/0000-0002-9825-306X>; SPIN-код: 2587-8496
- <sup>1,2</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

### Вклад авторов

Ю.В. Катаев – концептуализация, обзор источников литературы, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование; А.В. Чавдаров – создание черновика рукописи, описание результатов и формулирование выводов

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 12.12.2025, после рецензирования и доработки 31.03.2026, принята к публикации 03.04.2026

Krasnoobsk, April 15, 2025. Novosibirsk: Agronauka. 2025:280-284. (In Russ.)

5. Kataev Yu.V., Goncharova Yu.A., Sviridov A.S., Tuzhilin S.P. Application of 3D printing and 3D scanning technologies in the manufacture and repair of agricultural machinery. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;1:34-38. (In Russ.)

6. Slavkina V.E., Mirzaev M.A., Lopatina Yu.A. Using 3A-printing technology to optimize gear repair. *Machinery Technical Service*. 2020;1:58-64. (In Russ.)

7. Slinko D.B., Dorokhov A.S., Denisov V.A., Lyalyakin V.P. Practice of using plasma-powder surfacing in the restoration of worn machine parts. *Tekhnologiya mashinostroeniya*. 2019;3:32-37. (In Russ.)

8. Senin P.V., Chatkin M.N., Kilmyashkin E.A. Additive technologies for production and repair of agricultural equipment. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(4):584-596 (In Russ.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.584-596>

9. Tsench Yu.S., Mironov D.A., Pyzhov V.V. Development of methods for restoring tractor engine parts. *Machinery Technical Service*. 2025;63;1:102-110. (In Russ.)

10. Chernov Ivanov V.I., Denisov V.A., Kataev Yu.V., Solomashkin A.A. A new strategy for the maintenance and repair of machines. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021;9:33-36. (In Russ.)

11. Kuzmin V.N., Gavrilov A.V. Organization of repair and restoration technologies for machine parts in the agro-industrial complex. *Machinery Technical Service*. 2024;62(3):33-39. (In Russ.)

12. Kulikov A.A., Nebyshinets Yu.V., Sidorova A.V., Balanovsky A.E. 3D printing technology for metal products: from a computer-aided design system to a real part. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(4):728-739.

13. Erokhin M.N., Dorodov P.V., Dorokhov A.S. Stress concentration and shape optimization for a fillet surface of a step-shaped shaft. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2020;3:45-55. (In Russ.)

14. Bulkanov S.A., Chavdarov A.V., Berzin M.M. et al. Unit for automatic surfacing of rail tracks: Patent No. RU44682 U1 IPC B23K9/04 / applied on 22.12.2004; issued on 27.03.2005. (In Russ.)

### Author Information

Yuriy V. Kataev<sup>1</sup>, CSc (Eng), Associate Professor, Lead Research Engineer; [ykataev@mail.ru](mailto:ykataev@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0832-3608>; Scopus ID: 57209744442

Anatoliy V. Chavdarov<sup>2</sup>, CSc (Eng), Lead Research Engineer; [info@firma-tom.ru](mailto:info@firma-tom.ru); <https://orcid.org/0000-0002-9825-306X>

<sup>1,2</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russian Federation, Moscow, 1st Institutsky Proezd Str., 5

### Authors Contribution

Yu.V. Kataev – conceptualization, literature review  
A.V. Chavdarov – writing – original draft; validation; results and conclusions

### Conflict of interests

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

Received 12.12.2025; Revised 31.03.2026; Accepted 03.04.2026

# ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.651

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-84-91>



## Автоматизированная система регулирования давления пара пароплазменного горелочного устройства систем отопления сельскохозяйственных предприятий

Д.Д. Медведев<sup>1</sup>, В.И. Грищенко<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Донской государственный технический университет; г. Ростов-на-Дону, Россия

<sup>1</sup> 19medvedev97@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3047-711X>

<sup>2</sup> vig84@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1422-2811>

**Аннотация.** Обеспечение регулируемого и устойчивого давления пара в пароплазменном горелочном устройстве является одной из приоритетных задач проектирования системы отопления сельскохозяйственных предприятий. Существующие методы регулирования, основанные на использовании типовых регуляторов ПИД-типа, не позволяют достичь высокого КПД отопительной установки. Исследования проведены с целью разработки компьютерной модели автоматизированной системы регулирования давления пара пароплазменного горелочного устройства мощностью до 1 МВт и определения оптимальных коэффициентов регулятора, обеспечивающих стабилизацию давления пара. Компьютерная модель автоматизированной системы регулирования давления пара пароплазменного горелочного устройства, разработанная в программе Matlab/Simulink, включает в себя радиально-плунжерный насос, распределительный узел, пароплазменный генератор и систему управления на основе пропорционально-интегрального регулятора. Проведено моделирование динамических процессов в системе при фиксированных частотах вращения вала 100, 200, 300 и 477 об/мин и диапазоне давления пара 0...23 бар. Исследовано влияние параметров ПИ-регулятора на переходные процессы и устойчивость работы. В результате вычислительных экспериментов определены оптимальные коэффициенты ПИ-регулятора, обеспечивающие минимальное время переходного процесса (не более 7 сек.) и отклонение давления не выше 4% от заданного значения. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного метода регулирования и возможность его практической реализации в системах автоматического управления жидкотопливными горелками на сельскохозяйственных предприятиях.

**Ключевые слова:** автоматизированная система регулирования давления пара; радиально-плунжерный насос; пароплазменное горелочное устройство; пароплазменный генератор; компьютерная модель; давление пара; ПИ-регулятор

**Для цитирования:** Медведев Д.Д., Грищенко В.И. Автоматизированная система регулирования давления пара пароплазменного горелочного устройства систем отопления сельскохозяйственных предприятий // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 2. С. 84-91. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-84-91>

ORIGINAL ARTICLE

## Automated steam pressure control system for steam-plasma burners in heating systems of agricultural enterprises

D.D. Medvedev<sup>1</sup>, V.I. Grishchenko<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Don State Technical University; Rostov-on-Don, Russia

<sup>1</sup> 19medvedev97@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3047-711X>

<sup>2</sup> vig84@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1422-2811>

**Abstract.** Ensuring regulated and stable steam pressure in a steam-plasma burner device is a priority objective in the design of heating systems for agricultural enterprises. Existing control methods based on standard PID-type controllers do not provide high efficiency of the heating system. The research aimed to develop a computer model of an automated steam pressure control system for a steam-plasma burner device with a capacity

of up to 1 MW and to determine the optimal controller coefficients ensuring steam pressure stabilization. The computer model of the automated steam pressure control system for the steam-plasma burner device, developed in the Matlab/Simulink environment, includes a radial piston pump, a distribution unit, a steam-plasma generator, and a control system based on a proportional-integral controller. Dynamic processes in the system were simulated at fixed shaft rotation speeds of 100, 200, 300, and 477 rpm and a steam pressure range of 0 to 23 bar. The authors examined the influence of the PI controller parameters on transient processes and operational stability. Computational experiments resulted in determining optimal PI controller coefficients, providing a minimum transient time (no more than 7 seconds) and a pressure deviation not exceeding 4% of the setpoint value. The obtained results confirm the effectiveness of the proposed control method and the feasibility of its practical implementation in automatic control systems for liquid-fuel burners used at agricultural enterprises.

**Keywords:** automated steam pressure control system; radial piston pump; steam-plasma burner device; steam-plasma generator; steam pressure; computer model; PI controller (proportional-integral controller)

**For citation:** Medvedev D.D., Grishchenko V.I. Automated steam pressure control system for steam-plasma burners in heating systems of agricultural enterprises. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(2):84-91 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-84-91>

### Введение

Энергоэффективность и экологическая безопасность систем теплоснабжения сельскохозяйственных предприятий способствует устойчивому развитию агропромышленного комплекса [1, 2]. Традиционные источники отличаются высокой стоимостью и значительными выбросами загрязняющих веществ при сжигании жидкого топлива [3, 4]. В качестве альтернативы перспективны технологии с использованием пароплазменных горелочных устройств, позволяющих достигать высоких температурных режимов, эффективно утилизировать различные виды топлива и минимизировать вредное воздействие на окружающую среду [5-7]. Форсунки жидкотопливных горелок, как правило, калибруются по давлению на производстве. В пароплазменных горелочных устройствах для обеспечения стабильности процесса целесообразно применять системы управления по давлению.

Важнейшим элементом пароплазменных горелочных устройств является узел подачи воды, от стабильности и точности работы которого зависят эффективность и надежность процесса горения [8]. Ключевым компонентом этого узла служит радиально-плунжерный насос подачи воды, обеспечивающий формирование необходимого давления пара, используемого для диспергирования топлива [9]. Стабилизация давления воды необходима для поддержания постоянной скорости потока струи пара на входе в форсунку, что обеспечивает лучшую диспергацию топлива паром, и в конечном счете – высокий КПД всей отопительной установки [10, 11]. Таким образом, обеспечение регулируемого и устойчивого давления пара является одной из приоритетных задач при проектировании системы.

Существующие методы регулирования основаны, как правило, на использовании типовых

регуляторов (ПИД-типа) [12], параметры которых часто настраиваются эмпирически без учета динамических характеристик конкретного насоса и нелинейной природы его работы. Такой подход не позволяет в полной мере компенсировать возмущения и обеспечивать оптимальное качество переходных процессов в системе.

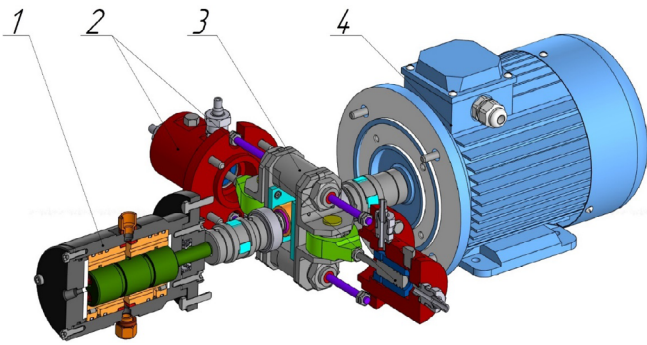
**Цель исследований:** разработка компьютерной модели автоматизированной системы регулирования давления пара пароплазменного горелочного устройства и определение оптимальных коэффициентов регулятора, обеспечивающих стабилизацию давления пара.

### Материалы и методы

Объектом исследований является система подачи воды пароплазменного горелочного устройства мощностью до 1 МВт, в основе которого лежит радиально-плунжерный насос [9] (рис. 1).

Организация потоков в форсунке пароплазменной горелки (рис. 2) предполагает, что по осевому каналу радиально-плунжерным насосом подается диспергирующий агент (перегретый пар) и формируется необходимое давление  $P_{пара}$ , а по радиальному каналу – топливо ( $P_{топлива}$ ). В зоне смешения на срезе форсунки происходит взаимодействие струй, приводящее к разрушению топливной пленки и образованию мелкодисперсного аэрозоля с давлением  $P_{смеси}$ . Ключевым фактором, обеспечивающим эффективное распыление и стабилизацию факела, является поддержание заданной скорости истечения пара, что в свою очередь требует стабилизации рабочего давления на входе в форсунку ( $P_{пара}$ ).

Моделирование процессов, происходящих при работе реальных насосов, осложняется нестационарностью потоков рабочей жидкости и нестабильностью реальных воздействий на систему. Для анализа

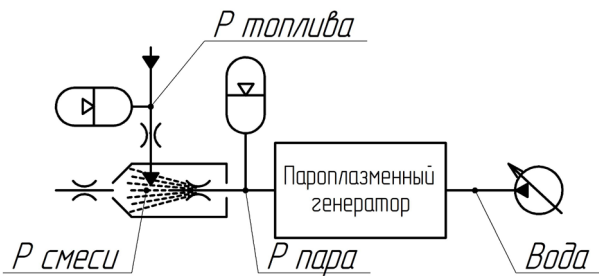


**Рис. 1. Радиально-плунжерный насос подачи воды пароплазменной горелки:**

- 1 – распределительный узел; 2 – качающий узел;
- 3 – кулачковый механизм; 4 – электродвигатель

**Fig. 1. Radial piston pump for water supply to a steam plasma burner:**

- 1 – distribution unit; 2 – pumping unit;
- 3 – cam mechanism; 4 – electric motor



**Рис. 2. Схема организации потоков в форсунке пароплазменной горелки**

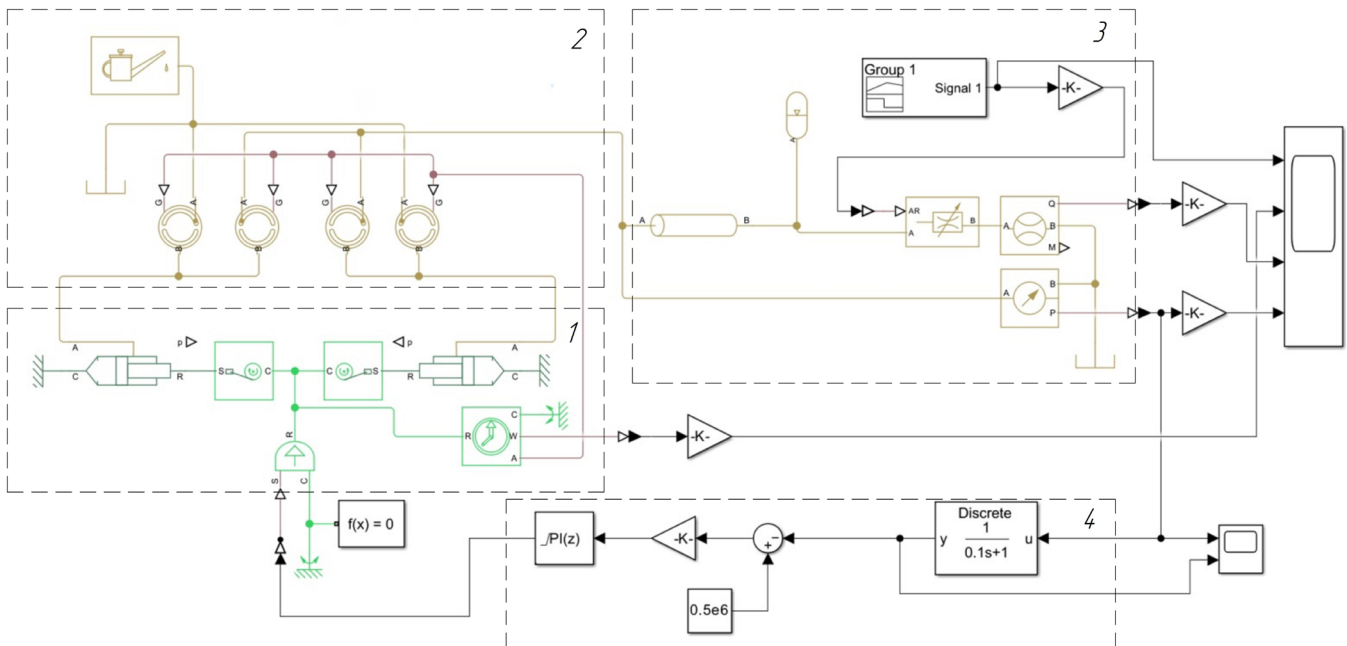
**Fig. 2. Flow pattern in a steam-plasma burner nozzle**

и проектирования системы подачи воды, обеспечивающей требуемые параметры пара на входе в форсунку, в программе Matlab/Simulink разработана компьютерная модель (рис. 3). Для упрощения математической модели были приняты следующие допущения:

- характеристики рабочей жидкости (плотность, вязкость, коэффициент расхода и т.п.) постоянны во всех режимах работы насоса;
- коэффициенты расходов, объемный модуль упругости жидкости постоянны;
- трубопроводы и гидравлические каналы насоса – абсолютно жесткие;
- потери давления ввиду коротких и избыточных по диаметру местных и линейных гидравлических сопротивлений не учитываются.

Исходные данные узла подачи воды представлены в таблице.

Для регулирования давления пара пароплазменных горелочных устройств системы, представляющей собой инерционный объект с пульсациями, выбран ПИ-регулятор с фильтрацией входного сигнала [13]. Для настройки ПИ-регулятора использовали встроенное в MATLAB/Simulink приложение PID Tuner (рис. 4), представляющее собой инструмент параметрического синтеза линейных регуляторов, осуществляющий на основе линеаризованной математической модели объекта управления автоматический подбор коэффициентов методом частотной оптимизации.



**Рис. 3. Автоматизированная система регулирования давления пара пароплазменного горелочного устройства (компьютерная модель):**

- 1 – узел насоса; 2 – распределительный узел; 3 – пароплазменный генератор; 4 – система управления

**Fig. 3. Automated steam pressure control system for a steam plasma burner (computer model):**

- 1 – pump unit; 2 – distribution unit; 3 – steam plasma generator; 4 – control system

Алгоритм настройки базируется на формировании желаемой частотной характеристики разомкнутой системы путем вариации целевой полосы пропускания и минимального запаса устойчивости по фазе, что позволяет достичь компромисса между быстродействием, робастностью и качеством переходных процессов.

Представленная на рисунке 3 модель включает в себя четыре основных функциональных узла.

Качающий узел насоса 1 представляет собой два гидравлических цилиндра одностороннего действия. Привод осуществляется от источника угловой скорости (имитация электродвигателя) через кривошипно-шатунный механизм, преобразующий вращательное движение вала в возвратно-поступательное движение поршней насоса.

Оригинальный распределительный узел 2 (вращающийся золотник) насоса содержит четыре канала переменного сечения, попарно связывающие полости гидроцилиндров с линией всасывания (источник жидкости под атмосферным давлением) и линией нагнетания.

Модель пароплазменного генератора 3 включает в себя участок трубопровода и газонаполненный гидроаккумулятор, содержащий воду и пар,

имитирующий пароперегреватель. Выходной поток регулируется дросселем переменного сечения, имитирующим сопло форсунки горелки.

Таблица

Исходные данные узла подачи воды

Table

Input data for the water supply assembly

Параметр	Значение
Диаметр отверстия дросселя, м	0,005
Диаметр каналов золотника, м	0,004
Диаметр плунжера, м	0,013
Ход плунжера, м	0,005
Диаметр золотника, м	0,03
Модуль упругости жидкости, МПа	2289
Коэффициент динамической вязкости рабочей жидкости при 60 С°, сСт	0,47
Плотность рабочей жидкости при 60 С°, кг/м³	984
Коэффициент расхода эквивалентного дросселя	0,7
Коэффициент расхода канала золотника	0,6
Объем трубки подачи пара, м³	0,024
Атмосферное давление, Па	100000

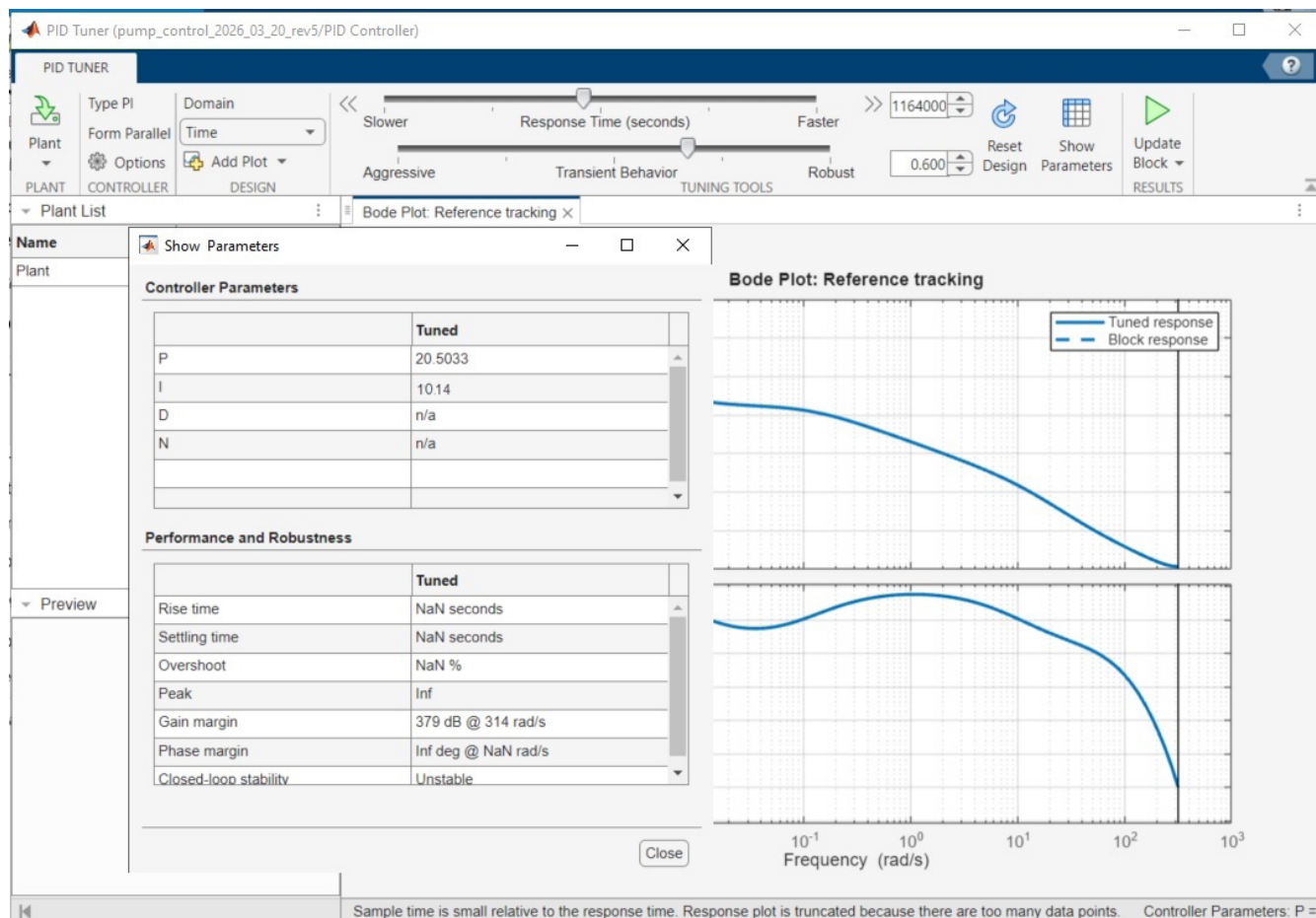


Рис. 4. Окно приложения PID Tuner  
Fig. 4. The PID Tuner application window

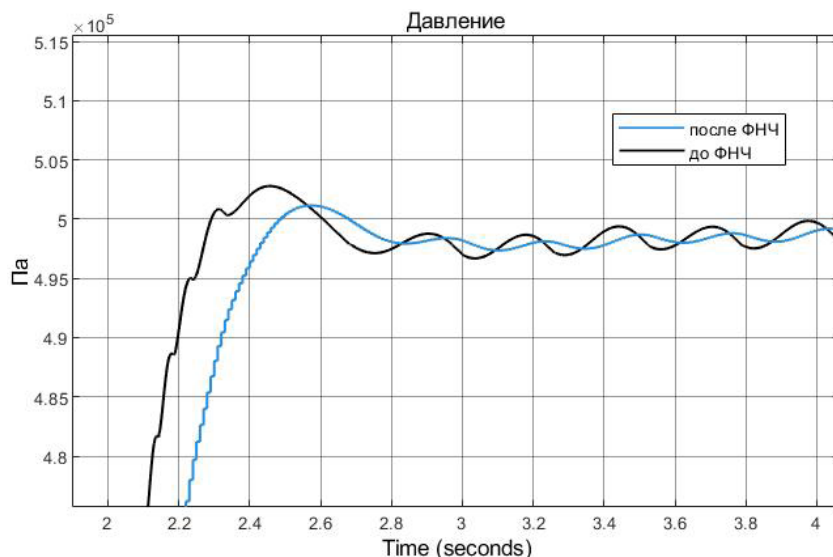


Рис. 5. Сигнал давления до ФНЧ и после него

Fig. 5. Pressure signal before and after the low-pass filter

Система управления 4 реализована для стабилизации давления в системе. Фильтр низких частот (ФНЧ) подавляет высокочастотные пульсации давления, возникающие по причине прерывистого характера работы насоса (рис. 5). Блок константы задает уставку давления. ПИ-регулятор поддерживает давление на нужном уровне.

### Результаты и их обсуждение

В результате произведенных вычислений получены зависимости производительности насоса в диапазоне давления 0...25 бар при фиксированных частотах вращения вала 100, 200, 300 и 477 об/мин (рис. 6).

При частоте вращения вала 477 об/мин с ростом давления пара до 25 бар производительность насоса понизилась на 18% (рис. 6). При меньших частотах вращения вала и в том же диапазоне давления пара производительность насоса снизилась менее чем на 10%. Чувствительность подачи воды от давления на выходе насоса объясняется повышающими внутренними перетечками в нем при повышении давления. В связи с этим возникла необходимость разработки автоматизированной системы регулирования давления пара на основе ПИ-регулятора.

Осциллограммы частоты вращения вала насоса, подачи и давления пара на форсунке при изменяющейся нагрузке от времени без применения регулятора по давлению и с ПИ-регулятором представлены на рисунках 7-9.

При изменяющейся нагрузке в форсунке без участия регулятора выход на режим происходит за 9 сек. (рис. 7), колебание давления и подачи пара достигает 35%. В системе с регулятором выход на режим осуществляется за 2,5 сек., давление

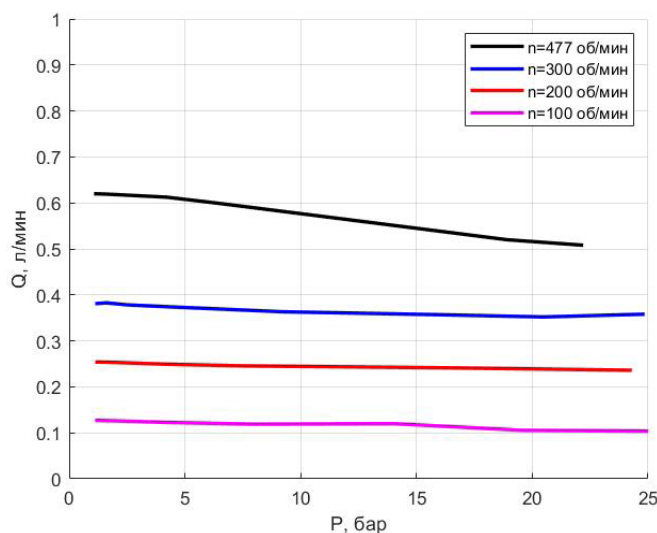
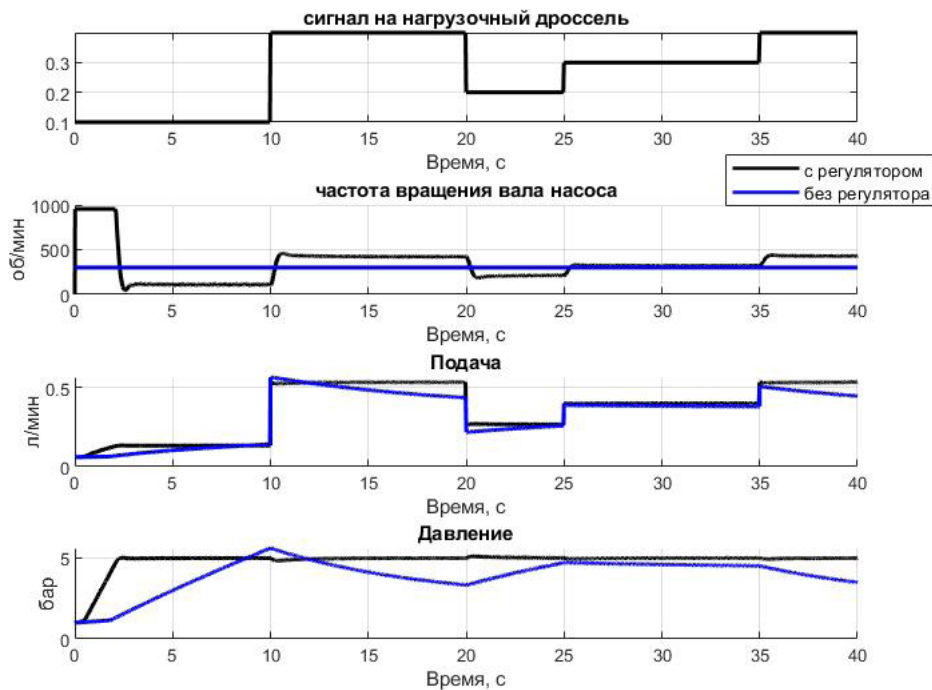


Рис. 6. Зависимость подачи ( $Q$ , л/мин) от давления ( $P$ , бар) радиально-плунжерного насоса  
Fig. 6. Relationship between pump displacement ( $Q$ , l/min) and the pressure ( $P$ , bar) of a radial piston pump

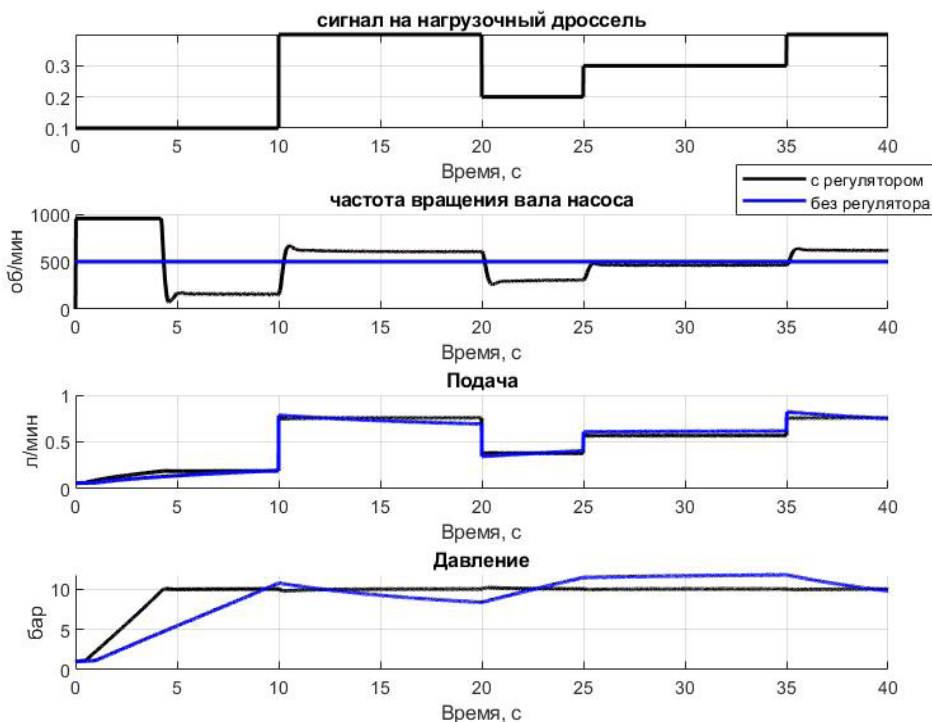
поддерживается на уровне уставки в 5 бар с отклонением менее 4%.

При уставке давления 10 бар в системе без регулятора выход на режим происходит за 10 сек., давление изменяется в пределах 18% от заданного (рис. 8). С регулятором выход на режим достигается за 4 сек., давление поддерживается на уровне уставки в 10 бар с отклонением менее 2,5%.

При уставке давления 15 бар в системе без регулятора выход на режим происходит за 10 сек. (рис. 9), давление изменяется в пределах 25% от заданного; с регулятором выход на режим – за 6,2 сек., давление поддерживается на уровне уставки в 15 бар с отклонением менее 2,5%.



**Рис. 7. Зависимости частоты вращения вала насоса, подачи, давления пара при уставке давления 5 бар и изменяющейся нагрузке в форсунке**  
**Fig. 7. Interrelationship of pump shaft speed, pump displacement, steam pressure at 5 bar and variable load in the injection nozzle**



**Рис. 8. Зависимости частоты вращения вала насоса, подачи, давления пара при уставке давления 10 бар и изменяющейся нагрузке в форсунке**  
**Fig. 8. Interrelationship of pump shaft speed, pump displacement, steam pressure at 10 bar and variable load in the injection nozzle**

Результаты подтверждают, что полученные в ходе настройки ПИ-регулятора в приложениях PID Tuner коэффициент пропорционального звена  $K_p = 20,5033$  и коэффициент интегрального звена

$K_i = 10,14$  обеспечивают устойчивость замкнутой системы. Целесообразность применения ПИ-регулятора для данного класса технологических объектов доказана.

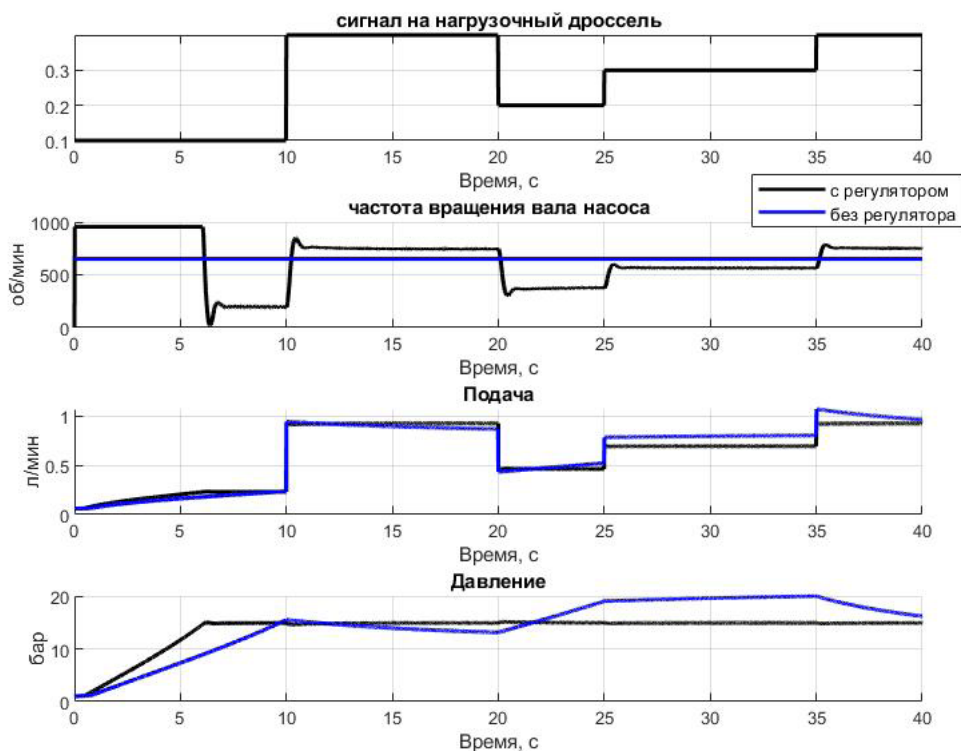


Рис. 9. Зависимости частоты вращения вала насоса, подачи, давления пара при уставке давления 15 бар и изменяющейся нагрузке в форсунке.

Fig. 9. Interrelationship of pump shaft speed, pump displacement, steam pressure at 15 bar and variable load in the injection nozzle

### Выводы

Разработанная компьютерная модель радиально-плунжерного насоса подачи воды и системы управления позволяет анализировать динамические характеристики и оценивать устойчивость работы узла подачи воды в условиях, характерных для пароплазменного горелочного устройства мощностью до 1 МВт.

Установленные на основе моделирования оптимальные коэффициенты ПИ-регулятора (коэффициент пропорционального звена  $K_p = 20,5033$

и коэффициент интегрального звена  $K_i = 10,14$ ) обеспечивают высокую скорость выхода системы на установившийся режим (5 бар – 2,5 сек., 10 бар – 4 сек., 15 бар – 6,2 сек.) и точность поддержания заданного давления (5 бар – 4%, 10 бар – 2,5%, 15 бар – 2,5%).

Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного подхода к стабилизации давления пара и могут быть использованы при дальнейшей оптимизации систем автоматического управления жидкотопливными горелками.

### Список источников

1. Yunli G., Chang Ch., Ju Na. Statistical analysis of fuel combustion and emissions considering the adverse effects of investment economic environment: Exploring alternatives amid oil prices Swings, digital economy, and local market inflation. *Heliyon*. 2024;10(18): e37207. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37207>
2. Osman A.I., Chen L., Yang M. et al. Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2023;21(2):741-764. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01532-8>
3. Грищенко В.И., Медведев Д.Д., Цымбалов Д.С., Яценко О.В. Теоретическое и экспериментальное исследование токсичности дымовых газов жидкотопливного горелочного устройства с двухфакторной активацией внутрикамерных процессов // Обеспечение безопасности: производственной, пожарной, экологической: Материалы I Всероссийской (Национальной) научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 12-13 декабря 2023 г. Ростов-на-Дону, 2023. С. 251-253. EDN: RSJKUQ

### References

1. Yunli G., Chang Ch., Ju Na. Statistical analysis of fuel combustion and emissions considering the adverse effects of investment economic environment: Exploring alternatives amid oil prices Swings, digital economy, and local market inflation. *Heliyon*. 2024;10(18): e37207. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37207>
2. Osman A.I., Chen L., Yang M. et al. Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2023;21(2):741-764. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01532-8>
3. Grishchenko V.I., Medvedev D.D., Tsymbalov D.S., Yatsenko O.V. Theoretical and experimental study of the toxicity of flue gases from a liquid fuel burner device with two-factor activation of intra-chamber processes. *Obespechenie bezopasnosti: proizvodstvennoy, pozharnoy, ekologicheskoy* [Ensuring safety: industrial, fire, environmental aspects]: Proceedings of the First All-Russian (National) Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, December 12-13, 2023. Rostov-on-Don, 2023. Pp. 251-253. (In Russ.)

4. Bolegenova S., Askarova A., Georgiev A. et al. The use of plasma technologies to optimize fuel combustion processes and reduce emissions of harmful substances. *Energy*. 2023;277:127635. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127635>
5. Nagar V., Kaushal R. A review of recent advancement in plasma gasification: A promising solution for waste management and energy production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;77:405-419. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.180>
6. Пароплазменное горелочное устройство с внутрицикловой газификацией топлива: Патент № 2769172 C1 Российская Федерация, МПК F23C99/00. № 2021116039 / В.М. Шипилов, В.Л. Артеменко, С.Г. Никольский, Б.Ч. Месхи: заявл. 03.06.2021; Опубл. 29.03.2022. EDN: EKQVDE
7. Электрический индукционный пароперегреватель: Патент на полезную модель № 231993 U1 Российская Федерация, МПК H05B6/10 / В.М. Шипилов, Х.М. Махьянов, В.Л. Артеменко; заявл. 16.12.2024; Опубл. 20.02.2025. EDN: GVOZNF
8. Медведев Д.Д., Грищенко В.И., Ивлиев Е.А., Сидоренко В.С. Математическое моделирование гидравлического плунжерного насоса малого расхода // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 12. С. 335-342. EDN: HXRGTX
9. Beskopylny A.N., Medvedev D., Grishchenko V., Ivliev E. Development of a small-working-volume plunger hydraulic pump with improved performance characteristics. *Actuators*. 2025;14(1):34. <https://doi.org/10.3390/act14010034>
10. Бараниченко В.В., Грищенко В.И., Цымбалов Д.С., Яценко О.В. Косвенное определение дисперсности распыленного топлива по геометрии зоны пятна смачивания // Инженерный вестник Дона. 2023. № 12 (108). С. 593-601. EDN: EMHIEY
11. Романова М.Н., Лебедев А.Е., Ватагин А.А., Лебедев Д.В. Определение гидродинамических характеристик однородных и двух несмешивающихся жидкостей // Инженерный вестник Дона. 2019. № 2 (53). С. 66. EDN: UIEZWD
12. Mitov A., Slavov T., Kralej J. Comparison of advanced multivariable control techniques for axial-piston pump. *Processes*. 2024;12(9):1797. EDN: NWWUHM
13. Bin Roslan M.N., Bingi K., Devan P.A.M., Ibrahim R. Design and development of complex-order pi-pd controllers: Case studies on pressure and flow process control. *Applied System Innovation*. 2024;7(3):33. EDN: WWYTNA
4. Bolegenova S., Askarova A., Georgiev A. et al. The use of plasma technologies to optimize fuel combustion processes and reduce emissions of harmful substances. *Energy*. 2023;277:127635. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127635>
5. Nagar V., Kaushal R. A review of recent advancement in plasma gasification: A promising solution for waste management and energy production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;77:405-419. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.180>
6. Shipilov V.M., Artemenko V.L., Nikolsky S.G., Meskhi B. Ch. Steam plasma burner device with in-cycle gasification of fuel: Patent, No. 2769172 C1 Russian Federation, IPC F23C99/00. No. 2021116039: applied on 03.06.2021: issued on 29.03.2022. (In Russ.)
7. Shipilov V.M., Makhyanov Kh.M., Artemenko V.L. Electric induction steam superheater: Patent for utility model No. 231993 U1 Russian Federation, IPC H05B6/10. Applied on 16.12.2024: issued on 20.02.2025. (In Russ.)
8. Medvedev D.D., Grishchenko V.I., Ivliev E.A., Sidorenko V.S. Mathematical modelling of a low-flow hydraulic plunger pump. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskije nauki*. 2023;12:335-342. (In Russ.)
9. Beskopylny A.N., Medvedev D., Grishchenko V., Ivliev E. Development of a small-working-volume plunger hydraulic pump with improved performance characteristics. *Actuators*. 2025;14(1):34. <https://doi.org/10.3390/act14010034>
10. Baranichenko V.V. et al. Indirect determination of the dispersity of atomized fuel from the geometry of the wetting spot zone. *Engineering Journal of Don*. 2023;12 (108):50. (In Russ.)
11. Romanova M.N., Lebedev A.E., Vatagin A.A., Lebedev D.V. Determination of the hydrodynamic characteristics of homogeneous and two immiscible liquids. *Engineering Journal of Don*. 2019;2(53):66.
12. Mitov A., Slavov T., Kralej J. Comparison of advanced multivariable control techniques for axial-piston pump. *Processes*. 2024;12(9):1797.
13. Bin Roslan M.N., Bingi K., Devan P.A.M., Ibrahim R. Design and development of complex-order pi-pd controllers: Case studies on pressure and flow process control. *Applied System Innovation*. 2024;7(3):33.

#### Информация об авторах

- <sup>1</sup>Медведев Денис Дмитриевич, инженер, преподаватель;  
19medvedev97@mail.ru;  
<https://orcid.org/0000-0003-3047-711X>
- <sup>2</sup>Грищенко Вячеслав Игоревич, канд. техн. наук, заведующий кафедрой; vig84@yandex.ru;  
<https://orcid.org/0000-0003-1422-2811>
- <sup>1,2</sup>Донской государственный технический университет, 344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

#### Вклад авторов

Д.Д. Медведев – проведение исследований, сбор и обработка данных, формальный анализ, подготовка черновика рукописи, визуализация;  
В.И. Грищенко – руководство исследованиями, концептуализация, методология, научное редактирование и доработка окончательной версии рукописи.

Статья поступила 13.10.2025, после рецензирования и доработки 24.03.2026, принята к публикации 26.03.2026

#### Author Information

- Denis D. Medvedev<sup>1</sup>, engineer, lecturer;  
19medvedev97@mail.ru<sup>✉</sup>;  
<https://orcid.org/0000-0003-3047-711X>
- Vyacheslav I. Grishchenko<sup>2</sup>, CSc (Eng), Head of Department;  
vig84@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1422-2811>
- <sup>1,2</sup>Don State Technical University; 344003, Russia, Rostov-on-Don, Gagarin Sq. 1

#### Author Contribution

D.D. Medvedev – investigation, data curation, formal analysis, writing – original draft, visualization;  
V.I. Grishchenko – research supervision, conceptualization, methodology, writing – review and editing of the manuscript.

Received 13.10.2025; Revised 24.03.2026; Accepted 26.03.2026

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.313.282:634.1-13

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-92-102>**Линейный электродвигатель для электрифицированного секатора****Г.В. Никитенко<sup>1</sup>✉, С.Н. Антонов<sup>2</sup>, М.А. Мастепаненко<sup>3</sup>, И.В. Каланчук<sup>4</sup>**<sup>1,2,3,4</sup> Ставропольский государственный аграрный университет; г. Ставрополь, Россия<sup>1</sup> [nikitenko\\_gv@mail.ru](mailto:nikitenko_gv@mail.ru); <http://orcid.org/0000-0003-2797-0755><sup>2</sup> [antonov\\_serg@mail.ru](mailto:antonov_serg@mail.ru); <http://orcid.org/0000-0001-8931-269X><sup>3</sup> [mma\\_26@inbox.ru](mailto:mma_26@inbox.ru); <http://orcid.org/0000-0002-8684-118X><sup>4</sup> [igor.kalanchuk@gmail.com](mailto:igor.kalanchuk@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0000-8956-0626>

**Аннотация.** Ручные и электрические секаторы, используемые при обрезке деревьев в промышленном садоводстве, являются недостаточно эффективными. Электрифицированный секатор с усовершенствованным магнитопроводом (статором и якорем электродвигателя) и оптимальными энергетическими характеристиками будет способствовать эффективному развитию отрасли. Исследования проведены с целью разработки линейного электродвигателя (ЛЭД) для привода ручного электрифицированного секатора и адаптации его технических характеристик (силы резания) к условиям промышленного садоводства. В предлагаемой конструкции ЛЭД усилие резания создается двумя намагничивающими катушками (рабочей и пусковой). Первая катушка установлена на неподвижный магнитопровод, вторая расположена на магнитной системе, имеющей немагнитную вставку. Линейный размер немагнитной вставки якоря варьировался и достигал 5, 10 и 15 мм. Теоретические значения силы тяги якоря в зависимости от размера немагнитной вставки, полученные моделированием в программе ElCut, сравнивали с экспериментальными данными. Результаты исследований показали, что чем длиннее немагнитная вставка, тем больше длина эффективного хода второй (пусковой) катушки. Для немагнитной вставки размером 5 мм длина хода составила 3 мм, а у вставки 15 мм – 9 мм соответственно. Установлено, что с увеличением размера немагнитной вставки пусковое усилие снижается с 27 до 17 Н. Суммарное усилие, создаваемое двумя намагничивающими катушками, позволяет в начальный момент осуществить перемещение системы на холостом ходу, а в конце рабочего хода при действии первой (рабочей) катушки реализовать процесс резания ветки диаметром 6 мм с нарастающим усилием от 25 до 132 Н. Теоретические значения суммарной силы тяги практически совпадают с экспериментальной кривой. Полученные характеристики силы резания ветки и работы линейного электродвигателя можно использовать при проектировании ручных электрифицированных секаторов.

**Ключевые слова:** садоводство; обрезка деревьев; линейный электродвигатель; электродвигатель для электрифицированного секатора; секатор; процесс резания; магнитопровод; немагнитная вставка

**Благодарности.** Статья подготовлена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2025-591) в рамках реализации мероприятий программы развития научного центра мирового уровня «Агроинженерия будущего» Ставропольского ГАУ, утвержденной протоколом заседания президиума Комиссии по научно-технологическому развитию Российской Федерации от 29 мая 2025 г. № 3.

**Для цитирования:** Никитенко Г.В., Антонов С.Н., Мастепаненко М.А., Каланчук И.В. Линейный электродвигатель для электрифицированного секатора // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 2. С. 92-102. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-92-102>

## ORIGINAL ARTICLE

## Linear electric motor for an electric pruner

G.V. Nikitenko<sup>1</sup>, S.N. Antonov<sup>2</sup>, M.A. Mastepanenko<sup>3</sup>, I.V. Kalanchuk<sup>4</sup><sup>1,2,3,4</sup> Stavropol State Agrarian University; Stavropol, Russia<sup>1</sup>nikitenko\_gv@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2797-0755><sup>2</sup>antonov\_serg@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8931-269X><sup>3</sup>mma\_26@inbox.ru; <http://orcid.org/0000-0002-8684-118X><sup>4</sup>igor.kalanchuk@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0000-8956-0626>

**Abstract.** Manual and electric pruners used for tree pruning in industrial horticulture are insufficiently effective. An electric pruner with an improved magnetic circuit (a stator and an armature of the electric motor) and optimal energy characteristics will contribute to the effective development of the industry. The research aimed to develop a linear electric motor (LEM) for driving a manual electric pruner and to adapt its technical characteristics (cutting force) to the conditions of industrial horticulture. In the proposed LEM design, the cutting force is generated by two magnetizing coils (working and starting). The first coil is mounted on a stationary magnetic circuit, while the second is located on a magnetic system featuring a non-magnetic insert. The linear dimension of the armature non-magnetic insert was varied to 5, 10, and 15 mm. Theoretical values of the armature traction force depending on the size of the non-magnetic insert, obtained through simulation in the ElCut software, were compared with experimental data. The research results showed that the longer the non-magnetic insert, the greater the effective stroke length of the second (starting) coil. For a non-magnetic insert size of 5 mm, the stroke length was 3 mm, while for a 15 mm insert, it was 9 mm, respectively. It was established that with an increase in the size of the non-magnetic insert, the starting force decreases from 27 to 17 N. The total force generated by the two magnetizing coils enables the system to move at idle at the initial moment. At the end of the working stroke, under the action of the first (working) coil, a 6 mm diameter branch is cut with a force increasing from 25 to 132 N. The theoretical values of the total traction force practically coincide with the experimental curve. The obtained characteristics of the branch cutting force and the operation of the linear electric motor can be used in the design of manual electrified pruners.

**Keywords:** horticulture; tree pruning; linear electric motor; electric motor for electric pruners; pruner; cutting process; magnetic circuit; non-magnetic insert

**Funding.** The article was prepared with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2025-591) as part of the implementation of the development program for the World-Class Scientific Center “Agroengineering of the Future” of Stavropol State Agrarian University, approved by the minutes of the meeting of the Presidium of the Commission for the Scientific and Technological Development of the Russian Federation on May 29, 2025, No. 3.

**For citation:** Nikitenko G.V., Antonov S.N., Mastepanenko M.A., Kalanchuk I.V. Linear electric motor for an electric pruner. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(2):92-102 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-92-102>

### Введение

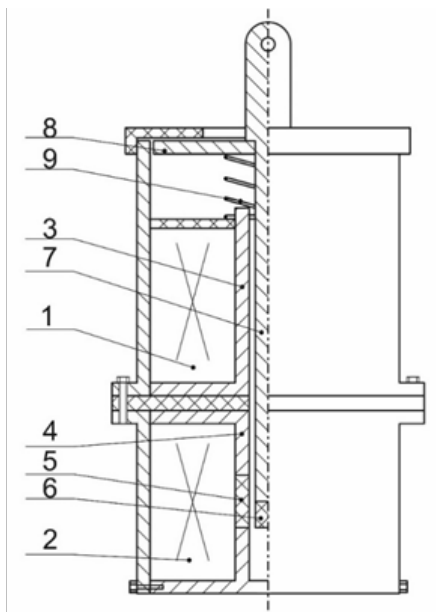
Низкий уровень механизации и автоматизации технологических процессов садоводства препятствует эффективному развитию отрасли [1]. Самым продолжительным и трудоемким процессом является детальная обрезка деревьев. Разработанные различные механизированные и электрифицированные инструменты не нашли широкого применения в садах промышленного типа<sup>1</sup> [2]. Недостатками

пневмо- и гидравлических инструментов являются низкий КПД, потери при передаче энергии и необходимость использования дополнительного оборудования. Электрифицированный инструмент на основе щеточных машин постоянного тока отличается низкой эксплуатационной надежностью и необходимостью преобразования вращательного движения якоря электродвигателя в поступательное движение рабочего органа инструмента [3-5].

<sup>1</sup> Апажев А.К., Хагажеев Х.Х., Абдулхаликов Р.З. и др. Теоретические основы разработки технологии и технических решений по уходу за кроной плодовых насаждений в садах на склоновых землях Кабардино-Балкарской Республики, обеспечивающих получение экологически чистой продукции. Нальчик: ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ, 2024. 132 с. EDN: EDJDFQ.

Использование линейного электродвигателя (ЛЭД) позволяет устранить данные недостатки<sup>2,3</sup>. Линейные электродвигатели применяются в отраслях народного хозяйства, где требуется высокоточное и скоростное перемещение рабочего органа в пространстве [7, 8]. Применение линейного электродвигателя в ручных инструментах для ухода за промышленными садами и, в частности, для привода в секаторах позволит повысить эффективность обрезки [9].

Зарубежными учеными проводятся активные научные исследования линейных электродвигателей, применяемых в различных технологических процессах [10-12]. В России широкому внедрению ЛЭД препятствует отсутствие научно обоснованных рекомендаций по их разработке и применению в садоводческих хозяйствах в качестве элемента привода электрифицированного инструмента.



**Рис. 1. Линейный электродвигатель (ЛЭД):**

- 1, 2 – первая и вторая намагничивающие катушки;
- 3 – магнитопровод; 4 – магнитная система;
- 5 – немагнитная вставка; 6 – немагнитная втулка;
- 7 – магнитная втулка; 8 – подвижный магнитопровод;
- 9 – пружина

**Fig. 1. Linear electric motor (LEM):**

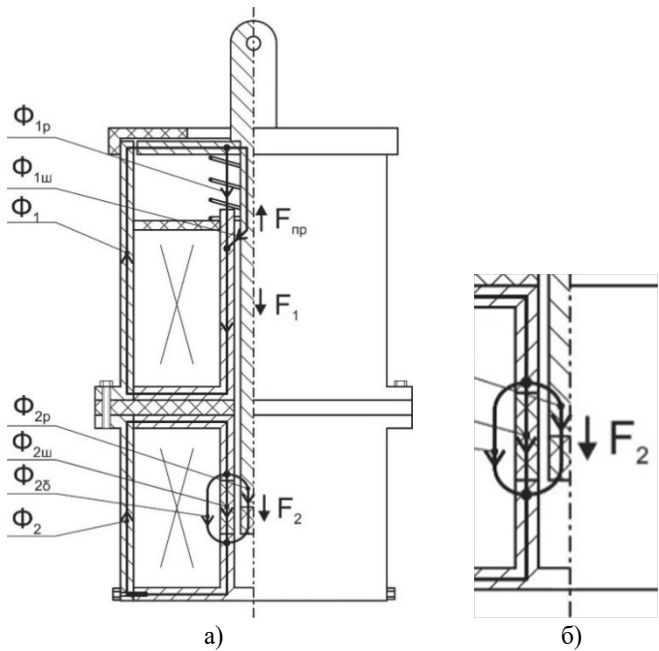
- 1, 2 – first and second magnetizing coils; 3 – magnetic core;
- 4 – magnetic system; 5 – non-magnetic insert;
- 6 – non-magnetic bushing; 7 – magnetic bushing;
- 8 – movable magnetic core; 9 – spring

**Цель исследований:** разработать ЛЭД для привода ручного электрифицированного секатора и адаптировать его технические характеристики под производственные условия.

**Материалы и методы**

В качестве привода для электрифицированного секатора предлагается линейный электродвигатель с двумя намагничивающими катушками 1 и 2 (рис. 1). Первая катушка установлена на неподвижный магнитопровод 3. Вторая катушка расположена на магнитной системе 4, имеющей немагнитную вставку 5. Якорь линейного электродвигателя выполнен из немагнитной втулки 6, магнитной втулки 7 и подвижного магнитопровода 8. Для возврата якоря в исходное положение используется пружина 9 [13].

Линейный электродвигатель работает следующим образом. При отсутствии питания на намагничивающих катушках якорь занимает верхнее положение под действием пружины (рис. 2). При подаче напряжения на первую и вторую намагничивающие катушки по ним начинает протекать ток, который создает



**Рис. 2. Основные магнитные потоки в начале работы ЛЭД:**

- а – общий вид; б – фрагмент с немагнитной вставкой

**Fig. 2. Main magnetic fluxes at the start of the LEM operation:**

- а – general view; б – fragment with a non-magnetic insert

<sup>2</sup> Усанов К.М., Каргин В.А., Моисеев А.П., Волгин А.В. Дискретные электромагнитные приводы в процессах и технологиях сельхозпроизводства и АПК: Монография. Саратов: Общество с ограниченной ответственностью «Амирит», 2021. 184 с. EDN: EOPABD.

<sup>3</sup> Усанов К.М., Мошкин В.И., Каргин В.А., Волгин А.В. Линейные электромагнитные двигатели и приводы в импульсных процессах и технологиях: Монография. Курган: Курганский государственный университет, 2015. 202 с. EDN: VPDVEP

магнитные потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . Магнитный поток  $\Phi_1$ , проходя по магнитному корпусу и подвижному магнитопроводу, разделяется на два основных потока  $\Phi_{1p}$  и  $\Phi_{1ш}$ , которые суммируются в неподвижном магнитопроводе.

Магнитный поток  $\Phi_2$ , проходя по магнитному корпусу второй катушки, разделяется на три основных потока  $\Phi_{2p}$  и  $\Phi_{2ш}$  и  $\Phi_{2\delta}$  ввиду наличия немагнитной вставки, а затем потоки суммируются в магнитопроводе. В результате прохождения магнитных потоков  $\Phi_{1p}$  и  $\Phi_{2p}$  возникают силы  $F_1$  и  $F_2$ , которые приводят к перемещению якоря в нижнее положение (рис. 3). При отключении питания от намагничивающих катушек якорь под воздействием пружины возвращается в верхнее положение.

Линейный электродвигатель имеет две намагничивающие катушки и магнитопровод статора, который отделен воздушным зазором от магнитной системы якоря. Большое магнитное сопротивление воздушного зазора не позволяет создать достаточную силу тяги якоря в момент пуска при подаче напряжения на первую намагничивающую катушку. Поэтому для повышения тягового усилия в момент трогания к источнику питания одновременно подключаются две намагничивающие катушки электродвигателя. Кроме того, величина начального усилия трогания якоря зависит от линейного размера – длины немагнитной вставки ( $h$ ) (рис. 4), что требует дополнительного теоретического исследования. При этом отметим, что длина воздушного зазора ( $l$ ) равна длине рабочего хода – 15 мм.

Изучение влияния размера немагнитной вставки якоря на величину тягового усилия электродвигателя проводили для разных конструкций магнитной системы с длиной вставок ( $h$ ) 5, 10, 15 мм. Максимальное значение этой длины обусловлено длиной хода якоря (15 мм), а минимальное – возможностью появления магнитных потоков  $\Phi_{2p}$  и  $\Phi_{2ш}$  и  $\Phi_{2\delta}$ , создающих силу трогания якоря.

Расчеты производили с помощью программного пакета ElCut, предназначенного для инженерного моделирования двумерных электромагнитных полей методом конечных элементов.

При создании компьютерной модели ЛЭД учитывали геометрию ЛЭД и свойства сред (воздуха, изотропных и ортотропных материалов, изотропных ферромагнетиков, проводников с током), источники поля (ток распределенный или сосредоточенный, плотность тока, постоянный магнит или однородное внешнее поле) и граничные условия (условие Дирихле). С помощью интегрального калькулятора и мастера индуктивностей были рассчитаны магнитная индукция, магнитный потенциал, напряженность магнитного поля, сила, энергия магнитного поля, потокосцепление, индуктивность.

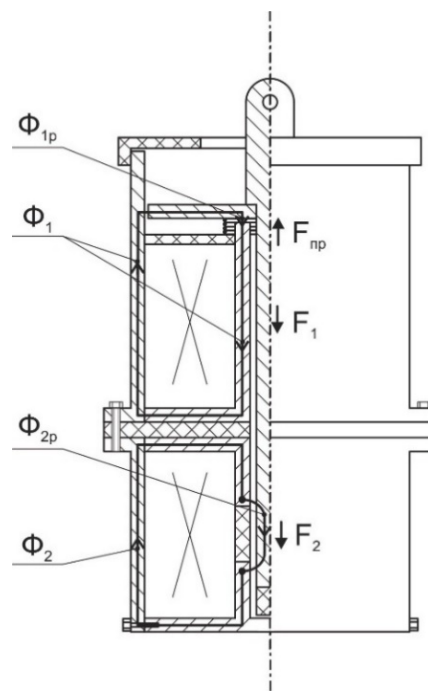


Рис. 3. Основные магнитные потоки в конце работы ЛЭД

Fig. 3. Main magnetic fluxes at the end of the LEM operation

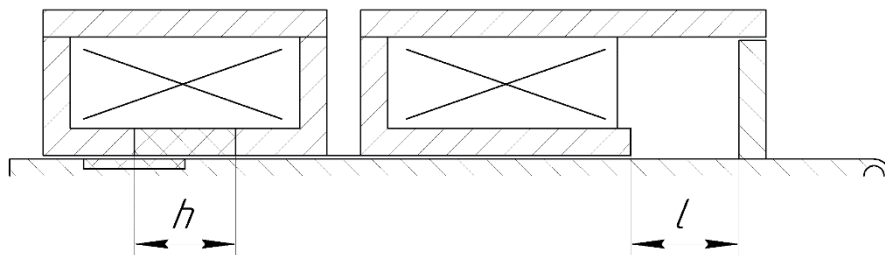


Рис. 4. Расположение немагнитной вставки

Fig. 4. Location of the non-magnetic insert

**Результаты и их обсуждение**

Моделирование ЛЭД началось с построения геометрической модели и задания свойств материалов и граничных условий. Далее автоматический генератор сетки покрывает сечение электродвигателя треугольными конечными элементами (рис. 5).

Сетку построили таким образом, чтобы ее плотность была выше в местах прохождения основных магнитных потоков, которые создают силу тяги якоря.

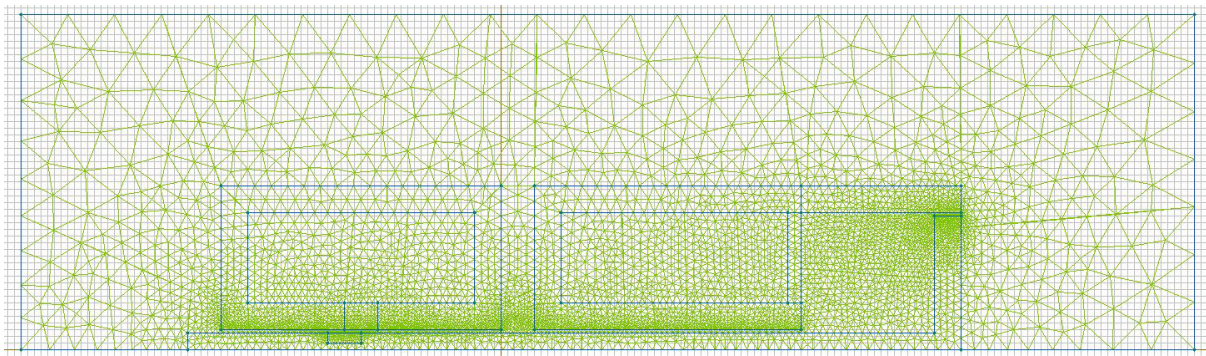
Параметры питания катушек намагничивания задали в виде плотности тока, в размере 12 А/мм<sup>2</sup>, что соответствует повторно-кратковременному режиму работы электродвигателя.

По результатам расчета магнитной системы ЛЭД в программном комплексе ElCut получили картины распределения магнитных силовых линий (рис. 6).

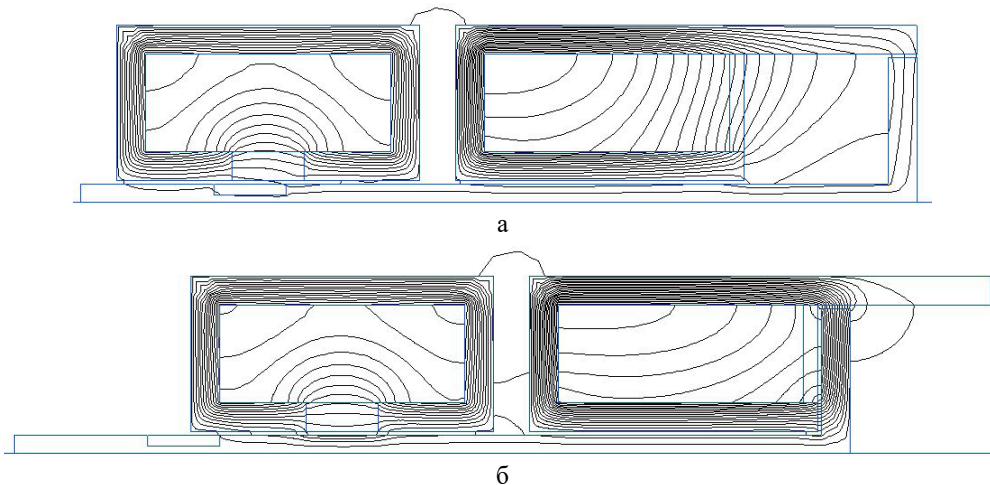
Перемещая якорь ЛЭД от начального до конечного положения с шагом 2 мм, определили силу тяги, создаваемую магнитной системой при отдельном и одновременном включении катушек 1 и 2 (рис. 7).

Анализируя данные рисунка 7, можно сделать вывод: для второй (пусковой) катушки характерна начальная сила трогания в диапазоне 27...38 Н, что достаточно для начала движения якоря. При дальнейшем перемещении якоря усилие достигает максимального значения, а потом резко падает практически до нуля. Отметим, что чем длиннее немагнитная вставка, тем более максимум усилия сдвигается в сторону увеличения хода. Например, при длине немагнитной вставки 5 мм пусковая сила тяги равна 27 Н, а при перемещении якоря на 2 мм достигается максимум 38 Н. При использовании в конструкции магнитопровода якоря электродвигателя немагнитной вставки длиной 15 мм пусковое усилие составляет 17 Н, а максимальное значение 23,5 Н достигается при перемещении якоря на 6 мм.

Во всех рассмотренных магнитных системах показатели начальной силы тяги для первой намагниченной катушки не превышают 10 Н. Максимальное усилие 132 Н всегда достигается в конечном положении якоря.

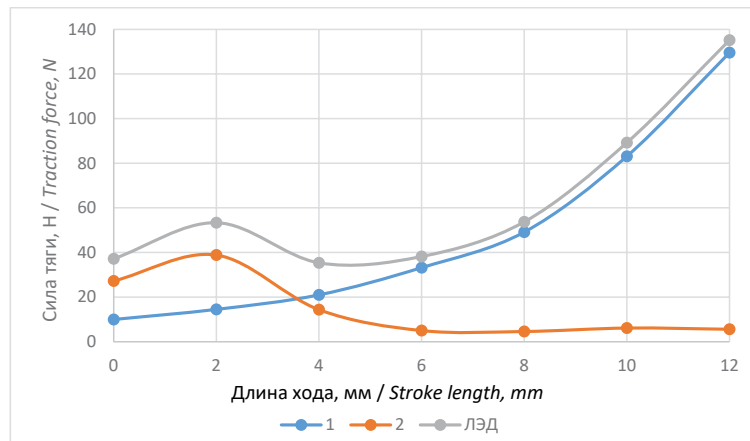


**Рис. 5. Сетка конечных элементов**  
**Fig. 5. Finite element mesh**

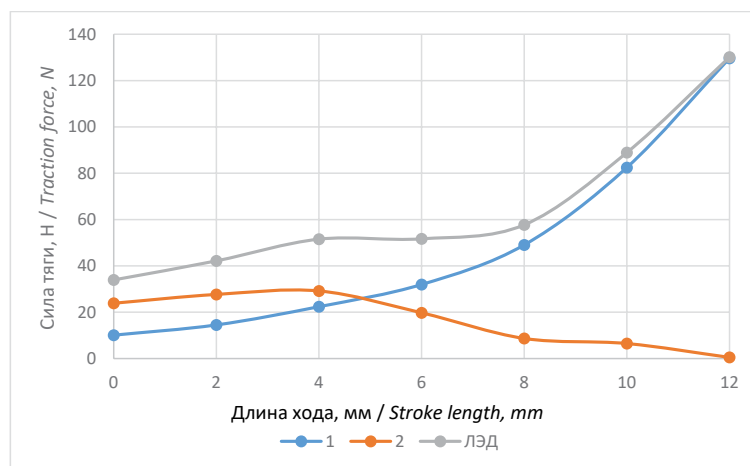


**Рис. 6. Картина распределения силовых магнитных линий ЛЭД:**  
а – в начале рабочего хода; б – в конце рабочего хода

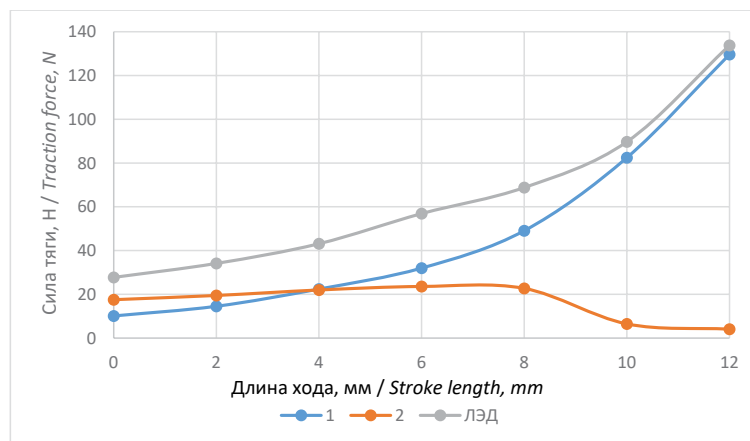
**Fig. 6. Magnetic field line distribution pattern of the LEM:**  
a – at the beginning of the working stroke; б – at the end of the working stroke



а



б



в

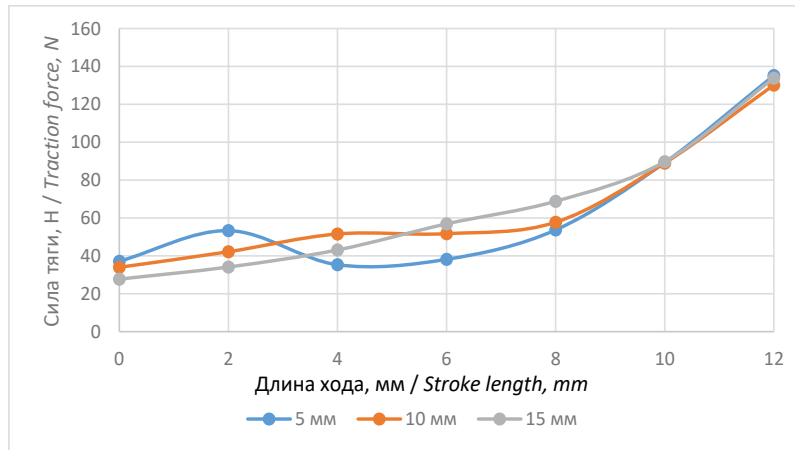
**Рис. 7. Сравнение силовых характеристик линейного электродвигателя при перемещении якоря и различной длине немагнитной вставки: а – 5 мм; б – 10 мм; в – 15 мм**

**Fig. 7. Comparison of force characteristics of the linear electric motor in different operating modes: а – with a non-magnetic insert of 5 mm; б – 10 mm; в – 15 mm**

Значение силы тяги линейного электродвигателя (рис. 8) при длине вставки 15 мм нелинейно возрастает и не имеет явно выраженного снижения на 4 мм по сравнению с вставкой длиной 5 мм. Снижение общего усилия может приводить к заклиниванию ветки между лезвиями секатора в процессе резания.

Для подтверждения результатов компьютерного моделирования магнитной системы линейного электродвигателя спроектирован и изготовлен опытный образец двигателя с немагнитной вставкой якоря длиной 15 мм (рис. 9).

Одним из показателей работы ЛЭД является график изменения силы тяги якоря в функции его



**Рис. 8. Сравнение силы тяги якоря при одновременной работе двух катушек намагничивания и различной длине немагнитной вставки**  
**Fig. 8. Comparison of the armature traction force with simultaneous operation of the magnetizing coils for different sizes of the non-magnetic insert**

перемещения. Для экспериментального снятия графической зависимости изготовлен лабораторный стенд, состоящий из системы крепления для ЛЭД, датчика динамометра и подвижной платформы (рис. 10). При подаче на намагничивающую катушку напряжения 20 В якорь начинает перемещаться, и показания с датчика усилия автоматически передаются на персональный компьютер для записи в базу данных. Замеры проводятся от начального положения якоря до конечного с шагом 2 мм.



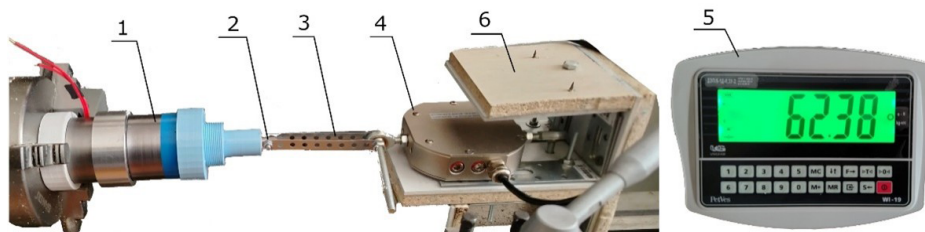
**Рис. 9. Опытный образец ЛЭД**  
**Fig. 9. Prototype of the LEM**

Результаты измерений динамического процесса перемещения якоря выводятся в цифровом варианте на экран дисплея.

Измерения проводили отдельно: для намагничивающих катушек 1, 2 и при их совместной работе (рис. 11).

Анализируя экспериментальные данные (рис. 11), отметим, что для второй (пусковой) намагничивающей катушки начальная сила тяги равна 10 Н, а максимум усилия 23,6 Н достигается при длине хода 8 мм. Дальнейшее перемещение якоря приводит к снижению усилия до 5 Н. Это говорит о том, что магнитная система второй намагничивающей катушки приходит в магнитное равновесие.

Первая намагничивающая катушка в момент пуска (рис. 11) развивает силу тяги, равную 11 Н. В процессе перемещения якоря и достижения им хода 6 мм сила тяги повышается до 23 Н и достигает своего максимального значения 128 Н в конце движения. Резкий скачок тягового усилия связан с уменьшением воздушного зазора (*l*) (рис. 4), и как следствие – со снижением магнитного сопротивления ЛЭД.



**Рис. 10. Стенд для исследования тяговых характеристик ЛЭД:**  
 1 – ЛЭД; 2 – якорь ЛЭД; 3 – соединительная штанга; 4 – датчик динамометра; 5 – табло динамометра; 6 – устройство крепления датчика динамометра

**Fig. 10. Test bench for investigating the traction characteristics of the LEM:**  
 1 – LEM; 2 – LEM armature; 3 – connecting rod; 4 – dynamometer sensor; 5 – dynamometer display; 6 – dynamometer sensor mounting device

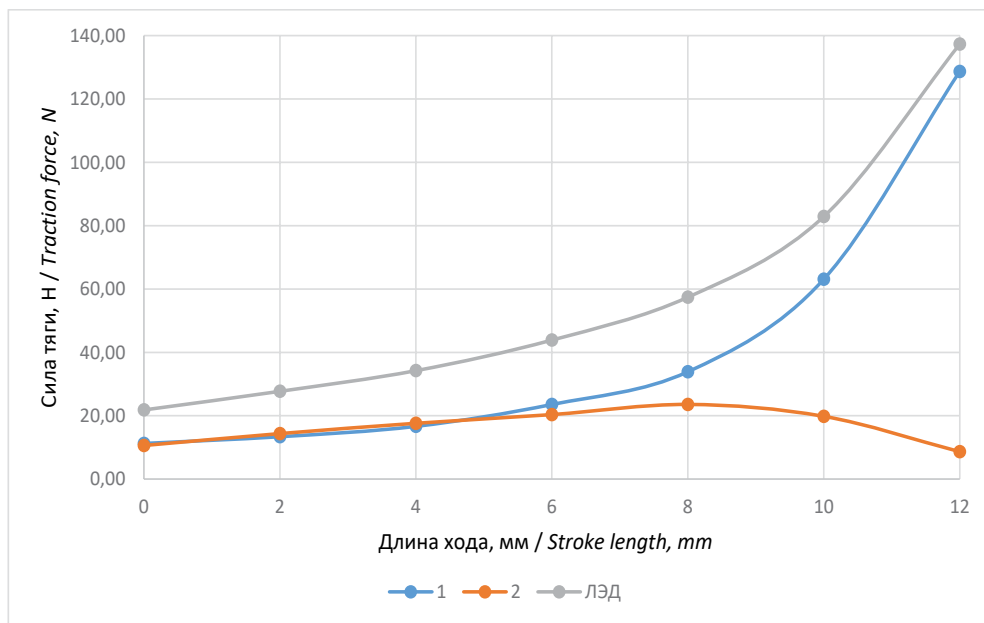


Рис. 11. Экспериментальные значения силы тяги якоря в функции длины хода якоря линейного электродвигателя

Fig. 11. Experimental values of the armature traction force as a function of the LEM armature stroke length

Анализируя графические зависимости при раздельной работе двух намагничивающих катушек ЛЭД, можно сделать вывод о том, что экспериментальные данные силы тяги якоря пусковой катушки в момент пуска меньше расчетных данных на 40% (рис. 12). Это отличие связано с неточностью при изготовлении немагнитной вставки. Для первой намагничивающей катушки отличие теоретических и практических результатов составляет не более 5% (рис. 13).

Полученный расчетным путем график суммарной силы тяги при одновременной работе двух намагничивающих катушек практически совпадает с экспериментальной кривой (рис. 14).

Для устойчивого процесса перерезания веток деревьев необходимо, чтобы усилие, развиваемое

на якорь электродвигателя, было больше сопротивления древесины (рис. 15).

Сопоставляя полученные данные при резании ветки диаметром 6 мм и силы, создаваемой линейным электродвигателем, можно сказать, что при пуске второй катушки создается сила, достаточная для перемещения всех элементов рабочей машины на холстом ходу. Достигая длины хода 8 мм, сила резко снижается (рис. 12) по причине наступления магнитного равновесия, созданного второй катушкой, и при этом увеличивается сила тяги первой катушки. Сила тяги, создаваемая первой катушкой при дальнейшем движении якоря, начинает увеличиваться, достигая значения 23 Н при длине хода 6 мм (рис. 13). Суммарная сила тяги (рис. 15), создаваемая двумя катушками

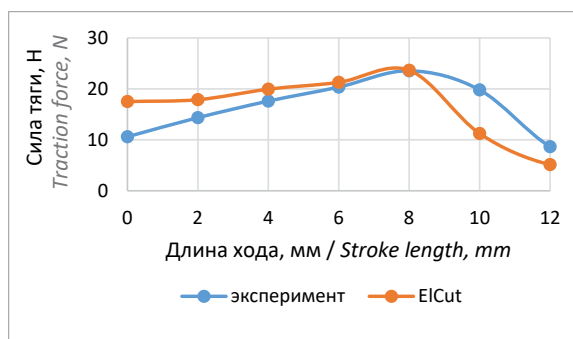


Рис. 12. Сила тяги якоря второй (пусковой) катушки в зависимости от длины хода якоря линейного электродвигателя

Fig. 12. Traction force of the second (starting) coil armature as a function of the LEM armature stroke length

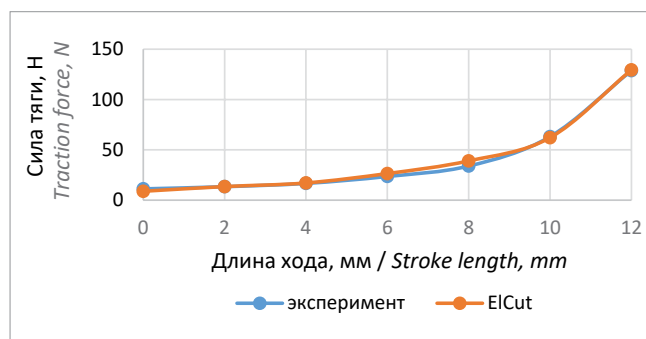


Рис. 13. Сила тяги якоря первой катушки в зависимости от длины хода якоря линейного электродвигателя

Fig. 13. Traction force of the first coil armature as a function of the LEM armature stroke length

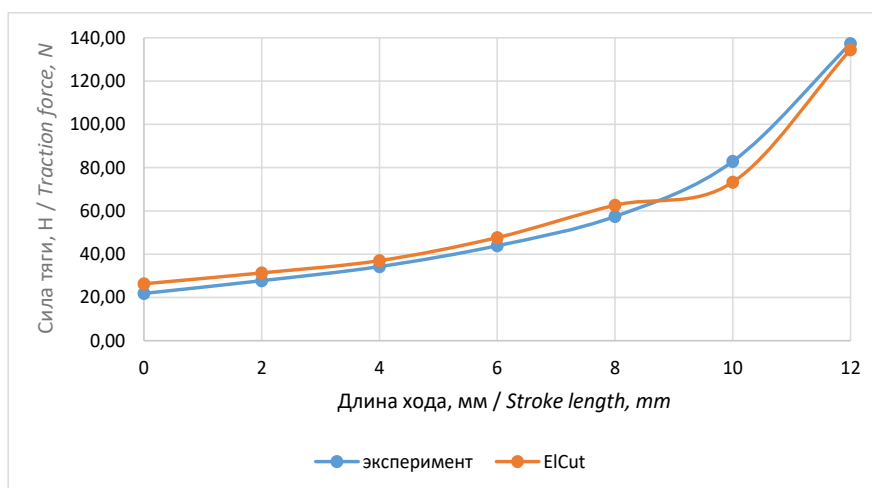


Рис. 14. Суммарная сила тяги якоря линейного электродвигателя в зависимости от длины хода

Fig. 14. Total armature traction force of the linear electric motor as a function of the stroke length

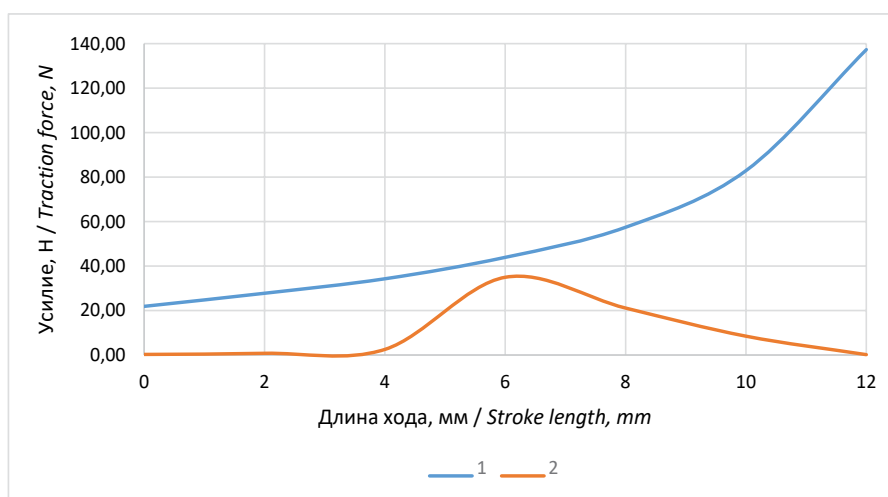


Рис. 15. Зависимость изменения силы от длины хода:

1 – сила тяги якоря ЛЭД; 2 – сила, затрачиваемая рабочей машиной при резании ветки диаметром 6 мм

Fig. 15. Force variation as a function of stroke length:

1 – pulling force of the LEM armature; 2 – force required by the machine when cutting of a 6 mm diameter branch

в момент пуска, равна 21 Н, что достаточно для начала перемещения системы «Якорь (ЛЭД) – рабочая машина (лезвие)» на холостом ходу. При достижении лезвием секатора ветки диаметром 6 мм длина хода якоря равна 4 мм. В этот момент начинается процесс резания с достижением максимума усилий в 35 Н при длине хода якоря 6 мм с последующим его снижением. При дальнейшем перемещении лезвия по древесине происходит снижение силы резания до полного перерезания ветки. В это же время происходит увеличение усилия, создаваемого на якоре ЛЭД, до 137 Н, что необходимо для получения более качественного среза древесины без его замятия.

### Выводы

1. Компьютерное моделирование ЛЭД показало, что совместное использование двух

намагничивающих катушек (пусковой и рабочей) позволяет создать достаточное начальное усилие 28 Н с последующим нарастанием силы тяги на якоре до 132 Н.

2. Экспериментальные исследования силы тяги ЛЭД показали, что для конструкции магнитопровода якоря с немагнитной вставкой длиной 15 мм в момент пуска развиваемое усилие равно 21 Н, а в конце рабочего хода оно достигает максимальной величины 137 Н.

3. Экспериментальное резание ветки диаметром 6 мм показало устойчивую работу привода с достижением максимума силы резания 35 Н при длине хода якоря 6 мм и последующее его снижение. При этом сила тяги якоря продолжает нарастать до 137 Н, обеспечивая качественный срез.

## Список источников

1. Тавасиев Р.М. Обоснование энергетического средства для крестьянских (фермерских) хозяйств // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2007. № 11. С. 42-43. EDN: ICCUGV
2. Кудзаев А.Б., Тавасиев Р.М. Обоснование конструктивно-технологической схемы обрезчика ветвей // Известия Горского государственного аграрного университета. 2009. Т. 46, № 2. С. 82-86. EDN: MVJLDD
3. Тавасиев Р.М., Кудзаев А.Б., Туриев О.И. Математическая модель гидравлической цепи обрезчика ветвей // Аграрная наука. 2008. № 9. С. 13. EDN: JUYNPD
4. Алхудов Т.М., Шекихачев Ю.А. Разработка и исследование садовой пилы с электрическим приводом // АгроЭкоИнфо. 2020. № 1 (39). С. 15. EDN: FPVRHT
5. Усанов К.М., Каргин В.А., Волгин А.В., Моисеев А.П. Оценка режимов работы электромагнитных ударных машин // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2020. № 10 (192). С. 137-142. EDN: AJVDGG
6. Kargin V.A., Volgin A.V., Moiseev A.P. et al. Linear stepping electromagnetic engine for driving conveyors. *Journal of Physics: Conference Series: International Conference «Information Technologies in Business and Industry»*. 4 – Mechatronics, Robotics and Electrical Drives. Novosibirsk: Institute of Physics Publishing, 2019;1333(5):052011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/5/052011>
7. Usanov K.M., Volgin A.V., Kargin V.A. et al. Electric converters of electromagnetic strike machine with battery power. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018;327(5):052031. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052031>
8. Kargin V., Usanov K., Moiseev A. et al. Simulation of energy conversion processes in linear electromagnetic motors with through axial channel. *Strojnický Casopis*. 2023;73(2):71-82. <https://doi.org/10.2478/scjme-2023-0022> EDN: XKXBIF
9. Antonov S., Nikitenko G., Adoshev A. et al. Simulation of the magnetic system of a linear motor for a delimeter. International Scientific-Practical Conference «Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources» (FIES2021): Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources. Kazan: EDP Sciences. 2021;37:00097. EDN: CVWEPE
10. Forbes M., Robertson W.S.P., Zander A.C., Paulides J.J.H. An elemental modelling method for linear motor parametric studies using boundary-free analytic magnetic field solutions: Including 3D geometry, permeability, and end effects. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2025;630:173416. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2025.173416>
11. Hsieha Min-Fu, Tungb Chin-Juei, Yao Wu-Sung et al. Servo design of a vertical axis drive using dual linear motors for high speed electric discharge machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2007;47:546-554. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2006.05.011>
12. Guo G., Zhao Y., Yu A. Analysis of electromagnetic vibration of submerged tubular linear motors based on wave propagation approach. *Wave Motion*. 2024;127:103287. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2024.103287>
13. Линейный электродвигатель: Патент № 2835904 С1 Российская Федерация, МПК H02K 33/02 / Г.В. Никитенко, С.Н. Антонов, И.В. Каланчук; заявл. 02.08.2024; Опубл. 05.03.2025. EDN: JOWISQ

## References

1. Tavasiev R.M. Justification of an energy means for farm households. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva*. 2007;11:42-43. (In Russ.)
2. Kudzaev A.B., Tavasiev R.M. Rationale for a structural design of a branch cutter. *Proceedings of Gorský State Agrarian University*. 2009;46(2):82-86. (In Russ.)
3. Tavasiev R.M., Kudzaev A.B., Turiev O.I. Mathematical model of hydraulic chain of branch cutter. *Agrarian science*. 2008;9:13. (In Russ.)
4. Aphudov T.M., Shekikhachev Yu.A. Development and research of an electrically driven garden saw. *AgroEcoInfo*. 2020;1(39):15. (In Russ.)
5. Usanov K.M., Kargin V.A., Volgin A.V., Moiseev A.P. The analysis of operating modes of electromagnetic impact machines. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2020;10(192):137-142. (In Russ.)
6. Kargin V.A., Volgin A.V., Moiseev A.P. et al. Linear stepping electromagnetic engine for driving conveyors. *Journal of Physics: Conference Series: International Conference «Information Technologies in Business and Industry» – 4 – Mechatronics, Robotics and Electrical Drives*. Novosibirsk: Institute of Physics Publishing, 2019;1333(5):052011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/5/052011>
7. Usanov K.M., Volgin A.V., Kargin V.A. et al. Electric converters of electromagnetic strike machine with battery power. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018;327(5):052031. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052031>
8. Kargin V., Usanov K., Moiseev A. et al. Simulation of energy conversion processes in linear electromagnetic motors with through axial channel. *Strojnický Casopis*. 2023;73(2):71-82. <https://doi.org/10.2478/scjme-2023-0022>
9. Antonov S., Nikitenko G., Adoshev A. et al. Simulation of the magnetic system of a linear motor for a delimeter. International Scientific-Practical Conference «Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources» (FIES2021): Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources. Kazan: EDP Sciences. 2021;37:00097.
10. Forbes M., Robertson W.S.P., Zander A.C., Paulides J.J.H. An elemental modelling method for linear motor parametric studies using boundary-free analytic magnetic field solutions: Including 3D geometry, permeability, and end effects. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2025;630:173416. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2025.173416>
11. Hsieha Min-Fu, Tungb Chin-Juei, Yao Wu-Sung, et al. Servo design of a vertical axis drive using dual linear motors for high speed electric discharge machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2007;47:546-554. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2006.05.011>
12. Guo G., Zhao Y., Yu A. Analysis of electromagnetic vibration of submerged tubular linear motors based on wave propagation approach. *Wave Motion*. 2024;127:103287. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2024.103287>
13. Nikitenko G.V., Antonov S.N., Kalanchuk I.V. Linear motor: Patent, No. 2835904 C1 Russian Federation, IPC H02K 33/02.: applied on 02.08.2024; published on 05.03.2025. (In Russ.)

**Информация об авторах**

- <sup>1</sup> **Никитенко Геннадий Владимирович**, д-р техн. наук, профессор; [nikitenko\\_gv@mail.ru](mailto:nikitenko_gv@mail.ru); <http://orcid.org/0000-0003-2797-0755>, SPIN-код: 9068-0520, Scopus author ID: 57202640003, Researcher ID: N-1769-2014, AuthorID: 155686
- <sup>2</sup> **Антонов Сергей Николаевич**, канд. техн. наук, доцент; [antonov\\_serg@mail.ru](mailto:antonov_serg@mail.ru); <http://orcid.org/0000-0001-8931-269X>, SPIN-код: 2575-3686, Scopus author ID: 57021226800, Researcher ID: V-1081-2017
- <sup>3</sup> **Мастепаненко Максим Алексеевич**, канд. техн. наук, доцент, [mma\\_26@inbox.ru](mailto:mma_26@inbox.ru); <http://orcid.org/0000-0002-8684-118X>, SPIN-код: 1676-2740; Scopus AuthorID: 56768146500, AuthorID: 731041
- <sup>4</sup> **Каланчук Игорь Владимирович**, ассистент кафедры электрооборудования и энергообеспечения АПК; [igor.kalanchuk@gmail.com](mailto:igor.kalanchuk@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0000-8956-0626>, SPIN-код: 5504-6767, AuthorID: 1181858.
- <sup>1,2,3,4</sup> Ставропольский государственный аграрный университет; 355035, Российская Федерация, Ставропольский край, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12

**Вклад авторов**

Г.В. Никитенко – концептуализация;  
С.Н. Антонов – методология, подготовка начального варианта статьи, описание результатов;  
М.А. Мастепаненко – описание результатов и формирование выводов;  
И.В. Каланчук – представление результатов, подготовка графических материалов, проведение экспериментов.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 06.11.2025, после рецензирования и доработки 23.03.2026, принята к публикации 26.03.2026

**Author Information**

- Gennady V. Nikitenko**<sup>1</sup>, DSc (Eng), Professor, [nikitenko\\_gv@mail.ru](mailto:nikitenko_gv@mail.ru); <http://orcid.org/0000-0003-2797-0755>, SPIN code: 9068-0520, Scopus Author ID: 57202640003, Researcher ID: N-1769-2014, AuthorID: 155686
- Sergey N. Antonov**<sup>2</sup>, CSc (Eng), Associate Professor, [antonov\\_serg@mail.ru](mailto:antonov_serg@mail.ru); <http://orcid.org/0000-0001-8931-269X>, SPIN code: 2575-3686, Scopus Author ID: 57021226800, Researcher ID: V-1081-2017
- Maksim A. Masterpanenko**<sup>3</sup>, CSc (Eng), Associate Professor, [mma\\_26@inbox.ru](mailto:mma_26@inbox.ru); <http://orcid.org/0000-0002-8684-118X>, SPIN code: 1676-2740, Scopus Author ID: 56768146500, AuthorID: 731041
- Igor V. Kalanchuk**<sup>4</sup>, Assistant of the Department of Electrical Equipment and Energy Supply for the Agro-Industrial Sector, [igor.kalanchuk@gmail.com](mailto:igor.kalanchuk@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0000-8956-0626>, SPIN code: 5504-6767, AuthorID: 1181858.
- <sup>1,2,3,4</sup> Stavropol State Agrarian University; 12, Zootekhnichesky Lane, Stavropol, 355035, Russian Federation

**Author Contribution**

G.V. Nikitenko – conceptualization;  
S.N. Antonov – research methodology, writing – original draft; validation;  
M.A. Masterpanenko – results and conclusions;  
I.V. Kalanchuk – visualization; investigation.

**Conflict of interests**

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

Received 06.11.2025; Revised 23.03.2026; Accepted 26.03.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.3

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-103-113>

## Регулирование зазора молотильно-сепарирующего устройства комбайна с использованием электрогидравлического привода на основе кинематического анализа

*Е.А. Ивлиев<sup>1✉</sup>, В.И. Грищенко<sup>2</sup>*<sup>1,2</sup> Донской государственный технический университет; г. Ростов-на-Дону, Россия<sup>1</sup> [123ivliev123@mail.ru](mailto:123ivliev123@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-6606-2015><sup>2</sup> [vig84@yandex.ru](mailto:vig84@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0003-1422-2811>

**Аннотация.** Регулирование зазора молотильно-сепарирующего устройства зерноуборочного комбайна влияет на качество обмолота и потери зерна. Целью исследований является разработка аналитической зависимости между ходом исполнительного механизма электрогидравлического привода и величиной зазора, обеспечивающей реализацию алгоритмов активного регулирования. Объектом исследований является молотильно-сепарирующее устройство тангенциального типа зерноуборочного комбайна ACROS530. Методика основана на кинематическом анализе механизма подвески подбарабанья с использованием геометрического моделирования звеньев и определения координат шарнирных точек через пересечение окружностей. На базе полученной модели вычислены зависимости зазора от хода гидроцилиндра, что позволило сформировать обратную функцию, необходимую для систем управления. Для уменьшения вычислительной нагрузки выполнена аппроксимация методом кубического сплайна, обеспечившая высокую точность в рабочем диапазоне регулирования. Предложенная схема адаптивного электрогидравлического привода включает в себя замкнутые контуры управления положением, скоростью и давлением. Предложенная архитектура отличается пониженным энергопотреблением при удержании нагрузки и возможностью адаптации к изменяющимся условиям работы. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании и модернизации систем регулирования молотильно-сепарирующих устройств современных зерноуборочных комбайнов.

**Ключевые слова:** регулирование зазора молотильно-сепарирующего устройства; подбарабанье; комбайн; молотильно-сепарирующее устройство; схема адаптивного электрогидравлического привода; гидроцилиндр

**Для цитирования:** Ивлиев Е.А., Грищенко В.И. Регулирование зазора молотильно-сепарирующего устройства комбайна с использованием электрогидравлического привода на основе кинематического анализа // *Агроинженерия*. 2026. Т. 28, № 2. С. 103-113. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-103-113>

ORIGINAL ARTICLE

## Electro-hydraulic control of concave clearance in combine harvesters based on kinematic analysis

*Е.А. Ivliev<sup>1✉</sup>, V.I. Grishchenko<sup>2</sup>*<sup>1,2</sup> Don State Technical University; Rostov-on-Don, Russia<sup>1</sup> [123ivliev123@mail.ru](mailto:123ivliev123@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-6606-2015><sup>2</sup> [vig84@yandex.ru](mailto:vig84@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0003-1422-2811>

**Abstract.** Adjusting the concave clearance in a threshing-and-separating unit of a combine harvester directly impacts threshing quality and grain loss. This study aims to develop an analytical relationship between the actuator stroke of the electro-hydraulic drive and the clearance size, enabling the implementation of active control algorithms. The research focuses on the tangential-type TSU of the ACROS530 combine harvester. The methodology is based on a kinematic analysis of the concave suspension mechanism, utilizing geometric modeling of the links and determining joint coordinates via the intersection of circles. Based on the resulting model, the authors established the relationship between the clearance and the hydraulic cylinder stroke to formulate the inverse function required for control systems. To minimize computational load, a cubic spline approximation was performed, ensuring high precision within the operational regulation range. The proposed adaptive electro-hydraulic drive scheme incorporates closed-loop control for position, speed, and pressure. The proposed architecture is characterized by reduced energy

consumption during load holding and the ability to adapt to varying operating conditions. The study results can be applied to the design and modernization of regulation systems for the threshing and separating units of modern combine harvesters.

**Keywords:** adjusting the concave clearance of the threshing-and-separating unit; concave; combine harvester; threshing-and-separating unit (TSU); adaptive electro-hydraulic drive circuit; hydraulic cylinder

**For citation:** Ivliev E.A., Grishchenko V.I. Electro-hydraulic control of concave clearance in combine harvesters based on kinematic analysis. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(2):103-113 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-103-113>

### Введение

Зерновое производство остается ведущей отраслью растениеводства Российской Федерации [1]. Эффективность уборки зерновых культур во многом определяется качеством работы молотильно-сепарирующего устройства (МСУ) комбайна.

Согласно требованиям ГОСТ 28301-2015 показатели качества работы зерноуборочного комбайна включают в себя минимизацию суммарных потерь зерна за молотилкой (не более 1,5%), допустимое содержание дробленых зерен (не более 2%) и степень очистки не ниже 95%. При этом допустимые потери в молотилке, учитываемые за МСУ, должны составлять не более 0,5%, за соломотрясом – 0,5%, за очисткой – 0,5%. В работе уделяли внимание регулировке МСУ как узла, напрямую влияющего на первую составляющую этих потерь. Нарушение оптимальных значений зазора между барабаном и подбарабаньем приводит к повышению дробления, росту сорности и снижению товарного качества зерна. Механически поврежденные зерна быстрее подвергаются микробиологическому поражению и хуже хранятся, а при переработке в муку снижают ее качество [2, 3].

В исследованиях, посвященных анализу процесса обмолота в роторных МСУ [4-6], показано, что уровень потерь и повреждений определяют частота вращения барабана, подача хлебной массы и величина зазора. Попытки уменьшить дробление за счет сбавления скорости барабана ограничиваются снижением производительности, а пассивные конструкции адаптации зазора (на основе упругих элементов) не обеспечивают достаточной точности.

Для сохранения производительности работы МСУ и уменьшения сорности и дробления зерна целесообразно использовать адаптивный механизм, регулирующий зазоры МСУ.

Электромеханические или гидравлические системы регулирования с отсутствием обратной связи подвержены перегреву и износу и недостаточно надежны в реальных условиях эксплуатации.

Реализовать пассивную адаптацию к изменяющимся характеристикам массы без применения

активных приводов и сложных систем управления позволяет конструкция, в которой положение подбарабья изменяется под действием упругого элемента – пружины подвески [7]. Однако регулирование в данном случае зависит от параметров пружины, которые изменяются в процессе эксплуатации по причине усталостных явлений.

Известны устройства регулирования положения подбарабья с использованием гидроцилиндров [8, 9]. Их достоинством является возможность быстрого увеличения зазора между барабаном и подбарабаньем до максимального значения – так называемого сброса подбарабья, что необходимо для очистки рабочей зоны при забивании МСУ обмолачиваемой массой и предотвращения аварийных ситуаций. Однако дросселирование рабочей жидкости при регулировании приводит к ее нагреву, снижению КПД и ухудшению эксплуатационных характеристик.

Электрические приводы обеспечивают высокую точность регулирования, плавность хода, возможность интеграции в автоматизированные системы управления уборочным процессом [10]. Однако электроприводы, в частности, винтовые механизмы с шаговыми или сервомоторами, имеют сравнительно низкую скорость регулирования и чувствительны к перегрузкам и загрязнению рабочей зоны.

Электрогидравлические приводы (ЭГП) могут обеспечить позиционное регулирование посредством модуляции скорости привода насосного агрегата. ЭГП более компактны и исключают потери на дросселирование и обеспечивают высокую точность позиционирования [11, 12]. Оценка существующих электрогидравлических приводов показала точность их позиционирования в стационарном режиме от 0,15 до 0,5%. Несмотря на компактность и высокую плотность энергии, они могут быть неэффективными при удержании нагрузки без движения (насос продолжает работать для поддержания давления, а это приводит к избыточному потреблению энергии и нагреву двигателя) [13-15]. Таким образом, разработка методов регулирования зазора МСУ является весьма актуальной.

**Цель исследований:** обосновать структуру электрогидравлического привода и сформировать аналитическую зависимость между ходом исполнительного гидроцилиндра электрогидравлического привода и величиной зазора молотильно-сепарирующего устройства зерноуборочного комбайна на основе кинематического анализа для обеспечения точного регулирования.

**Материалы и методы**

Объектом исследований служило МСУ зерноуборочного комбайна ACROS530 (рис. 1), оснащенное системой регулирования зазора между барабаном и подбарабаньем.

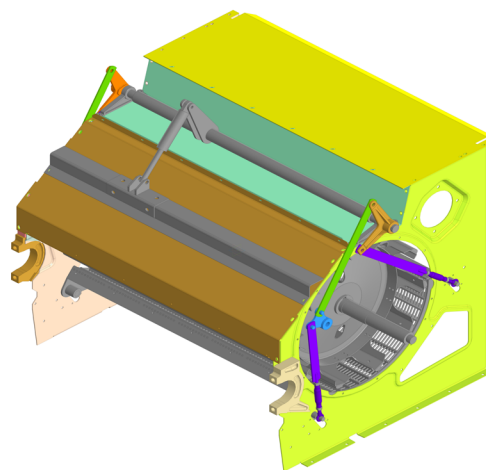
В качестве исходных данных приняты конструктивные параметры МСУ тангенциального типа и геометрия звеньев кинематической схемы.

Для исследования работы системы регулирования зазора применили подход, включающий в себя построение структурной схемы электрогидравлического привода, разработку кинематической модели МСУ и аналитическое определение зависимости между ходом штока

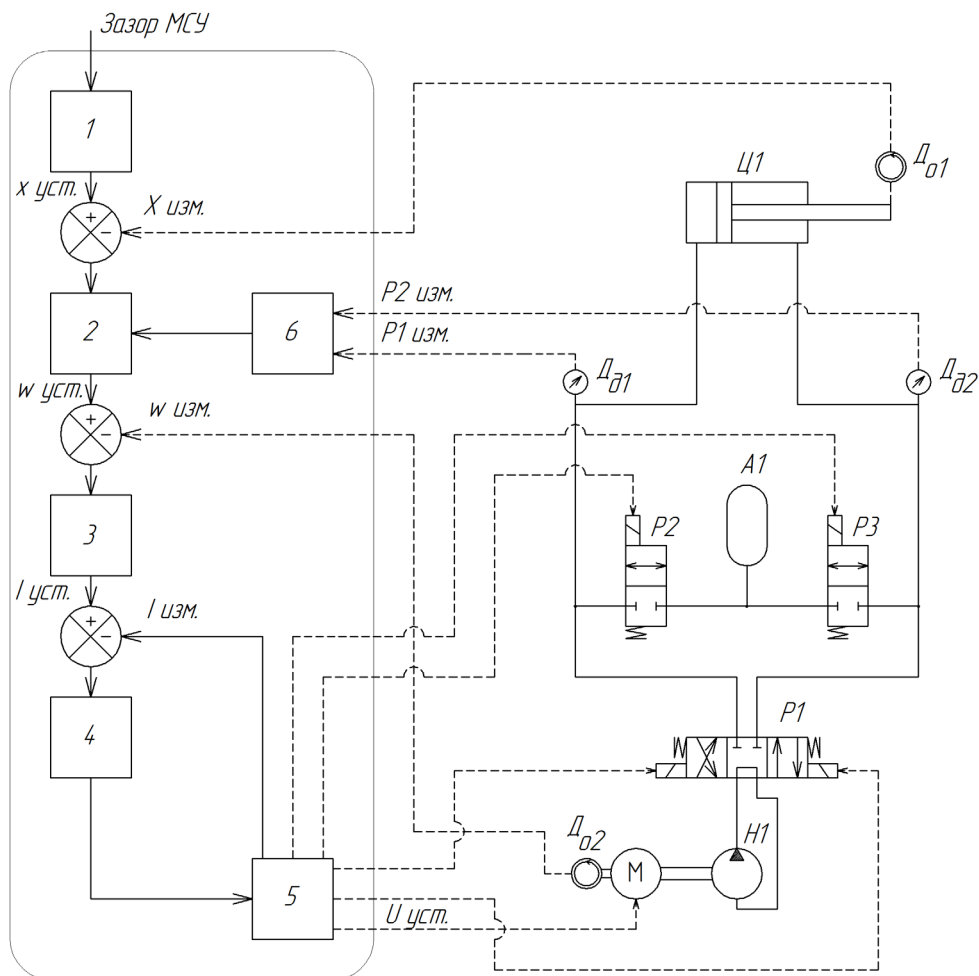
гидроцилиндра и величиной зазора между барабаном и подбарабаньем.

Структурная схема адаптивного электрогидравлического привода представлена на рисунке 2.

Система построена по принципу электрогидромеханического привода с подчиненным управлением



**Рис. 1. МСУ тангенциального типа**  
**Fig. 1. TSU of the tangential type**



**Рис. 2. Структурная схема адаптивного электрогидравлического привода**  
**Fig 2. Structural diagram of adaptive electrohydraulic actuator**

и обратной связью по положению, скорости и давлению. Система отличается простой и энергоэффективной архитектурой, включающей в себя минимальное количество гидравлической аппаратуры и рациональную компоновку. В отличие от других решений данная схема обеспечивает снижение энергопотребления в стационарных режимах при удержании нагрузки без движения за счет использования распределителя  $PI$ . Рабочие линии насоса  $HI$  соединены с гидроцилиндром  $ЦИ$  не напрямую, а через управляемый гидрораспределитель  $PI$ . Такое решение позволяет исключить постоянную циркуляцию жидкости при неподвижности выходного звена, тем самым снижая энергетические потери в режиме удержания нагрузки.

По причине асимметрии гидроцилиндра используются два управляемых распределителя  $P2$  и  $P3$  для подачи дополнительного объема масла из аккумулятора  $AI$  или сброса объема масла в аккумулятор, который компенсирует разность объемов поршневой и штоковой полостей.

Отметим, что в рабочем режиме ЭГП представляет собой полностью замкнутую автономную систему. Сначала выполнялись технологические операции первичного заполнения контура рабочей жидкостью из гидравлического бака, удаление воздуха из линий и предварительная зарядка гидроаккумулятора  $AI$ . После завершения этих процедур соединялись всасывающая линия насоса  $HI$  и сливная линия распределителя  $PI$  с помощью быстроразъемного соединения, что обеспечивало дальнейшее функционирование привода без необходимости подключения к внешнему гидробаку.

Задаваемое значение зазора МСУ, формируемое оператором или автоматизированной системой, подается на блок обработки управляющего сигнала  $I$ . На основании зависимости хода штока от зазора МСУ формируется задаваемая координата положения штока  $x_{уст}$ . Текущее положение штока  $x_{изм}$ , получаемое по линии обратной связи с датчика положения  $D_{o1}$ , создает сигнал ошибки по положению, который поступает в регулятор  $2$ . На выходе регулятора  $2$  формируется задающий сигнал управления скоростью вращения электродвигателя  $w_{уст}$ . Сигнал ошибки управления скоростью электродвигателя  $e_w(t) = w_{уст} - w_{изм}$  подается на регулятор  $3$ , где  $w_{изм}$  является текущим значением скорости электродвигателя, поступающим по линии обратной связи от датчика скорости  $D_{o2}$ .

На выходе регулятора  $3$  формируется задающее воздействие для контура управления силой тока  $I_{уст}$ . Сигнал разности значения  $I_{уст}$  и значения, полученного по линии обратной  $I_{изм}$ , подается на регулятор  $4$ .

Управляющее воздействие из регулятора  $4$  поступает на блок  $5$ . Данный блок выполняет функцию формирования напряжения на обмотке электродвигателя, измерения силы тока электродвигателя, управления гидравлическими распределителями.

В систему интегрированы датчики давления  $D_{o1}$  и  $D_{o2}$ , обеспечивающие регистрацию статической составляющей давления. Получаемые данные передаются в блок адаптации по нагрузке  $б$ , выходной сигнал которого воздействует на коэффициенты регулятора  $2$ , тем самым адаптируя скорость движения штока под переменную нагрузку.

Ключевым элементом блока обработки управляющего сигнала является аналитическая зависимость, позволяющая преобразовать задаваемое значение зазора МСУ в соответствующую координату положения штока гидроцилиндра. Такая зависимость необходима для корректного формирования сигнала  $x_{уст}$ , служащего исходной величиной в контуре позиционного регулирования. Построение зависимости выполняется на основе кинематического анализа механизма подвески подбарабannya, в котором зазор определяется через геометрические параметры звеньев и текущее значение хода исполнительного органа.

Для построения указанной зависимости введем обобщенную функцию:

$$gap_i = f(L_C), \quad (1)$$

где  $gap_i$  – величина зазора между барабаном и  $i$ -й планкой подбарабannya, мм;  $L_C$  – текущая координата штока ЭГП, мм.

Для получения указанной аналитической зависимости разработана расчетная схема (рис. 3), описывающая геометрию и кинематические связи элементов механизма. Схема включает в себя расположение барабана, рычагов, тяг и направляющих, а также точки крепления штока управляющего цилиндра. На основе этой схемы выполнено определение координат соответствующих точек при различных значениях хода цилиндра  $L_C$ .

В представленных расчетах все линейные параметры заданы в миллиметрах, а угловые величины выражены в радианах.

Из расчетной схемы следует, что в состав механизма входят кинематические пары, имеющие как подвижные, так и неподвижные точки вращения. Каждая пара может быть представлена в виде геометрической модели, где положение звена определяется окружностью с известным центром и радиусом, соответствующим длине звена или тяги. Определение точек соединения звеньев сводится к нахождению точек пересечения двух окружностей с заданными центрами и радиусами.

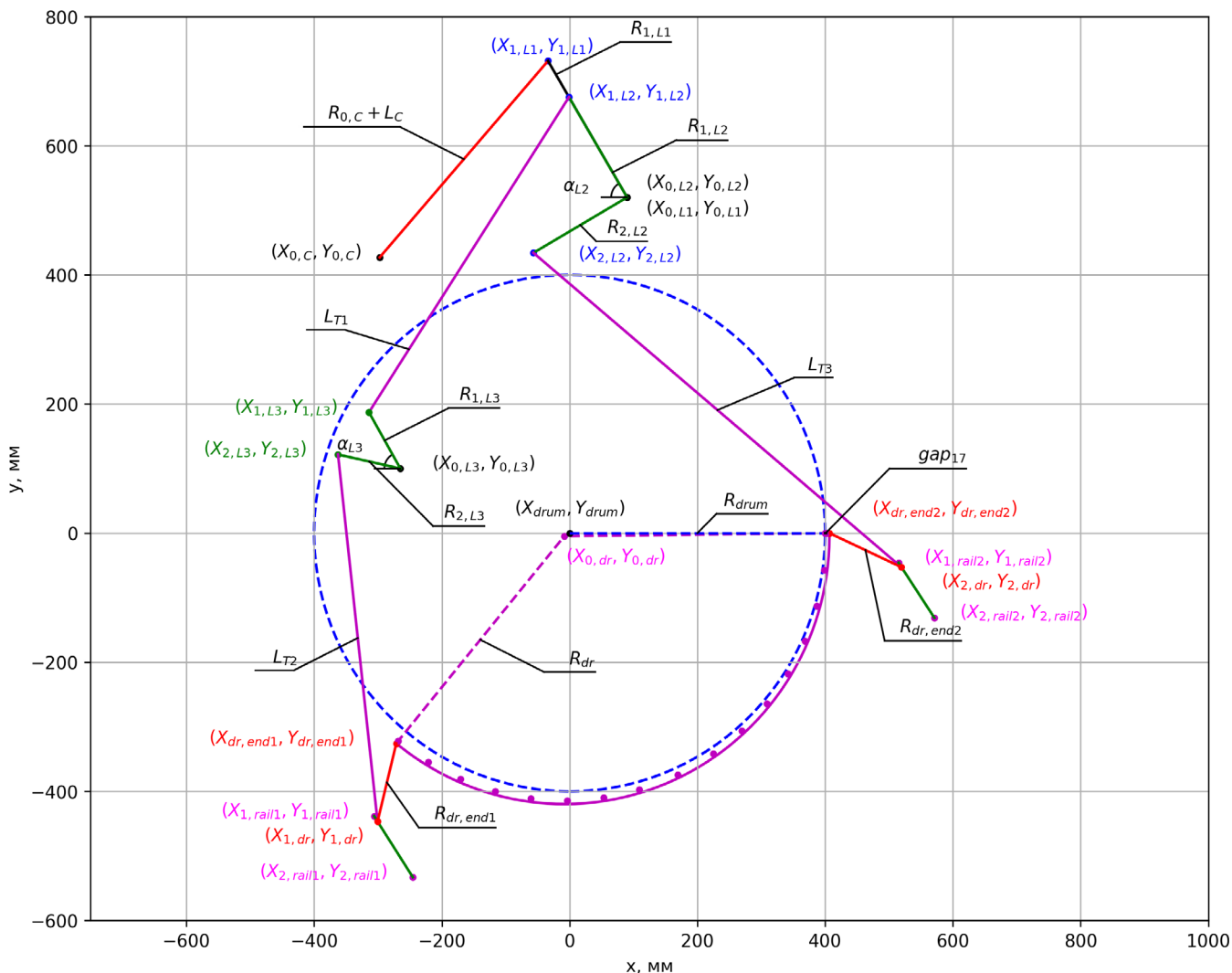


Рис. 3. Расчетная схема кинематики МСУ комбайна  
 Fig. 3. Design diagram of the TSU kinematics of the combine harvester

Для расчета координат шарнирных точек используется метод нахождения точек пересечения двух окружностей с заданными центрами и радиусами. Пусть центры окружностей имеют координаты  $P_1(x_1, y_1)$  и  $P_2(x_2, y_2)$ , а их радиусы равны  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 4). Расстояние между центрами окружностей определяется как

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}. \quad (2)$$

Точки пересечения окружностей обозначим буквами  $P_3(x_3, y_3)$  и  $P_4(x_4, y_4)$ , тогда проекцию точек  $P_3$  и  $P_4$  на  $P_1P_2$  обозначим точкой  $P_0(x_0, y_0)$ . Из полученных точек получаем прямоугольные треугольники, исходя из которых, определим необходимые для расчета катеты по формулам (3) и (4):

$$b = \frac{R_2^2 - R_1^2 + d^2}{2d}. \quad (3)$$

$$h = \sqrt{R_2^2 + b^2}. \quad (4)$$

Координаты точки  $P_0$ , находим по формулам:

$$x_0 = x_2 - b \cdot \frac{x_2 - x_1}{d}; \quad (5)$$

$$y_0 = y_2 - b \cdot \frac{y_2 - y_1}{d}. \quad (6)$$

Тогда координаты точек пересечения определяются следующим образом:

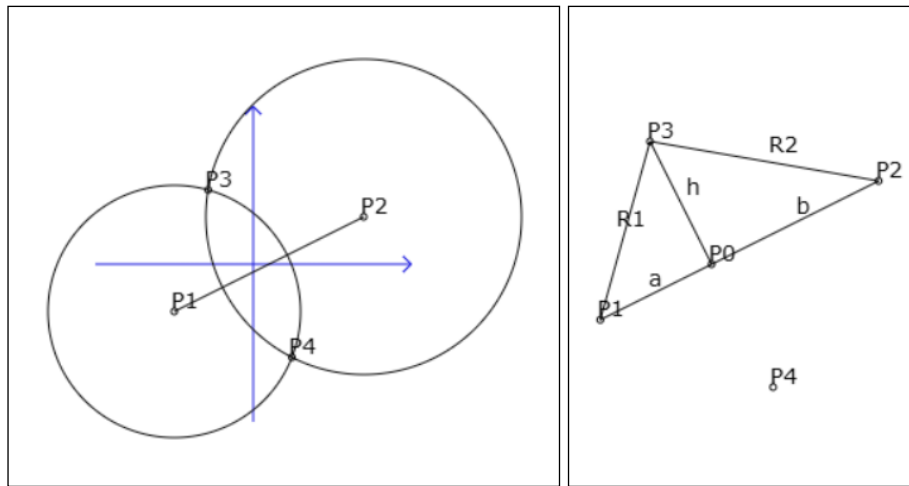
$$x_3 = x_0 - h \cdot \frac{y_2 - y_1}{d}; \quad (7)$$

$$y_3 = y_0 + h \cdot \frac{x_2 - x_1}{d}; \quad (8)$$

$$x_4 = x_0 + h \cdot \frac{y_2 - y_1}{d}; \quad (9)$$

$$y_4 = y_0 - h \cdot \frac{x_2 - x_1}{d}. \quad (10)$$

Для нахождения шарнирной точки  $(X_{1,L1}, Y_{1,L1})$  воспользуемся уравнениями для нахождения точки



**Рис. 4. Расчетная схема пересечения окружностей**  
**Fig. 4. Design diagram of the intersection of circles**

пересечения двух окружностей, описанных выше, где центром первой окружности будет точка фиксации штока гидравлического цилиндра  $(X_{0,C}, Y_{0,C})$ , а второй – точка вращения рычага № 1  $(X_{0,L1}, Y_{0,L1})$ . Радиус первой окружности соответствует длине  $(R_{0,C} + L_C)$ , где  $R_{0,C}$  – длина от точки фиксации привода до точки фиксации с рычагом № 1 в исходном состоянии, а  $L_C$  – координата хода гидравлического цилиндра. Радиус второй окружности соответствует длине первого рычага  $(R_{1,L1})$ .

Исходя из вышеописанного получаем координаты шарнирной точки  $(X_{1,L1}, Y_{1,L1})$ :

$$d_1 = \sqrt{(X_{0,L1} - X_{0,C})^2 + (Y_{0,L1} - Y_{0,C})^2}; \quad (11)$$

$$b_1 = \frac{R_{1,L1}^2 - (R_{0,C} + L_C)^2 + d_1^2}{2d_1}; \quad (12)$$

$$X_{1,L1} = X_{0,L1} - b_1 \cdot \frac{X_{0,L1} - X_{0,C}}{d_1} - \sqrt{R_{1,L1}^2 + b_1^2} \cdot \frac{Y_{0,L1} - Y_{0,C}}{d_1}; \quad (13)$$

$$Y_{1,L1} = Y_{0,L1} - b_1 \cdot \frac{Y_{0,L1} - Y_{0,C}}{d_1} + \sqrt{R_{1,L1}^2 + b_1^2} \cdot \frac{X_{0,L1} - X_{0,C}}{d_1}. \quad (14)$$

С учетом того, что рычаг № 1 и рычаг № 2 имеют общую точку вращения  $(X_{0,L2} = X_{0,L1}, Y_{0,L2} = Y_{0,L1})$  и закреплены под одним углом, можно найти координаты шарнирной точки  $(X_{1,L2}, Y_{1,L2})$ , зная длину 1-го плеча рычага № 2  $(R_{1,L2})$  и угол поворота рычага № 1  $(\alpha_{L1})$ :

$$\alpha_{L1} = \arccos\left(\frac{X_{1,L1} - X_{0,L1}}{R_{1,L1}}\right); \quad (15)$$

$$X_{1,L2} = X_{0,L2} + R_{1,L2} \cdot \cos(\alpha_{L1}); \quad (16)$$

$$Y_{1,L2} = Y_{0,L2} + R_{1,L2} \cdot \sin(\alpha_{L1}). \quad (17)$$

Зная длину 2-го плеча рычага № 2  $(R_{2,L2})$ , угол поворота рычага № 1  $(\alpha_{L2})$  и угол между плечами рычага

№ 2  $(\Delta\alpha_{L2})$ , можно найти координаты шарнирной точки  $(X_{2,L2}, Y_{2,L2})$ :

$$\alpha_{L2} = \alpha_{L1}; \quad (18)$$

$$X_{2,L2} = X_{0,L2} + R_{2,L2} \cdot \cos(\alpha_{L2} + \Delta\alpha_{L2}); \quad (19)$$

$$Y_{2,L2} = Y_{0,L2} + R_{2,L2} \cdot \sin(\alpha_{L2} + \Delta\alpha_{L2}). \quad (20)$$

Для определения координат шарнирной точки  $(X_{1,L3}, Y_{1,L3})$  воспользуемся уравнениями для нахождения точки пересечения двух окружностей, описанных выше, где центром первой окружности будет шарнирная точка рычага № 2  $(X_{1,L2}, Y_{1,L2})$ , а второй – точка вращения рычага № 3  $(X_{0,L3}, Y_{0,L3})$ . Радиус первой окружности соответствует длине тяги № 1  $(L_{T1})$ . Радиус второй окружности соответствует длине первого плеча рычага № 3  $(R_{1,L3})$ :

$$d_2 = \sqrt{(X_{0,L3} - X_{1,L2})^2 + (Y_{0,L3} - Y_{1,L2})^2}; \quad (21)$$

$$b_2 = \frac{L_{T1}^2 - R_{1,L3}^2 + d_2^2}{2d_2}; \quad (22)$$

$$X_{1,L3} = X_{1,L2} - b_2 \cdot \frac{X_{0,L3} - X_{1,L2}}{d_2} + \sqrt{R_{1,L3}^2 + b_2^2} \cdot \frac{Y_{0,L3} - Y_{1,L2}}{d_2}; \quad (23)$$

$$Y_{1,L3} = Y_{1,L2} - b_2 \cdot \frac{Y_{0,L3} - Y_{1,L2}}{d_2} - \sqrt{R_{1,L3}^2 + b_2^2} \cdot \frac{X_{0,L3} - X_{1,L2}}{d_2}. \quad (24)$$

Зная длину 2-го плеча рычага № 3  $(R_{2,L3})$ , угол поворота рычага № 3  $(\alpha_{L3})$  и угол между плечами рычага № 2  $(\Delta\alpha_{L3})$ , можно найти координаты шарнирной точки  $(X_{2,L3}, Y_{2,L3})$ :

$$\alpha_{L3} = \arccos\left(\frac{X_{1,L3} - X_{0,L3}}{R_{1,L3}}\right); \quad (25)$$

$$X_{2,L3} = X_{0,L3} + R_{2,L3} \cdot \cos(\alpha_{L3} + \Delta\alpha_{L3}); \quad (26)$$

$$Y_{2,L3} = Y_{0,L3} + R_{2,L3} \cdot \sin(\alpha_{L3} + \Delta\alpha_{L3}). \quad (27)$$

Для определения координат осевых точек крепления подбарабья МСУ комбайна найдем точки пересечения прямых, образованных координатами направляющих, с окружностями, которые образуются соответствующими тягами.

Уравнение прямой задается уравнением вида:

$$y = k_r \cdot x - b_r, \quad (28)$$

где  $k_r = (y_{2r} - y_{1r}) / (x_{2r} - x_{1r})$ , а  $b_r = y_{1r} - k_r \cdot x_{1r}$ .

Уравнение окружности задается уравнением вида:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = R^2, \quad (29)$$

где  $(x_i, y_i)$  – координаты центра окружности.

Подставив уравнение прямой в уравнение окружности, получаем квадратное уравнение:

$$(1 + k_r^2) \cdot x^2 + (-2x_i + 2k_r b_r - 2k_r x_i) \cdot x + x_i^2 + b_r^2 - 2y_i b_r + y_i^2 - R^2 = 0. \quad (30)$$

Введя замену составных частей выражения (30)  $a_i = 1 + k_r^2$ ;  $b_i = -2x_i + 2k_r b_r - 2k_r x_i$ ;  $c_i = x_i^2 + b_r^2 - 2y_i b_r + y_i^2 - R^2$ , найдем координату осевой точки по формулам (31) и (28):

$$x = \frac{-b_i \pm \sqrt{b_i^2 - 4a_i c_i}}{2a_i}. \quad (31)$$

Исходя из известных координат направляющей № 1  $(X_{1,rail1}, Y_{1,rail1})$ , длины направляющей  $(L_{rail1})$  и угла направляющей  $(\alpha_{rail1})$ , найдем координаты второй точки  $(X_{2,rail1}, Y_{2,rail1})$  для составления уравнения прямой:

$$X_{2,rail1} = X_{1,rail1} + L_{rail1} \cdot \cos(\alpha_{rail1}); \quad (32)$$

$$Y_{2,rail1} = Y_{1,rail1} + L_{rail1} \cdot \sin(\alpha_{rail1}). \quad (33)$$

Найдем координаты первой осевой точки подбарабья  $(X_{1,dr}, Y_{1,dr})$ , образованной пересечением окружности, радиус которой образован тягой № 2  $(L_{T2})$  с центром  $(X_{2,L3}, Y_{2,L3})$ , с направляющей № 1.

$$k_{r1} = (Y_{2,rail1} - Y_{1,rail1}) / (X_{2,rail1} - X_{1,rail1}); \quad (34)$$

$$b_{r1} = Y_{2,rail1} - k_{r1} \cdot X_{1,rail1}. \quad (35)$$

$$a_{i1} = 1 + k_{r1}^2; \quad (36)$$

$$b_{i1} = -2X_{2,L3} + 2k_{r1} b_{r1} - 2k_{r1} x_i; \quad (37)$$

$$c_{i1} = X_{2,L3}^2 + b_{r1}^2 - 2Y_{2,L3} b_{r1} + Y_{2,L3}^2 - L_{T2}^2; \quad (38)$$

$$X_{1,dr} = \frac{-b_{i1} + \sqrt{b_{i1}^2 - 4a_{i1}c_{i1}}}{2a_{i1}}; \quad (39)$$

$$Y_{1,dr} = k_{r1} X_{1,dr} - b_{r1}. \quad (40)$$

Исходя из известных координат направляющей № 2  $(X_{2,rail1}, Y_{2,rail1})$ , длины направляющей  $(L_{rail1})$  и угла направляющей  $(\alpha_{rail2})$ , найдем координаты

второй точки  $(X_{2,rail1}, Y_{2,rail1})$  для составления уравнения прямой:

$$X_{2,rail2} = X_{1,rail2} + L_{rail2} \cdot \cos(\alpha_{rail2}); \quad (41)$$

$$Y_{2,rail2} = Y_{1,rail2} + L_{rail2} \cdot \sin(\alpha_{rail2}). \quad (42)$$

Найдем координаты второй осевой точки подбарабья  $(X_{2,dr}, Y_{2,dr})$ , образованной пересечением окружности, радиус которой образован тягой № 3 ( ) с центром  $(X_{2,L2}, Y_{2,L2})$ , с направляющей № 2:

$$k_{r2} = (Y_{2,rail2} - Y_{1,rail2}) / (X_{2,rail2} - X_{1,rail2}); \quad (43)$$

$$b_{r2} = Y_{2,rail2} - k_{r2} X_{1,rail2}; \quad (44)$$

$$a_{i2} = 1 + k_{r2}^2; \quad (45)$$

$$b_{i2} = -2X_{2,L2} + 2k_{r2} b_{r2} - 2k_{r2} x_i; \quad (46)$$

$$c_{i2} = X_{2,L2}^2 + b_{r2}^2 - 2Y_{2,L2} b_{r2} + Y_{2,L2}^2 - L_{T3}^2; \quad (47)$$

$$X_{2,dr} = \frac{-b_{i2} + \sqrt{b_{i2}^2 - 4a_{i2}c_{i2}}}{2a_{i2}}; \quad (48)$$

$$Y_{2,dr} = k_{r2} X_{2,dr} - b_{r2}. \quad (49)$$

Для нахождения центральной точки подбарабья МСУ комбайна  $(X_{0,dr}, Y_{0,dr})$  воспользуемся уравнениями для нахождения точки пересечения двух окружностей, описанных выше, где центром первой окружности будет первая осевая точка подбарабья  $(X_{1,dr}, Y_{1,dr})$ , а второй – вторая осевая точка подбарабья  $(X_{2,dr}, Y_{2,dr})$ . Радиус первой окружности соответствует длине  $(R_{dr} + R_{dr,ax1})$ , а радиусом второй окружности будет длина  $(R_{dr} + R_{dr,ax2})$ , где  $R_{dr}$  – радиус подбарабья, а  $R_{dr,ax1}, R_{dr,ax2}$  – нормали от соответствующих осевых точек подбарабья к дуге подбарабья:

$$d_3 = \sqrt{(X_{2,dr} - X_{1,dr})^2 + (Y_{2,dr} - Y_{1,dr})^2}; \quad (50)$$

$$b_3 = \frac{(R_{dr} + R_{dr,ax2})^2 - (R_{dr} + R_{dr,ax1})^2 + d_3^2}{2d_3}; \quad (51)$$

$$X_{0,dr} = X_{2,dr} - b_3 \cdot \frac{X_{2,dr} - X_{1,dr}}{d_3} -$$

$$-\sqrt{(R_{dr} + R_{dr,ax2})^2 + b_3^2} \cdot \frac{Y_{2,dr} - Y_{1,dr}}{d_3}; \quad (52)$$

$$Y_{0,dr} = Y_{2,dr} - b_3 \cdot \frac{Y_{2,dr} - Y_{1,dr}}{d_3} +$$

$$+\sqrt{(R_{dr} + R_{dr,ax2})^2 + b_3^2} \cdot \frac{X_{2,dr} - X_{1,dr}}{d_3}. \quad (53)$$

Для нахождения первой крайней точки дуги подбарабья  $(X_{dr,end1}, Y_{dr,end1})$  воспользуемся уравнениями для нахождения точки пересечения двух окружностей, где центром первой окружности будет первая

осевая точка подбарабанья ( $X_{1,dr}, Y_{1,dr}$ ), а второй – центральная точка подбарабанья ( $X_{0,dr}, Y_{0,dr}$ ). Радиус первой окружности соответствует длине от центра осевой точки до крайней планки подбарабанья ( $R_{dr,end1}$ ), радиус второй окружности соответствует радиусу подбарабанья ( $R_{dr}$ ):

$$d_5 = \sqrt{(X_{0,dr} - X_{1,dr})^2 + (Y_{0,dr} - Y_{1,dr})^2}; \quad (54)$$

$$b_5 = \frac{R_{dr}^2 - R_{dr,end1}^2 + d_5^2}{2d_5}; \quad (55)$$

$$X_{dr,end1} = X_{0,dr} - b_5 \cdot \frac{X_{0,dr} - X_{1,dr}}{d_5} + \sqrt{R_{dr}^2 + b_5^2} \cdot \frac{Y_{0,dr} - Y_{1,dr}}{d_5}; \quad (56)$$

$$Y_{dr,end1} = Y_{0,dr} - b_5 \cdot \frac{Y_{0,dr} - Y_{1,dr}}{d_5} - \sqrt{R_{dr}^2 + b_5^2} \cdot \frac{X_{0,dr} - X_{1,dr}}{d_5}. \quad (57)$$

Для нахождения второй крайней точки дуги подбарабанья ( $X_{dr,end2}, Y_{dr,end2}$ ) воспользуемся уравнениями для нахождения точки пересечения двух окружностей, где центром первой окружности будет вторая осевая точка подбарабанья ( $X_{2,dr}, Y_{2,dr}$ ), а второй – центральная точка подбарабанья ( $X_{0,dr}, Y_{0,dr}$ ). Радиус первой окружности соответствует длине от центра осевой точки до крайней планки подбарабанья ( $R_{dr,end2}$ ), радиус второй окружности соответствует радиусу подбарабанья ( $R_{dr}$ ):

$$d_6 = \sqrt{(X_{0,dr} - X_{2,dr})^2 + (Y_{0,dr} - Y_{2,dr})^2}; \quad (58)$$

$$b_6 = \frac{R_{dr}^2 - R_{dr,end2}^2 + d_6^2}{2d_6}; \quad (59)$$

$$X_{dr,end2} = X_{0,dr} - b_6 \cdot \frac{X_{0,dr} - X_{2,dr}}{d_6} - \sqrt{R_{dr}^2 + b_6^2} \cdot \frac{Y_{0,dr} - Y_{2,dr}}{d_6}; \quad (60)$$

$$Y_{dr,end2} = Y_{0,dr} - b_6 \cdot \frac{Y_{0,dr} - Y_{2,dr}}{d_6} + \sqrt{R_{dr}^2 + b_6^2} \cdot \frac{X_{0,dr} - X_{2,dr}}{d_6}. \quad (70)$$

На базе полученных координат крайних точек подбарабанья определим их углы для дальнейшего расчета координат планок подбарабанья:

$$\theta_{dr,end1} = \arctan\left(\frac{Y_{dr,end1} - Y_{0,dr}}{X_{dr,end1} - Y_{0,dr}}\right); \quad (71)$$

$$\theta_{dr,end2} = \arctan\left(\frac{Y_{dr,end2} - Y_{0,dr}}{X_{dr,end2} - Y_{0,dr}}\right). \quad (72)$$

Углы ( $\theta_{i,bar}$ ) и координаты ( $X_{i,bar}, Y_{i,bar}$ ) каждой планки подбарабанья найдем следующим образом:

$$\theta_{i,bar} = \theta_{dr,end1} + \Delta\theta_{i,bar}; \quad (73)$$

$$X_{i,bar} = X_{0,dr} + (R_{dr} - h_{bar}) \cdot \cos(\theta_{i,bar}); \quad (74)$$

$$Y_{i,bar} = Y_{0,dr} + (R_{dr} - h_{bar}) \cdot \sin(\theta_{i,bar}), \quad (75)$$

где  $\Delta\theta_{i,bar}$  – угол отклонения  $i$ -й планки относительно угла первой крайней точки подбарабанья,  $h_{bar}$  – высота планки.

Расстояние от каждой планки подбарабанья до молотильного барабана вычислим как нормаль от координаты  $i$ -й планки до окружности барабана по формуле:

$$gap_i = \sqrt{(X_{drum} - X_{i,bar})^2 + (Y_{drum} - Y_{i,bar})^2} - R_{drum}. \quad (76)$$

Таким образом, полученная зависимость позволяет определить величину зазора между барабаном и каждой из планок подбарабанья в зависимости от хода ЭГП.

### Результаты и их обсуждение

Полученные зависимости зазоров МСУ и отношение входного зазора к выходному зазору от хода гидравлического цилиндра позволяют определить связь зазоров МСУ с ходом гидроцилиндра, а также выделить рабочую зону и зону нарушения технологического процесса (рис. 5, 6).

Задача управления электрогидравлическим приводом сводится к обеспечению требуемого зазора МСУ в зависимости от текущих условий обмолота. Для этого необходимо преобразовать полученную зависимость в обратную форму:

$$L_C = f(gap_i). \quad (77)$$

Для уменьшения затрат на вычислительные ресурсы системы управления ЭГП принято решение аппроксимировать зависимость кубическим сплайном:

$$L_C = a_{3,i} gap_i^3 + a_{2,i} gap_i^2 + a_{1,i} gap_i + a_{0,i} \quad (78)$$

Поскольку в зерноуборочном комбайне ACROS530 установка зазора МСУ задается на выходе, по крайней, 17-й планке подбарабанья (в соответствии с руководством по эксплуатации), в рамках данной работы для упрощения алгоритма управления были рассчитаны коэффициенты аппроксимации только для данной планки.

Полученная аппроксимационная зависимость между величиной зазора и ходом гидроцилиндра имеет вид:

$$X_L = -3,865 \cdot 10^{-5} \cdot gap_{17}^3 + 7,641 \cdot 10^{-3} \cdot gap_{17}^2 - 2,57 \cdot gap_{17} + 134,227. \quad (79)$$

Анализ полученной зависимости показал, что метод кубического сплайна обеспечивает высокую точность аппроксимации в рабочем диапазоне зазоров, причем такая форма уравнения является удобной для реализации в алгоритмах управления ЭГП.

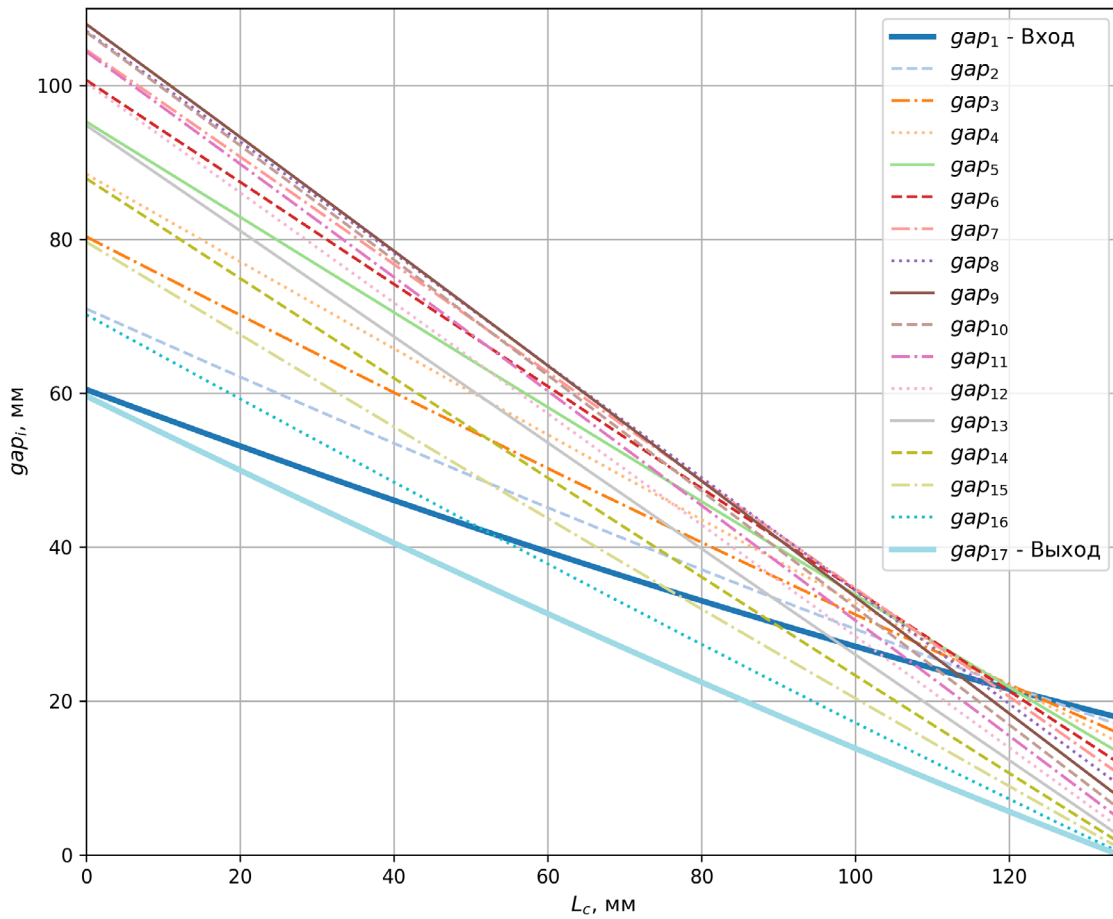


Рис. 5. Зависимость зазоров МСУ от хода гидравлического цилиндра  
 Fig. 5. Relationship between the concave gaps and the hydraulic cylinder stroke

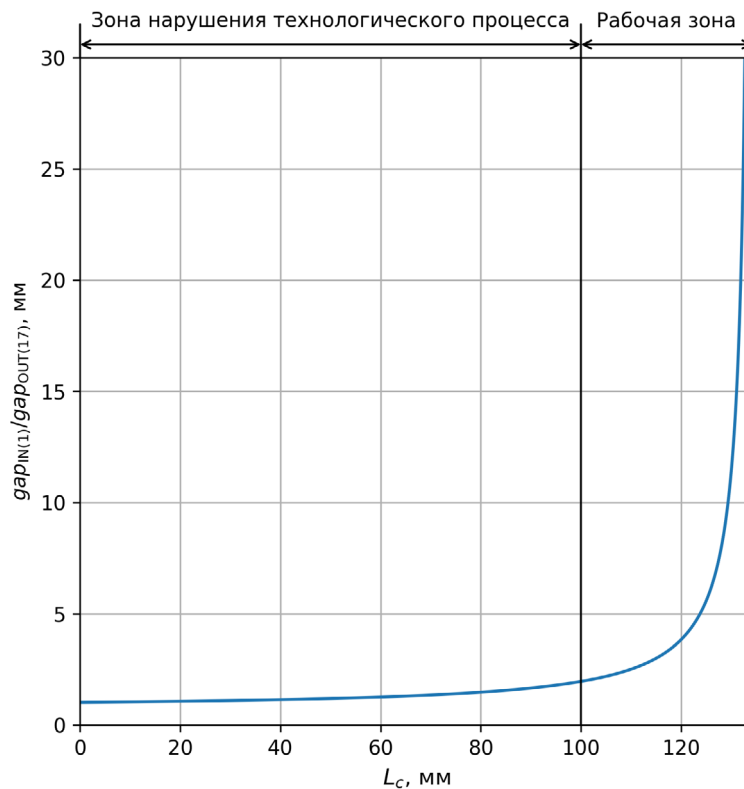


Рис. 6. Зависимость отношения входного зазора к выходному зазору МСУ от хода гидравлического цилиндра  
 Fig. 6. Relationship between the ratio of the inlet gap to the outlet concave gap and the hydraulic cylinder stroke

### Выводы

1. Предложенная структурная схема электрогидравлического привода с замкнутыми контурами управления положением, скоростью и давлением позволяет повысить точность и устойчивость регулирования зазора при изменяющихся условиях работы. Предложенная архитектура отличается оптимальным сочетанием компактности и энергоэффективности.

2. Аналитическая зависимость зазора МСУ от хода исполнительного гидроцилиндра позволяет

учитывать геометрию механизма подвески подбарабанья. Диапазон хода цилиндра от 0 до 134 мм соответствует пределам регулирования зазоров на выходе (17-я планка) от 59,6 до 0 мм, а на входе (1-я планка) – от 60,5 до 18 мм.

3. Для реализации управляющего алгоритма получена обратная зависимость, аппроксимированная методом кубического сплайна, что обеспечивает возможность использования в системе управления при сниженной вычислительной нагрузке.

### Список источников

1. Папаскири Т.В., Митрофанов С.В., Богданчиков И.Ю. и др. Анализ структуры посевных площадей России в рамках концепции устойчивого земледелия // *Аграрная наука*. 2024. Т. 1, № 9. С. 136-145. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-386-9-136-145>
2. Мерчалова М.Э., Тарасенко А.П., Оробинский В.И., Соколин Н.Н. Совершенствование технологии получения качественных семян и продовольственного зерна // *Лесотехнический журнал*. 2014. Т. 4, № 1 (13). С. 36-40. EDN: SAXJXV
3. Cherkasova E., Golinitzky P., Antonova U., Pupkova D., Gusev S. Ensuring the safety of grain raw materials used in the production of grain products. In: *E3S Web of Conferences*, 2023;390:02018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339002018>
4. Аль-Аббас А., Балабанов В.И. Исследование оптимальных показателей молотильного аппарата при обмолоте пшеницы // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2011. № 3. С. 168-172. EDN: OCRHVN
5. Антибас И.Р., Савостина Т.П., Саед Б.И. Влияние параметров молотильно-сепарирующего устройства на обмолот // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2017. Т. 17, № 2. С. 108-115. <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-2-108-115>
6. Vlăduț N.-V. et al. Research on the identification of some optimal threshing and separation regimes in the axial flow apparatus. *Agriculture*. 2023;13(4):838. <https://doi.org/10.3390/agriculture13040838> <https://repository.iuls.ro/handle/20.500.12811/3676>
7. Wang S., Peng B., Wu H. et al. Design and modelling of the full-feed peanut picking device with self-adaptive adjustable working clearance and feeding rate. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2024;16(6):97-106. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20231606.8135>
8. Молотильно-сепарирующее устройство зерноуборочного комбайна: Патент № 110591 Российская Федерация, МПК А01F 12/18(2006.01) / А.П. Троценко, Е.М. Ященко, В.С. Василенко, В.Я. Куликов, С.О. Корсунов, В.Е. Кравченко: № 2011125722/13: заявл. 22.06.2011: опубл. 27.11.2011, Бюл. № 33. EDN: BLCRYX
9. Механизм регулирования положения деки зерноуборочного комбайна: Патент № 118831 Российская Федерация, МПК А01D41/12 (2006.01) / Е.В. Голуменков, В.Е. Кравченко, С.О. Корсунов, В.С. Василенко, С.А. Покотило, Д.В. Кокорин; заявл. 20.03.2012: опубл. 10.08.2012, Бюл. № 22. EDN: KGTRI
10. Механизм подвески и регулирования подбарабанья зерноуборочного комбайна: Патент № 199269 Российская Федерация, МПК А01F 12/28 (2006.01) / А.В. Тютюников, С.Г. Ожеред, П.С. Попок; заявл. 09.04.2020; опубл. 24.08.2020, Бюл. № 24. EDN: PNQFSY
11. Beskopylny A.N., Ivliev E., Grishchenko V., Medvedev D. Load and positional constraints' impact on the accuracy

### References

1. Papaskir T.V., Mitrofanov S.V., Bogdanchikov I. Yu., et al. Analysis of the structure of Russian acreage within the framework of the concept of sustainable agriculture. *Agrarian science*. 2024;1(9):136-145. (In Russ.) <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-386-9-136-145>
2. Merchalova M., Tarasenko A., Orobinsky V., Sorokin N. Improving technology for obtaining high-quality seeds and food grains. *Forestry Engineering Journal*. 2014;1:36-40. (In Russ.) <https://doi.org/10.12737/3343>
3. Cherkasova E., Golinitzky P., Antonova U. et al. Ensuring the safety of grain raw materials used in the production of grain products. In: *E3S Web of Conferences*, 2023.390:02018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339002018>
4. Al-Abbas A., Balabanov V.I. Study of optimal indicators of a threshing machine during wheat threshing. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2011;(3):168-172. (In Russ.)
5. Antypas I.R., Savostina T.P., Saed B.I. Effect of threshing-separating device parameters on threshing. *Vestnik of Don State Technical University*. 2017;17(2):108-115. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-2-108-115>
6. Vlăduț N.-V. et al. Research on the identification of some optimal threshing and separation regimes in the axial flow apparatus. *Agriculture*. 2023;13:838. <https://doi.org/10.3390/agriculture13040838>
7. Wang S., Peng B., Wu, H., Hu, Z., Sun D., Wang Y., Cao M. Design and modelling of the full-feed peanut picking device with self-adaptive adjustable working clearance and feeding rate. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2024;16(6):97-106. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20231606.8135>
8. Trotsenko A.P., Yashchenko E.M., Vasilenko V.S. et al. Threshing and separating unit of a combine harvester: Patent, No. 110591 Russian Federation, IPC A01F 12/18(2006.01), 2011. (In Russ.)
9. Golumenkov E.V., Kravchenko V.E., Korsunov S.O. et al. Adjustment mechanism of combine harvester concave position: Patent, No. 118831 Russian Federation, IPC A01D41/12(2006.01), 2012. (In Russ.)
10. Tyutyunikov A.V., Ozhered S.G., Popok P.S. Concave suspension and adjustment mechanism for combine harvesters: Patent, No. 199269 Russian Federation, IPC A01F 12/28(2006.01), 2020. (In Russ.)
11. Beskopylny A.N., Ivliev E., Grishchenko V., Medvedev D. Load and positional constraints' impact on the accuracy and dynamic performance of an autonomous adaptive electrohydraulic pump-controlled actuator for mobile equipment. *Actuators*. 2025;14:333. <https://doi.org/10.3390/act14070333>
12. Yan Z., Ge L., Quan L. Energy-efficient electro-hydraulic power source driven by variable-speed motor. *Energies*. 2022;15:4804. <https://doi.org/10.3390/en15134804>

and dynamic performance of an autonomous adaptive electrohydraulic pump-controlled actuator for mobile equipment. *Actuators*. 2025;14:333. <https://doi.org/10.3390/act14070333>

12. Yan Z., Ge L., Quan L. Energy-efficient electro-hydraulic power source driven by variable-speed motor. *Energies*. 2022;15(13):4804. <https://doi.org/10.3390/en15134804>

13. Nie Y., Liu J., Lao Z., Chen Z. Modeling and extended state observer-based backstepping control of underwater electro hydrostatic actuator with pressure compensator and external load. *Electronics*. 2022;11(8):1286. <https://doi.org/10.3390/electronics11081286>

14. Huang Q., Li B., Xu H. The design and testing of a PEA powered ankle prosthesis driven by EHA. *Biomimetics*. 2022;7:234. PMID: PMC9776366

15. Niu Z., Liu Y.-S., Wang L., Yang S., Li X. Portable electro-hydraulic actuator technology based on spherical micro pump. In: *IEEE International Conference on Aircraft Utility Systems*. 2016:114-118. <https://doi.org/10.1109/AUS.2016.7748031>

### Информация об авторах

<sup>1</sup> **Ивлиев Евгений Андреевич**, младший научный сотрудник, преподаватель; 123ivliev123@mail.ru<sup>✉</sup>; <https://orcid.org/0000-0002-6606-2015>; SPIN-код: 6564-9944

<sup>2</sup> **Грищенко Вячеслав Игоревич**, канд. техн. наук., заведующий кафедрой; vig84@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1422-2811>; SPIN-код: 1839-5387

<sup>1,2</sup> Донской государственный технический университет; 344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

### Вклад авторов

Е.А. Ивлиев – проведение исследований, сбор и обработка данных, формальный анализ, подготовка черновика рукописи, визуализация;

В.И. Грищенко – руководство исследованиями, концептуализация, методология, научное редактирование и доработка окончательной версии рукописи.

Статья поступила 30.09.2025, после рецензирования и доработки 05.03.2026, принята к публикации 26.03.2026

13. Nie Y., Liu J., Lao Z., Chen Z. Modeling and extended state observer-based backstepping control of underwater electro hydrostatic actuator with pressure compensator and external load. *Electronics*. 2022;11:1286. <https://doi.org/10.3390/electronics11081286>

14. Huang Q., Li B., Xu H. The design and testing of a PEA powered ankle prosthesis driven by EHA. *Biomimetics*. 2022;7:234. <https://doi.org/10.3390/biomimetics7040234>

15. Niu Z., Liu Y.-S., Wang L., Yang S., Li X. Portable electro-hydraulic actuator technology based on spherical micro pump. In: *IEEE International Conference on Aircraft Utility Systems*, 2016:114-118. <https://doi.org/10.1109/AUS.2016.7748031>

### Author Information

**Evgeniy A. Ivliev**<sup>1</sup>, Junior Research Engineer, lecturer; 123ivliev123@mail.ru<sup>✉</sup>; <https://orcid.org/0000-0002-6606-2015>

**Vyacheslav I. Grishchenko**<sup>2</sup>, CSc (Eng), Head of the Department; vig84@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1422-2811>

<sup>1,2</sup> Don State Technical University; Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344003, Russia

### Author Contribution

Е.А. Ivliev – investigation, data collection and processing, formal analysis, writing – original draft, visualization;

В.И. Grishchenko – research supervision, conceptualization, methodology, writing – review and editing of the manuscript.

Received 30.09.2025; Revised 05.03.2026; Accepted 26.03.2026

# ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 378

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-114-121>



## Разработка адаптивно-компетентностной модели корпоративного обучения работников старших возрастных групп на предприятиях агропромышленного комплекса

*П.И. Ананченкова*

Национальный научно-исследовательский институт общественного здоровья имени Н.А. Семашко; г. Москва, Россия

[ananchenkova@yandex.ru](mailto:ananchenkova@yandex.ru); <http://orcid.org/0000-0003-3683-5168>

**Аннотация.** Демографическое старение рабочей силы и технологическая модернизация АПК формируют объективную необходимость создания адаптивно-компетентностной модели корпоративного обучения работников старших возрастных групп (50+) на предприятиях агропромышленного комплекса. Исследования проведены с целью разработки и теоретического обоснования педагогической модели корпоративного обучения работников старших возрастных групп на предприятиях агропромышленной отрасли, учитывающей отраслевые, возрастные и институциональные особенности. Теоретико-методологическая база включает в себя андрагогический, компетентностный, акмеологический и социально-институциональный подходы. Использованы системный и сравнительно-аналитический анализы, контент-анализ научных и нормативных источников, экспертные оценки и педагогическое моделирование. Представлена модель, интегрирующая практикоориентированное обучение «на рабочем месте», персонализацию темпа и форматов (модульные микрокурсы), межпоколенческое наставничество и капитализацию эмпирических компетенций, обязательные модули по охране труда и биобезопасности, поэтапную цифровую инклюзию с ориентацией на «минимально достаточную цифровую компетенцию». Показано, что внедрение модели повышает производственную эффективность и надежность операций, снижает травматизм, укрепляет вовлеченность работников 50+ и межпоколенческую преемственность, а также согласуется с национальной политикой активного долголетия и международными рекомендациями Международной организации труда. Научная новизна состоит в уточнении содержания корпоративного обучения для работников 50+ применительно к отрасли, формулировке принципов цифровой инклюзии и в предложении оценочных критериев, сочетающих производственные и социально-психологические показатели. Практическая значимость заключается в возможности использования модели как теоретико-методологической основы для проектирования типовых программ корпоративного обучения в организациях агропромышленного комплекса.

**Ключевые слова:** агропромышленный комплекс; корпоративное обучение; работники старших возрастов; андрагогика; компетентностный подход; наставничество; цифровая инклюзия

**Для цитирования:** Ананченкова П.И. Разработка адаптивно-компетентностной модели корпоративного обучения работников старших возрастных групп на предприятиях агропромышленного комплекса // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 2. С. 114-121. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-114-121>

## ORIGINAL ARTICLE

## Development of an adaptive competence model for corporate training of employees of older age groups at agro-industrial enterprises

*P.I. Ananchenkova*

N.A. Semashko National Research Institute of Public Health; Moscow, Russia  
ananchenkova@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0003-3683-5168>

**Abstract.** Demographic aging of the workforce and technological modernization of the agro-industrial complex determine an objective need for the development of an adaptive competency-based model for corporate training of older workers (aged 50+) at agro-industrial enterprises. The research aimed to develop and provide theoretical grounds for a pedagogical model for corporate training of older workers in the agro-industrial sector, taking into account industry-specific, age-related, and institutional characteristics. The theoretical and methodological framework includes andragogical, competency-based, acmeological, and socio-institutional approaches. The author employed systemic and comparative-analytical methods, content analysis of scientific and regulatory sources, expert assessments, and pedagogical modeling. The presented model integrates practice-oriented on-the-job training, personalized learning pace and formats (modular micro-courses), cross-generational mentoring, capitalization of empirical competences, mandatory modules on occupational safety and biosecurity, and phased digital inclusion focused on “minimally sufficient digital competence.” The article proves that implementation of the model increases operational efficiency and reliability, reduces injury rates, strengthens the engagement of workers aged 50+, promotes cross-generational continuity, and aligns with national active aging policies as well as international recommendations of the International Labour Organization. The added scientific value of the study outcomes consists in refining the content of corporate training for workers aged 50+ specific to the industry, formulating principles of digital inclusion, and proposing evaluation criteria that combine production and socio-psychological indicators. Practically significant is the possibility of using the model as a theoretical and methodological foundation for designing standard corporate training programs at agro-industrial organizations.

**Keywords:** agro-industrial sector; corporate training; older workers; andragogy; competency-based approach; mentoring; digital inclusion

**For citation:** Ananchenkova P.I. Development of an adaptive competence model for corporate training of employees of older age groups at agro-industrial enterprises. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(2):114-121 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-114-121>

### Введение

Российский агропромышленный комплекс (АПК) в последние десятилетия переживает масштабные структурные и технологические преобразования, обусловленные цифровизацией, развитием точного земледелия, внедрением биобезопасных и ресурсосберегающих технологий. Эти процессы сопровождаются демографическим старением рабочей силы, которое отчетливо проявляется как в национальной экономике, так и в сельскохозяйственном секторе.

По данным Федеральной службы государственной статистики, доля работников старших возрастных групп (50 лет и старше) в общей структуре занятых в сельском хозяйстве превышает аналогичный показатель по экономике в целом<sup>1</sup>. Для сельских территорий характерна высокая концентрация работников предпенсионного и пенсионного возраста, что

объясняется как миграционным оттоком молодежи в города, так и ограниченным предложением альтернативных форм занятости. В результате усиливается нагрузка на системы внутрифирменного обучения, переобучения и профессиональной адаптации, призванные поддерживать производственную эффективность и безопасность труда в условиях технологических изменений.

Международные организации, включая Международную организацию труда (МОТ) и Продовольственную и сельскохозяйственную организацию ООН (ФАО), фиксируют глобальный тренд старения занятости в агропродовольственных системах и подчеркивают необходимость обеспечения равного доступа работников старших возрастов к обучению. Согласно докладу МОТ вовлечение старших сотрудников в программы корпоративного и профессионального обучения является ключевым условием поддержания конкурентоспособности, устойчивости производства и профилактики профессиональных

<sup>1</sup> Труд и занятость в России. 2023: Статистический сборник / Росстат. М.: Росстат, 2023. URL: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Trud\\_2023.pdf](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Trud_2023.pdf) (дата обращения: 01.10.2025).

рисков<sup>2</sup>. ФАО в своем отчете, в разделах о дефиците кадров и смене поколений в агропродовольственных системах, отмечает, что в странах с высокой долей работников 50+ без системного обучения наблюдаются снижение инновационной активности предприятий и рост зависимости от внешнего трудового ресурса<sup>3</sup>.

В российской практике проблематика обучения работников старших возрастных групп получает институциональное развитие через национальную политику в области человеческого капитала – в частности, через федеральный проект «Старшее поколение» в составе национального проекта «Демография», который завершился в 2024 г. и в составе нового национального проекта «Продолжительная и активная жизнь», стартовавшего в 2025 г. Проект предусматривает меры по продлению активного долголетия, профессиональному переобучению, повышению квалификации граждан старших возрастов и формированию возрастно-дружественной трудовой среды. Эти положения закреплены в нормативных актах Минтруда и Минздрава России, что создает нормативно-правовую основу для корпоративных программ обучения в организациях АПК<sup>4</sup>.

Проблема корпоративного обучения старших работников отражена в ряде отечественных и зарубежных исследований. Теоретические аспекты обучения взрослых (андрагогика) разработаны в трудах М. Ноулза [1] и других зарубежных и российских исследователей, где акцентируются автономность взрослого обучающегося, ориентация на практическое применение знаний и опора на профессиональный опыт. В отечественных исследованиях Е.В. Сайгиной [2], Е.А. Черных [3] и др. рассмотрены возрастные особенности усвоения информации, адаптация темпа и форм обучения работников 50+, а также влияние корпоративной культуры на вовлеченность старших сотрудников в образовательные программы. Однако, как показывает анализ публикаций и данных мониторинга Минсельхоза РФ, специфика корпоративного

обучения работников старших возрастных групп именно в агропромышленной отрасли остается недостаточно изученной. Недостаточно разработаны методологические модели и инструменты адаптации образовательных технологий к условиям сельского производства, отличающихся сезонностью, рискованностью и высокой технологической неоднородностью.

На международном уровне проблема обучения работников старших возрастных групп рассматривается в контексте реализации принципов достойного труда и недискриминации. Согласно документам Международной организации труда (МОТ) государства и работодатели должны обеспечивать равный доступ к профессиональному развитию и корпоративному обучению для работников всех возрастов включая старшие категории. МОТ выделяет ключевые направления: обучение без возрастных ограничений, межпоколенческое наставничество, обновление компетенций с учетом цифровизации, адаптацию образовательных программ под особенности старших сотрудников. Обучение пожилых работников рассматривается как фактор продления активной трудовой деятельности, повышения производственной безопасности и устойчивости предприятий в условиях дефицита трудовых ресурсов.

Таким образом, актуальность проведенных исследований обусловлена совокупностью факторов: демографическим старением трудовых ресурсов в сельском хозяйстве; усложнением производственных процессов АПК; необходимостью повышения цифровой и производственной грамотности старших работников; недостаточной разработанностью педагогических моделей корпоративного обучения для данной категории персонала.

**Цель исследований:** разработка и теоретическое обоснование педагогической модели корпоративного обучения работников старших возрастных групп на предприятиях агропромышленной отрасли, учитывающей отраслевые, возрастные и институциональные особенности.

### Материалы и методы

Методологическая основа исследований определялась междисциплинарным характером проблемы и сочетанием педагогических, социологических и управленческих подходов. При разработке адаптивно-компетентностной модели корпоративного обучения работников старших возрастных групп предприятий агропромышленного комплекса использовался комплекс теоретических (системный, структурно-функциональный и сравнительно-аналитический, контент-анализ) и эмпирических

<sup>2</sup> International Labour Organization. Extending the productive working life of older workers: the role of human resource management. Geneva: ILO, 2025. URL: <https://www.ilo.org/publications/extending-productive-working-life-older-workers-role-human-resource> (дата обращения: 01.10.2025).

<sup>3</sup> FAO. The Status of Youth in Agrifood Systems: global report. Rome: FAO, 2025. URL: <https://openknowledge.fao.org/items/5f0cec17-98b7-4d74-9cb1-6ea829b7d920> (дата обращения: 01.10.2025).

<sup>4</sup> Паспорт федерального проекта «Старшее поколение» (в составе нацпроекта «Демография»). Минздрав/Минтруд РФ, ред. от 21.02.2021. URL: [https://static-0.minzdrav.gov.ru/system/attachments/attaches/000/049/418/original/Паспорт\\_Федерального\\_проекта\\_Старшее\\_поколение.pdf?1581316472](https://static-0.minzdrav.gov.ru/system/attachments/attaches/000/049/418/original/Паспорт_Федерального_проекта_Старшее_поколение.pdf?1581316472)

методов (педагогическое проектирование, интерпретация и обобщение).

С теоретико-методологической точки зрения исследования учитывают комплекс методик:

- андрагогический подход, раскрывающий закономерности обучения взрослых;

- компетентностный подход, акцентирующий внимание на результатах, выраженных в практических умениях;

- акмеологический подход, рассматривающий зрелость как ресурс профессионального развития;

- социально-институциональный подход, который трактует корпоративное обучение как элемент кадровой и инновационной политики предприятия.

### Результаты и их обсуждение

По данным российских и международных исследований, рынок труда сельской местности характеризуется устойчивыми структурными вызовами: ростом числа возрастных работников, ограниченностью возможностей трудоустройства и низкой мобильностью кадров. В статье Ю.Н. Никулиной подчеркивается, что средний возраст работников в сельском хозяйстве превышает аналогичный показатель по экономике в целом, а отток молодежи в города ведет к дефициту квалифицированных кадров и росту зависимости от старших работников, что повышает потребность в механизмах постоянного обучения и поддержания профессиональной компетентности персонала [4].

Подобные выводы содержатся в аналитических материалах Минсельхоза РФ, согласно которым доля сельских работников 50+ в ряде регионов достигает 35...40% [5]. При этом значительная часть их не имеет доступа к программам систематического повышения квалификации, особенно в части цифровых и технологических компетенций.

По мнению С.В. Дульзон, «проблем в современном аграрном образовании РФ более чем достаточно», среди которых, по мнению автора, – устаревшая и изношенная производственная база вузов; усиление конкуренции между сельской и городской молодежью при сокращении бюджетных мест на дневной форме обучения; отсутствие гарантированного трудоустройства после окончания учебного заведения; низкая конкурентоспособность выпускаемых специалистов и др. [6]. В этих условиях актуализируются необходимость сохранения и развития имеющихся кадровых ресурсов отрасли, наращивание их профессиональных компетенций.

В рамках отраслевых программ Минсельхоза России («Кадры в АПК», «Профессионалитет», «Развитие сельских территорий») уделяется внимание непрерывному профессиональному образованию

и внутрифирменным стажировкам. Корпоративное обучение в этих документах обозначается как ключевой элемент трансляции инновационных технологий на рабочем месте. Особое значение придается созданию условий для межпоколенческой передачи знаний и формированию систем наставничества, что соответствует как международным, так и отечественным стратегиям кадровой устойчивости.

«Корпоративное обучение – это способ предоставить учащимся знания и навыки, необходимые им для выполнения своей работы на высоком уровне», – отмечают в своей работе С.В. Седельников, В.Г. Дмитренко, М.С. Селимханов [7]. Корпоративное обучение рассматривается как институционализированный процесс внутри организации, обеспечивающий поддержание и развитие компетенций персонала в соответствии с производственными целями и требованиями безопасности. Разработка системы корпоративного обучения работников старших возрастных групп в агропромышленной отрасли должна основываться на совокупности принципов, отражающих особенности взрослого обучения, специфику сельскохозяйственного производства и международные стандарты инклюзивного образования. В педагогико-управленческом контексте можно выделить 5 следующих базовых концептов.

1. *Андрагогичность и практикоориентированность*, согласно которой взрослый обучающийся выступает как субъект, обладающий опытом, потребностью в автономии и стремлением к немедленному применению знаний. Обучение должно быть конкретно производственным, строиться на решении реальных рабочих задач и ситуаций, возникающих в процессе сельскохозяйственного цикла: от посевной до переработки продукции. Образовательные модули, выстроенные по принципу «Учимся, чтобы действовать», позволяют повысить вовлеченность старших работников и снизить их сопротивление инновациям. Такое обучение включает в себя производственные кейсы, анализ инцидентов, «разбор полетов» и демонстрацию успешных практик. Практическая направленность способствует формированию у работников установки на результат и укрепляет уверенность в собственной профессиональной состоятельности, что особенно важно для категории 50+.

2. *Персонализация темпа и форматов обучения*. Оптимальной формой для предприятий АПК становятся модульные микрокурсы, включающие в себя короткие, но насыщенные по содержанию занятия, направленные на освоение конкретных умений – например, безопасной работы с техникой, базовые навыки цифрового ввода данных или обновленные требования к охране труда. Дробление материала

позволяет адаптировать обучение к напряженному производственному графику и сезонности аграрных работ. Персонализация реализуется через сочетание теоретической части с практикой на рабочем месте, что отражает концепцию «обучения в действии». Важным компонентом является наставничество, когда опытные сотрудники старшего возраста выступают одновременно в качестве обучающихся и тьюторов, обучая младших коллег или осваивая новые технологии в сотрудничестве с ними.

**3. Признание и капитализация опыта.** Старшие сотрудники представляют собой носителей уникальных эмпирических знаний, которые невозможно формализовать в учебных материалах, но которые обеспечивают непрерывность и надежность производственного процесса. Корпоративное обучение должно восполнять пробелы в их компетенциях и капитализировать накопленный опыт, превращая его в ресурс для развития всей организации. Эта идея реализуется в формате межпоколенческого обучения, когда работники старшего возраста выступают в качестве наставников, передающих профессиональные традиции, технологические приемы и неформальные нормы трудового поведения, а молодые специалисты – в качестве носителей цифровых и управленческих инноваций. Таким образом, обучение приобретает взаимный характер, а корпоративная культура – преемственность и устойчивость. В результате формируется так называемая обратная петля знаний, где опыт старших становится основой для инноваций, а инновации – инструментом обновления профессиональной идентичности старших работников.

**4. Безопасность и здоровье.** Для работников агропромышленной отрасли вопросы охраны труда, эргономики и биобезопасности являются неотъемлемой частью профессиональной компетенции. Пожилые сотрудники чаще испытывают состояние повышенной утомляемости, сталкиваются с риском травматизма и профессиональными заболеваниями, что требует усиленного акцента на обучении безопасным методам работы. В структуру корпоративных программ следует включать обязательные модули по безопасности труда, обращая особое внимание на сезонные риски: использование химических реагентов, эксплуатацию техники, работу на открытом воздухе в экстремальных температурных условиях. Такие программы должны информировать и формировать постоянные поведенческие установки, превращая безопасные действия в автоматизм. В международных рекомендациях МОТ подчеркивается, что обучение работников старших возрастных групп вопросам безопасности и здоровьесбережения – обязательный элемент корпоративной ответственности

работодателя. Это не только инструмент профилактики, но и механизм продления трудоспособности и активного долголетия.

**5. Цифровая инклюзия.** Современная трансформация агропромышленного комплекса невозможна без внедрения цифровых решений: систем дистанционного мониторинга, электронных журналов, систем учета производственных операций и корпоративных СДО (систем дистанционного обучения). Однако для работников старшего возраста цифровая среда может восприниматься как фактор отчуждения, вызывающий неуверенность и снижение самооценки. Поэтому обучение должно быть направлено на постепенное и психологически комфортное освоение цифровых инструментов начиная с базовых операций (вход в систему, поиск инструкций, заполнение электронных форм). Подход «минимально достаточной цифровой компетенции» позволяет снять излишнее напряжение и сфокусировать внимание на том, что действительно необходимо для выполнения рабочих обязанностей. Особенно эффективным является сочетание очных демонстраций и коротких видеороликов, обеспечивающих запоминание через визуальные образы. Цифровая инклюзия не только повышает производственную эффективность, но и формирует у работников старшего возраста чувство сопричастности к современным изменениям, снижает страх перед технологиями и укрепляет уверенность в собственных силах.

Реализация перечисленных принципов позволит выстроить инклюзивную, гибкую и результативную систему корпоративного обучения работников старших возрастных групп в агропромышленной отрасли, обеспечить адаптацию производственного персонала к технологическим изменениям, сохранить межпоколенческое профессиональное наследие, повысить уровень безопасности и здоровья труда, укрепить социальную сплоченность трудового коллектива. Данные принципы находятся в соответствии с международными подходами, закрепленными в документах МОТ, и с задачами российской государственной политики в сфере активного долголетия и развития человеческого капитала.

Необходимо отметить, что большинство существующих корпоративных программ ориентировано на молодых специалистов, тогда как работники 50+ часто остаются вне системного образовательного контекста [8]. Это приводит к фрагментарности подготовки кадров, снижению инновационной восприимчивости и росту социальной дистанции между поколениями в коллективе.

Внедрение адаптивно-компетентностной модели корпоративного обучения призвано устранить

эти диспропорции, обеспечить интеграцию образовательных, социальных и производственных механизмов. Модель предполагает гибкое проектирование образовательных траекторий, модульный формат, практикоориентированное содержание и обязательную компоненту наставничества [9]. Такой подход согласуется с рекомендациями Международной организации труда о равном доступе работников всех возрастов к обучению и о развитии корпоративных систем «longlife learning»<sup>1</sup>.

Авторская адаптивно-компетентностная модель корпоративного обучения работников старших возрастных групп на предприятиях АПК может стать универсальной теоретико-методологической платформой для проектирования, реализации и оценки программ профессионального развития на предприятиях агропромышленного комплекса (рис.).

Созданная модель позволит: снять противоречие между потребностью предприятий АПК в инновационно-активных кадрах и ограниченными возможностями обучения старших работников; обеспечить научно обоснованный механизм сочетания педагогических, управленческих и производственных компонентов процесса обучения; сформировать основу для проектирования типовых программ корпоративного

обучения, учитывающих отраслевую специфику, сезонность, технологические риски и возрастные особенности персонала; учитывать корпоративные стандарты и оценочные инструменты компетентности работников 50+; укрепить межпоколенческое взаимодействие внутри трудовых коллективов, превращая опыт старших работников в ресурс инновационного развития.

#### *Сильные стороны модели*

– Адаптивность к возрастным, когнитивным и профессиональным особенностям обучающихся. Модель учитывает закономерности андрагогики и акмеологии, предполагая индивидуализацию образовательных траекторий, выбор темпа и формы обучения, использование микромодулей и гибких сценариев. Это позволяет преодолеть барьеры восприятия информации у работников старшего возраста, повысить вовлеченность и эффективность усвоения материала.

– Практикоориентированный характер обучения. Образовательные модули строятся вокруг реальных производственных задач, конкретных кейсов и технологических процессов агропромышленного производства. Такой подход повышает мотивацию работников, усиливает прикладной эффект обучения



**Рис. Схема «Адаптивно-компетентностная модель корпоративного обучения работников старших возрастных групп предприятий агропромышленного комплекса»**

**Fig. Diagram “Adaptive competence model of corporate training at employees of older age groups of agro-industrial enterprises”**

<sup>1</sup> ILO Technical Note 4.4: Instruments concerning older workers. ILO. Geneva, 2024. [https://www.ilo.org/sites/default/files/2024-08/16\\_TN%204-4%20-%20Older%20workers%20%289%20Aug%202024%29-EN.pdf](https://www.ilo.org/sites/default/files/2024-08/16_TN%204-4%20-%20Older%20workers%20%289%20Aug%202024%29-EN.pdf)

и напрямую влияет на производственные показатели (качество продукции, соблюдение стандартов, снижение ошибок и простоев).

– Компетентностная логика построения содержания. Основное внимание уделяется формированию совокупности профессиональных, цифровых, коммуникативных и наставнических компетенций, а не передаче знаний как таковых. Это обеспечивает устойчивый результат и позволяет интегрировать обучение в систему управления качеством персонала предприятия.

– Инклюзивность и социальная устойчивость. Модель опирается на международные рекомендации МОТ и российскую политику активного долголетия, создавая возрастно-дружественную среду. Обучение старших работников снижает риск профессиональной маргинализации, способствует сохранению их социального статуса и укреплению корпоративной сплоченности.

– Межпоколенческое взаимодействие и капитализация опыта. В модели закреплена идея интеграционного обучения – передачи эмпирических компетенций (неявных профессиональных знаний) через наставничество. Это сохраняет уникальные компетенции внутри предприятия и способствует их «переводу» в современный технологический контекст, формируя преемственность поколений.

– Вклад в культуру безопасности труда. Включение обязательных модулей по биобезопасности, охране труда и эргономике делает обучение частью профилактической политики предприятия. Это снижает травматизм, повышает надежность производственных операций и продлевает трудоспособность работников.

– Методологическая универсальность. Модель может быть адаптирована к разным подотраслям АПК (животноводство, растениеводство, переработка) и масштабам предприятий (от фермерских хозяйств до холдингов). Она совмещает педагогическую гибкость и управленческую применимость, что делает ее базовой платформой для отраслевых стандартов корпоративного обучения.

*Слабые стороны* адаптивно-компетентностной модели корпоративного обучения заключаются в организационно-технических и институциональных ограничениях. Реализация модели требует наличия квалифицированных тьюторов и наставников, развитой инфраструктуры и цифровой готовности предприятий, что в сельских территориях часто затруднено. Внедрение модели предполагает изменение корпоративной культуры – переход от формального подхода к обучению к концепции непрерывного

профессионального развития, что вызывает психологическое сопротивление у части работников и руководителей. Экономические факторы также сдерживают процесс: сезонность и ограниченные бюджеты предприятий снижают мотивацию к долгосрочным инвестициям в обучение. Дополнительной проблемой является трудность измерения «мягких» результатов (уверенность, готовность к инновациям, преемственность), что усложняет оценку эффективности обучения. При недостаточном методическом сопровождении существует риск формализации образовательного процесса, особенно на крупных предприятиях, где персонализация обучения ограничена [10].

Несмотря на объективные ограничения, адаптивно-компетентностная модель обладает значительным потенциалом развития. Ее сильные стороны – гуманистическая направленность, практико-деятельностная логика и межпоколенческая интеграция – позволяют рассматривать модель не только как инструмент обучения, но и как элемент стратегического управления человеческим капиталом в АПК. Слабые стороны носят в основном организационно-технический характер и могут быть устранены при системной поддержке со стороны государства и отраслевых институтов (через субсидирование программ переобучения, развитие цифровой инфраструктуры и подготовку кадров для работы со старшими обучающимися).

Предложенная адаптивно-компетентностная модель корпоративного обучения работников старших возрастных групп предприятий АПК сочетает педагогическую гибкость с экономической целесообразностью, обеспечивает баланс между сохранением опыта и внедрением инноваций, способствует повышению производственной безопасности, эффективности и социального благополучия работников старших возрастных групп.

## Выводы

1. Демографическое старение рабочей силы и технологическая модернизация АПК формируют объективную необходимость создания специальных педагогических моделей корпоративного обучения, ориентированных на потребности работников старших возрастных групп. Без системного обучения возрастает риск технологического отставания и снижения производственной эффективности.

2. Адаптивно-компетентностная модель корпоративного обучения обеспечивает интеграцию образовательных, социальных и производственных механизмов, позволяя учитывать когнитивные и профессиональные особенности старших работников,

сезонность аграрного труда и требования цифровой трансформации отрасли.

3. Внедрение модели способствует повышению производственной безопасности, развитию цифровых и наставнических компетенций, снижению возрастной сегрегации и укреплению корпоративной сплоченности трудовых коллективов.

4. Предложенная адаптивно-компетентностная модель корпоративного обучения работников

старших возрастных групп предприятий агропромышленного комплекса сочетает в себе педагогическую гибкость, социальную инклюзивность и экономическую целесообразность, что позволяет рассматривать ее как методологическую базу для проектирования типовых программ корпоративного обучения и формирования возрастнo-дружественной кадровой политики в аграрном секторе.

#### Список источников

1. Knowles M. *The Adult Learner: A Neglected Species*. Houston: Gulf Pub. Co. 1990
2. Сайгина Е.В., Горобец А.А. Особенности корпоративного обучения персонала разного социального возраста на современном предприятии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки. 2023. № 1. С. 61-74. <https://doi.org/10.15593/2224-9354/2023.1.5>
3. Черных Е.А., Тонких Н.В., Клейменов М.В. Готовность общества и работодателей к обучению сотрудников предпенсионного возраста // Вопросы управления. 2022. № 4 (77). С. 61-73. EDN: SIHYPD
4. Nikulina Y.N. Rural employment in Russia: Present conditions and prospects. *Russian Journal of Economics*. 2023;9(4):351-370. <https://doi.org/10.32609/j.ruje.9.112008>
5. Сергеев Ю.С. Кадровое обеспечение агропромышленного комплекса России // Аграрное и земельное право. 2024. № 12 (240). С. 333-334. EDN: GWRGDO
6. Дульзон С.В. О некоторых аспектах подготовки кадров для сельского хозяйства в современных условиях // Вестник Национального института бизнеса. 2023. № 3 (51). С. 53-61. EDN: CBISPC
7. Седельников С.В., Дмитренко В.Г., Селимханов М.С. Система корпоративного обучения как стратегия профессионального роста специалиста // Проблемы современного педагогического образования. 2024. № 82-3. С. 323-328. EDN: UBWVXE
8. Ананченкова П.И. Корпоративные программы обучения пожилых сотрудников как инструмент развития внутрифирменного человеческого капитала // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия «Экономика». 2025. № 2 (360). С. 17-27. EDN: BKZGQC
9. Хуторской А.В. Педагогическая инноватика: методология, теория, практика: Монография. М.: УНЦ ДО, 2005. 221 с. EDN: QTZYMX
10. Болотов В.А., Сериков В.В. Компетентностная модель: от идеи к образовательной программе // Педагогика. 2003. № 10. С. 8-14. EDN: SKCHXT

#### Информация об авторе

**Ананченкова Полина Игоревна**, канд. социол. наук, канд. эконом. наук, доцент, заведующий кафедрой экономики и социологии здравоохранения, Национальный научно-исследовательский институт общественного здоровья имени Н.А. Семашко; [ananchenkova@yandex.ru](mailto:ananchenkova@yandex.ru); <http://orcid.org/0000-0003-3683-5168>

Статья поступила 21.10.2025, после рецензирования и доработки 01.04.2026, принята к публикации 03.04.2026

#### References

1. Knowles M. *The Adult Learner: A Neglected Species*. Houston: Gulf Pub. Co. 1990.
2. Saigina E.V., Gorobets A.A. Corporate training of personnel of different social ages at a modern enterprise. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Sotsialno-ekonomicheskiye nauki*. 2023;1:61-74. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/2224-9354/2023.1.5>
3. Chernykh E.A., Tonkikh N.V., Kleimenov M.V. Willingness of society and employers to train employees of pre-retirement age. *Management issues*. 2022;4:61-73. (In Russ.) <https://doi.org/10.22394/2304-3369-2022-4-61-73>
4. Nikulina Y.N. Rural employment in Russia: Present conditions and prospects for agricultural and non-agricultural sectors. *Russian Journal of Economics*. 2023;9(4):351-370. <https://doi.org/10.32609/j.ruje.9.112008>
5. Sergeenko Yu.S. Staffing of the Russian agro-industrial complex. *Agrarnoe i zemelnoe pravo*. 2024;12:333-334. (In Russ.)
6. Dulzon S.V. On some aspects of staff training for agriculture in modern conditions. *Bulletin of the National Institute of Business*. 2023;3(51):53-61. (In Russ.)
7. Sedelnikov S.V., Dmitrenko V.G., Selimkhanov M.S. Corporate training system as a strategy for specialist's professional growth. *Problemy sovremennogo pedagogicheskogo obrazovaniya*. 2024;82-3:323-328. (In Russ.)
8. Ananchenkova P.I. Corporate training programs for senior employees as a tool developing intra-company human capital. *Vestnik Aдыgeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika*. 2025;2(360):17-27. (In Russ.)
9. Khutorskoy A.V. Pedagogical innovation studies: methodology, theory, and practice: Monograph. Moscow: UNTS DO, 2005. 221 p. (In Russ.)
10. Bolotov V.A., Serikov V.V. Competence model: from an idea to a training curriculum. *Pedagogika*. 2003;10:8-14. (In Russ.)

#### Author Information

**Polina I. Ananchenkova**, CSc (Sociology); CSc (Econ), Associate Professor, Head of the Department of Economics and Sociology of Healthcare; N.A. Semashko National Research Institute of Public Health; [ananchenkova@yandex.ru](mailto:ananchenkova@yandex.ru); <http://orcid.org/0000-0003-3683-5168>

Received 21.10.2025; Revised 01.04.2026; Accepted 03.04.2026

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 (максимум до 15 слов, включает ключевые слова!)**

**Инициалы, фамилия первого автора<sup>1</sup>, инициалы, фамилия второго автора<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Название организации первого автора (в именительном падеже без составных частей названий организаций); страна, город

<sup>2</sup> Название организации второго автора; страна, город

<sup>1</sup> e-mail первого автора; [https://orcid.org/..](https://orcid.org/)

<sup>2</sup> e-mail второго 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 name<sup>1</sup>, Full name<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Name of the organization; full address; e-mail

<sup>2</sup> Name of the organization; full address; e-mail

<sup>1</sup> e-mail; [https://orcid.org/..](https://orcid.org/)

<sup>2</sup> 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  $\lim$ ,  $\lg$ ,  $\text{const}$ ,  $\sin$ ,  $\cos$ ,  $\text{tg}$ ,  $\min$ ,  $\max$  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. Правильный стиль 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](mailto:agroeng@rgau-msha.ru)