



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

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Научный журнал

Том 27. № 6 / 2025

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

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

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

Основан в 2003 году

Периодичность: 6 номеров в год

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

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

Редактор – **И.В. Мельникова**
Литературная обработка текста –
В.И. Марковская
Компьютерный набор и верстка –
А.С. 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
<https://agroengineering.timacad.ru/jour/index>

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

Подписано в печать 19.12.2025
Формат 60 84/8
Тираж 500 экз.

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

Главный научный редактор

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

Заместитель главного научного редактора:

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

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

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

Члены редакционного совета:

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

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

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

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

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

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

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

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

Сергей Павлович Казанцев, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов и деталей машин, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), kazansev@rgau-msha.ru

Тамара Петровна Кобозева, д-р с.-х. наук, профессор ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (г. Москва, Россия), tkobozeva@rgau-msha.ru

Алексей Иванович Купреенко, д-р техн. наук, профессор кафедры технологического оборудования животноводства и перерабатывающих производств, Брянский государственный аграрный университет (с. Кокино Брянская обл., Россия), <https://orcid.org/0000-0002-3781-9592>, kupreenkoai@mail.ru

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

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

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

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

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

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

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

Иностранные члены редакционного совета:

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

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

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

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

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

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



AGRICULTURAL ENGINEERING (MOSCOW)

Scientific Journal

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

Vol. 27(6)/2025

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

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

EXECUTIVE EDITORS:

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

Editors' office address:

58, Timiryazevskaya str., Moscow,
127434, Russian Federation
Tel.: +7 (499) 976-07-27;
E-mail: agroeng@rgau-msha.ru
<https://agroengineering.timacad.ru/jour/index>

Printed by APC Publishing LLC
office 8, 1, 45, Dmitrovskoe Ave.,
Moscow, 127550, Russia
Tel.: +7 (499) 976-51-84, (985) 109-44-19

Passed for printing 19.12.2025

Format – 60 84/8

Circulation – 500 copies.

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

Science Editor-in-Chief

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

Deputy Science Editor-In-Chief:

Aleksei S. Dorokhov, Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor, Director Deputy for Science and Organizational Work, Federal State Budgetary Research Institution – Federal Scientific Agroengineering Center (VIM) (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>, dorokhov.vim@yandex.ru
Oleg A. Leonov, DSc (Eng), Professor, Head of the Metrology, Standardization and Quality Management Department, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>, oleonov@rgau-msha.ru

Petr F. Kubrushko, Corresponding Member of the Russian Academy of Education, DSc (Ed), Deputy Scientific Editor-in-Chief, Head of the Department of Pedagogy and Psychology of Professional Education, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-2142-1037>, kubrushko@rgau-msha.ru

Members of the Editorial Board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Vladimir F. 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

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

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

International members of the Editorial Board:

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

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

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

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

Quang Hoang Duc, PhD (Chem), Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Centre (Ho Chi Minh, Vietnam), <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782>, quanghoang510@gmail.com

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

С.Г. Мударисов, И.Р. Мифтахов, И.М. Фархутдинов Интеллектуальная система учета и картографирования всходов сахарной свеклы по данным RGB-аэрофотосъемки с применением методов глубокого обучения	4
Я.П. Лобачевский, С.И. Старовойтов Моделирование воздействия сжатого воздуха на поверхностный слой суглинистой почвы	17
И.А.Х. Хуссейн, А.Г. Левшин, И.Н. Гаспарян Повышение эффективности механизированной уборки пшеницы в условиях Ирака с применением полиэтиленовых рукавов	27
О.А. Ступин, А.В. Шитикова, А.С. Апатенко Методика вибрационной диагностики гидравлической системы технологических машин при выполнении сельскохозяйственных работ на примере шестеренного насоса НШ-32А	35
Е.А. Улюкина, С.С. Гусев, А.С. Свиридов, Н.Д. Блинов, Н.П. Попова Композиционный биodeградируемый полимерный материал для фильтрационных систем	45
В.Т. Водяников, Е.Ф. Малыха, Н.В. Сергеева Направления совершенствования воспроизводства технического потенциала аграрного сектора экономики страны	52
С.Д. Ридный, Е.В. Кулаев, Д.И. Грицай, Н.А. Баганов, А.А. Димитров, М.А. Мастепаненко, А.Г. Арженовский Разработка агрегата штангового типа с пневмотранспортной системой для дифференцированного внесения тукосмесей в ресурсосберегающих геоинформационных агротехнологиях точного земледелия	60
И.Б. Опарина, А.Ю. Иванников, М.А. Каплан, М.А. Севостьянов, А.Г. Колмаков Технология изготовления серебросодержащих мембранных фильтров с бактериостатическими свойствами	67

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

О.А. Леонов, Г.Н. Темасова, П.В. Голинский, И.Н. Кравченко, А.Н. Самордин Оценка качества процесса обработки опорных шеек распределителей под ремонтный размер с помощью статистических инструментов контроля	75
Ю.В. Катаев, А.С. Саяпин, Е.В. Пестряков, М.Н. Костомакхин, Н.А. Петрищев Устройство для мониторинга системы подачи воздуха и диагностических параметров работы ДВС сельскохозяйственной техники	82

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Т.А. Мамедов, В.И. Загинайлов, А.Ю. Шелягина, О.В. Лештаев, Д.С. Карлаков Влияние параметров нагрузки и линии электропередачи на качество электрической энергии	92
О.В. Григораш, Д.А. Нормов, А.В. Савенко, Е.А. Денисенко, В.Л. Болотин Способы снижения уровня электромагнитных помех статических преобразователей электроэнергии	101
П.В. Дородов, Е.Н. Гусенников, С.И. Юран, Т.А. Широкова, И.Г. Поспелова Математическая модель температурного поля конвективного теплообмена в фитотроне	109

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

А.Л. Севостьянов, О.Ю. Гришаева, С.И. Головин, Р.А. Булавинцев Аграрное образование будущего: баланс между академическими знаниями и запросами рынка труда	118
--	-----

CONTENTS

FARM MACHINERY AND TECHNOLOGIES

S.G. Mudarisov, I.R. Miftakhov, I.M. Farkhutdinov Automated sugar beet seedling detection and mapping using a UAV-borne RGB camera and deep learning techniques	4
Y.P. Lobachevsky, S.I. Starovoitov Modeling the impact of compressed air on the surface layer of loamy soil	17
I.A.H. Hussein, A.G. Levshin, I.N. Gasparyan Improving the efficiency of mechanized wheat harvesting in Iraq using polyethylene hoses	27
O.A. Stupin, A.V. Shitikova, A.S. Apatenko Vibration diagnostics method applied to the hydraulic equipment of technological machines: a case of a gear pump NSh-32A	35
E.A. Ulyukina, S.S. Gusev, A.S. Sviridov, N.D. Blinov, N.P. Popova Biodegradable polymer composite for filtration applications	45
V.T. Vodyannikov, E.F. Malykha, N.V. Sergeeva Areas for improving the technical capacity reproduction of the national agricultural sector	52
S.D. Ridniy, E.V. Kulaev, D.I. Gritsai, N.A. Baganov, A.A. Dimitrov, M.A. Mastepanenko, A.G. Arzhenovskiy Design of a pneumatic boom unit for variable-rate fertilizer application in resource-saving geoinformation agrotechnologies of precision farming	60
I.B. Oparina, A.Yu. Ivannikov, M.A. Kaplan, M.A. Sevostyanov, A.G. Kolmakov Technology for the production of silver-containing membrane filters with bacteriostatic properties	67

TECHNICAL SERVICE IN AGRICULTURE

O.A. Leonov, G.N. Temasova, P.V. Golinskiy, I.N. Kravchenko, A.N. Samordin Quality assessment of machining the main bearings journals of camshafts to oversize dimensions using statistical process control tools	75
Yu.V. Kataev, A.S. Sayapin, E.V. Pestryakov, M.N. Kostomakhin, N.A. Petrishchev Device for monitoring the air intake system and diagnostic parameters of agricultural machinery engines	82

POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION

T.A. Mamedov, V.I. Zaginailov, A.Yu. Shelyagina, O.V. Leshtayev, D.S. Karlov Impact of load and transmission line parameters on power quality	92
O.V. Grigorash, D.A. Normov, A.V. Savenko, E.A. Denisenko, V.L. Bolotin Ways to reduce electromagnetic interference in static electric power converters	101
P.V. Dorodov, E.N. Gusennikov, S.I. Yuran, T.A. Shirobokova, I.G. Pospelova Mathematical model of the temperature field of convective heat exchange in a phytotron	109

THEORY AND METHODOLOGY OF PROFESSIONAL EDUCATION

A.L. Sevostyanov, O.Yu. Grishaeva, S.I. Golovin, R.A. Bulavintsev Agricultural education of the future: a balance between academic knowledge and labor market demands	118
---	-----

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.34:004.896

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-4-16>

Интеллектуальная система учета и картографирования всходов сахарной свеклы по данным RGB-аэрофотосъемки с применением методов глубокого обучения

С.Г. Мударисов^{1,2,3}, И.Р. Мифтахов², И.М. Фархутдинов³^{1,2,3} Башкирский государственный аграрный университет; г. Уфа, Россия¹ salavam@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-9344-2606>² info323@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3125-3532>³ ildar1702@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6443-8584>

Аннотация. Современное растениеводство требует высокоточной и оперативной оценки густоты стояния сельскохозяйственных культур. Для сахарной свеклы данный показатель напрямую влияет на урожайность и рентабельность производства. Целью исследований является разработка и апробация методики автоматизированного учета всходов сахарной свеклы с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и алгоритмов глубокого обучения, обеспечивающей высокую точность и скорость обработки данных. Полевые исследования проведены в 2025 г. в Буздякском районе Республики Башкортостан на посевах промышленного гибрида сахарной свеклы. Съемка выполнялась БПЛА DJI Phantom 4 Pro с RGB-камерой на высоте 20 м. Первичная сегментация растительности проводилась по индексу Excess Green (ExG) с последующей бинаризацией и морфологической фильтрацией. Для детекции и классификации проростков применены архитектуры YOLOv8n и YOLOv5m, обученные на размеченной выборке аэрофотоснимков. Точность алгоритмов оценивалась сравнением с результатами визуального подсчета на контрольных участках. Модель YOLOv8n продемонстрировала наилучшие показатели (Precision – 0,80; Recall – 0,70; AP50-0,75; R^2 – 0,99) при минимальной относительной ошибке 1,11% и RMSE3,0. YOLOv5m показала сопоставимую корреляцию (R^2 – 0,98), но уступила по полноте и точности. Разработанный алгоритм позволил сформировать карту пространственного распределения всходов, пригодную для интеграции в системы точного земледелия. Предложенная технология обеспечивает сокращение трудозатрат на учет всходов в десятки раз по сравнению с ручными методами и исключает субъективные ошибки. Полученные результаты подтверждают возможность промышленного внедрения метода для оперативной оценки состояния посевов, принятия решений о пересеве и дифференцированного внесения агротехнологических мероприятий. Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением функционала алгоритма для одновременного картографирования сорной растительности и адаптации метода к другим культурам.

Ключевые слова: сахарная свекла; подсчет всходов; автоматизированный подсчет всходов; беспилотный летательный аппарат; БПЛА; технологии глубокого обучения; нейросеть; компьютерное зрение; YOLO; системы точного земледелия; аэрофотосъемка

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-16-20094; <https://rscf.ru/project/25-16-20094/>.

Материалы, представленные в статье, получены в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Для цитирования: Мударисов С.Г., Мифтахов И.Р., Фархутдинов И.М. Интеллектуальная система учета и картографирования всходов сахарной свеклы по данным RGB-аэрофотосъемки с применением методов глубокого обучения // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 6. С. 4-16. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-4-16>

ORIGINAL ARTICLE

Automated sugar beet seedling detection and mapping using a UAV-borne RGB camera and deep learning techniques

S.G. Mudarisov¹✉, I.R. Miftakhov², I.M. Farkhutdinov³

^{1,2,3} Bashkir State Agrarian University; Ufa, Russia

¹ salavam@gmail.com✉; <https://orcid.org/0000-0001-9344-2606>

² info323@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3125-3532>

³ ildar1702@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6443-8584>

Abstract. Accurate and timely assessment of plant stand density is crucial for modern crop production, directly impacting sugar beet yield and profitability. This study aims to develop and validate a highly accurate automated method for counting sugar beet seedlings using unmanned aerial vehicles (UAVs) and deep learning algorithms, optimizing both precision and processing speed. Field experiments were conducted in 2025 on commercial sugar beet fields in the Buzdyak district of the Republic of Bashkortostan. A DJI Phantom 4 Pro UAV equipped with an RGB camera captured aerial imagery from a 20-meter altitude. Initial vegetation segmentation employed the Excess Green (ExG) index, followed by binarization and morphological filtering. The YOLOv8n and YOLOv5m deep learning architectures, trained on a manually annotated dataset of aerial images, were then implemented for seedling detection and classification. Algorithm performance was rigorously evaluated against manual seedling counts on control plots. The YOLOv8n model demonstrated superior performance (Precision: 0.80; Recall: 0.70; AP50: 0.75; R^2 : 0.99), achieving a minimum relative error of 1.11% and a root mean squared error (RMSE) of 3.0. While YOLOv5m exhibited comparable correlation (R^2 : 0.98), it displayed lower recall and precision. The developed algorithm enables the generation of spatial distribution maps of seedlings, readily integrated into precision agriculture systems. This technology significantly reduces labor costs for seedling counting – by orders of magnitude compared to manual methods – while also eliminating subjective errors. The obtained results demonstrate the feasibility for industrial implementation, enabling rapid crop condition assessment, informed replanting decisions, and targeted site-specific agro-technological interventions. Future research will focus on expanding the algorithm to incorporate simultaneous weed mapping and adapting it for use with other crops.

Keywords: sugar beet; automated seedling counting; unmanned aerial vehicle; deep learning; computer vision; YOLO; precision agriculture; aerial imagery

Funding: This research was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 25-16-20094; <https://rscf.ru/project/25-16-20094/>.

The materials presented in the article were obtained within the program of strategic academic leadership “Priopity-2030” in the development program of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Bashkir State Agrarian University”

For citation: Mudarisov S.G., Miftakhov I.R., Farkhutdinov I.M. Automated sugar beet seedling detection and mapping using a UAV-borne RGB camera and deep learning techniques. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(6):4-16 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-4-16>

Введение

Автоматизированный подсчет всходов сельскохозяйственных культур является актуальной задачей в агроинженерии [0]. В первые недели после посева равномерность и плотность распределения растений по полю критически влияют на дальнейший рост и урожайность культуры [2, 3]. В частности, для сахарной свеклы установлено, что конечный урожай корнеплодов и выход сахара существенно зависят от плотности стояния растений. Неравномерные и разреженные всходы могут быть вызваны биотическими факторами (некачественные или пораженные вредителями семена, болезни всходов)

и абиотическими стрессами: засухой, образованием почвенной корки, градом, ветровой эрозией, заморозками и пр. Обычно фермеры оценивают количество всходов сахарной свеклы вручную на небольших контрольных участках (около 10 м²) в фазе семядолей – первых настоящих листьев (ВВСН 10-12), после чего полученные данные экстраполируются на весь участок. Если средняя численность проросших растений оказывается ниже критического уровня (~ 45 тыс/га), то поле подлежит пересеву. Густота около 82...110 тыс/га считается оптимальной для максимальной урожайности и качества продукции [4].

Визуальный подсчет молодых растений на больших площадях связан с высокими затратами труда и времени. Например, для учета всходов на селекционных делянках вручную может потребоваться до 120...250 человеко-часов на 1 га, причем пересчету подвергается лишь 20...50% площади опытного поля [4].

Детальный мониторинг полевой всхожести необходим в семеноводстве и селекции. Процент дружных всходов и доля жизнеспособных семян зачастую решают, будет ли новый сорт сахарной свеклы принят рынком [4]. Сведения о количестве взойдящих растений на разных участках поля имеют прикладное значение для прогнозирования урожайности и выявления зон с проблемными условиями (уплотнение почвы, подтопление и др.).

Помимо собственно культуры, на численность и развитие всходов сильно влияет конкуренция со стороны сорняков. Без эффективной защиты посевов сорная растительность способна снизить урожай корнеплодов сахарной свеклы до 90...95% от потенциала [4]. Именно поэтому современное выращивание свеклы предусматривает комплекс мероприятий по контролю сорняков включая междурядную обработку и дифференцированное применение гербицидов. Для оптимизации таких приемов требуются точные данные о местоположении и густоте сорной растительности в посевах. Актуальной научной задачей является разработка автоматизированных методов учета всходов и сорняков на поле, позволяющих аграриям быстро получать объективную информацию о посевах и оперативно принимать решения о частичном пересеве редких участков, локальной подкормке или выборочном гербицидном прополочном вмешательстве.

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА, или дроны) с бортовыми камерами позволяют получать данные по требованию и в оптимальные сроки фенологического развития растений [5]. Аэрофотосъемка с малых высот дает оперативные снимки поля высокого разрешения. Даже обычные RGB-камеры, установленные на БПЛА, способны фиксировать отдельные проростки и сорняки на больших площадях с пространственным разрешением порядка 1 см и выше [6]. Для анализа таких данных применяются методы компьютерного зрения. Ранние подходы основывались на пороговой сегментации изображений, выделении зеленых пикселей растительности и последующей фильтрации и морфологическом разделении объектов для подсчета числа отдельных растений [6]. Однако традиционные алгоритмы обработки изображений

недостаточно надежны при изменении условий съемки и фонового окружения (освещенность, тени, структура почвы и т.д.) [6, 7]. Более того, подобные методы требуют ручной настройки порогов и признаков для каждого случая, что затрудняет их масштабирование.

В качестве современного решения выступают технологии глубокого обучения – в частности, сверточные нейронные сети (CNN), которые автоматически обучаются выявлению нужных объектов на изображениях [8]. Разработаны два основных подхода: 1) семантическая сегментация изображений с выделением классов «Растение» и «Фон» и дальнейший подсчет отдельных особей по сегментационной маске; 2) объектное детектирование, при котором нейросеть обнаруживает и локализует каждое растение ограничивающим прямоугольником или точкой центра [8]. Оба подхода успешно применяются для различных культур. Например, Lottes и соавт. использовали полносвязные сверточные сети (FCN) на последовательности изображений с наземного робота для одновременного определения точек стеблей и классификации растений (культурных или сорных) на посевах сахарной свеклы [9]. С развитием беспилотных технологий эти наработки были перенесены на аэрофотосъемку. Barreto и соавт. (2021) реализовали полностью автоматический подсчет растений на ортомозаике посева сахарной свеклы с помощью глубокого нейросетевого алгоритма и достигли средней погрешности менее 5% по сравнению с визуальным счетом. Их подход успешно протестирован на кукурузе и клубнике и продемонстрировал ошибку прогнозирования числа растений < 4%. Схожих результатов добились и другие исследователи. Так, для учета густоты всходов хлопчатника с дрона с помощью нейросети YOLOv3 получено совпадение с наземным контролем с коэффициентом детерминации $R^2 \sim 0,96...0,97$ [10, 11]. Эти примеры подтверждают, что сочетание БПЛА и методов машинного зрения способно обеспечить быстрый и точный подсчет растений на поле, практически нивелируя человеческий фактор. В то же время в условиях России и, в частности, Республики Башкортостан подобные технологии пока не получили широкого распространения, что определяет научную и прикладную значимость данных исследований.

Цель исследований: разработка и апробация методики автоматического подсчета всходов сахарной свеклы с использованием беспилотного летательного аппарата и алгоритмов машинного зрения в условиях Республики Башкортостан.

Материалы и методы

Полевые исследования проводили в 2025 г. на опытных посевах сахарной свеклы в Буздякском районе Республики Башкортостан (54°35' с.ш., 54°35' в.д.). Почвенный покров участка представлен черноземами выщелоченными, характеризующимися высокой влагоемкостью и содержанием гумуса 5,5...6,2%, что соответствует агрономически благоприятным условиям для возделывания сахарной свеклы [12]. Климат района – умеренно континентальный с продолжительным безморозным периодом (130-140 суток) и суммой активных температур выше 10°C порядка 2200...2400°C [12].

Посев выполнен промышленным гибридом сахарной свеклы в середине мая с междурядьями 45 см и нормой высева ~100 тыс. семян/га. Уход за посевами осуществлялся в соответствии с рекомендациями ВНИИССС¹ включая химическую прополку для минимизации сорной растительности.

Аэрофотосъемка и автоматизированный подсчет всходов выполняли в ранний вегетационный период, соответствующий фазам 1...4 настоящих листа по российской классификации и кодам BBCH 12-14² [13]. На данном этапе растения четко

идентифицируются по форме розетки, но еще не происходит смыкания листьев в рядках, что минимизирует ошибки сегментации [14].

Для фиксации стадий развития растений использовали систему фаз по российской агрономической классификации с приведением соответствий международной шкале BBCH (табл. 1).

Для обеспечения полного цикла исследований: от получения ортофотоснимков и построения цифровых моделей поверхности до статистической обработки данных и обучения нейросетевых алгоритмов – применили следующие приборы и оборудование:

- беспилотный летательный аппарат DJI Phantom 4 Pro с RGB-камерой (20 Мп, объектив – 8,8 мм, эквивалент фокусного расстояния – 24 мм, пространственное разрешение ~0,8 см/пиксель при высоте полета 20 м);

- двухчастотный GNSS-приемник (RTK) с точностью ±2 см для создания опорных точек;

- вычислительная станция: процессор Intel Core i7-9700K, графический ускоритель NVIDIA GTX 1080 (8 ГБ VRAM), 32 ГБ оперативной памяти;

- программное обеспечение: Agisoft Metashape Professional 1.8.4 (фотограмметрическая обработка),

Таблица 1

Соответствие фаз развития сахарной свеклы по российской системе и шкале BBCH

Table 1

Alignment of sugar beet development phases based on the Russian System and the BBCH Scale

Фаза развития (российская система)	Основные признаки	Код BBCH	Примечания
Всходы	Появление проростков на поверхности почвы, видны семядольные листья	09-10	Массовые всходы при 70...80% проросших семян
Семядоли	Развиты только семядольные листья, настоящие отсутствуют	10	Длительность – 5-7 дней
1...2 настоящих листа	Появление первой пары настоящих листьев	12	Начало активного фотосинтеза
3...4 настоящих листа	Листовая розетка увеличивается, листья располагаются под углом	14	Активное наращивание вегетативной массы
5...6 настоящих листьев	Розетка закрывает значительную часть междурядья	16	Начало формирования оптимальной густоты полога
Смыкание листьев в рядках	Листья соседних растений соприкасаются в ряду, почва затенена	19-31	Снижение испарения влаги, подавление сорняков
Смыкание листьев по междурядьям	Формируется сплошной листовой полог	31-39	Максимальная площадь листовой поверхности
Интенсивное утолщение корнеплода	Быстрый прирост массы корнеплода	41-49	Увеличение диаметра и массы
Накопление сахара	Замедление роста массы, активный синтез и отложение сахара	49-89	Период максимального содержания сахара
Биологическая (техническая) спелость	Прекращение роста, пожелтение листьев, готовность к уборке	89	Оптимальный срок уборки

¹ Всесоюзный научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара (примеч. авт.).

² BBCH-scale (beet). Wikipedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/BBCH-scale_\(beet\)](https://en.wikipedia.org/wiki/BBCH-scale_(beet)) (дата обращения: 15.08.2025)

Python 3.10, библиотеки OpenCV, scikit-image, scikit-learn, PyTorch 2.0, LabelStudio (разметка датасета).

Полетное задание планировали так, чтобы покрыть всю площадь опыта с продольным и поперечным перекрытием снимков ~75%, позволяющим затем сшивать изображения в единый ортофотоплан. Камера была откалибрована и ориентирована строго вниз (угол съемки NADIR), экспозиция устанавливалась вручную исходя из условий освещения во избежание пересвеченных участков.

Полученные аэрофотоснимки предварительно подвергали фотограмметрической обработке в специализированном программном комплексе Agisoft Metashape Professional (версия 1.8.4). На первом этапе выполнялось импортирование набора снимков, их выравнивание (align photos) и автоматическое определение внутренних параметров камеры (focal length, principal point, distortion coefficients). Для повышения геометрической точности создавался набор опорных точек (Ground Control Points, GCP), координаты которых были измерены при помощи двухчастотного GNSS-приемника в режиме RTK с точностью ± 2 см. После оптимизации выравнивания камер было выполнено построение плотного облака точек в режиме (high quality mode), на основе которого формировались цифровая модель поверхности (DSM) и ортофотоплан в геопривязанном виде (WGS84/UTM Zone 40N).

Для обеспечения достоверности предложенной методики автоматизированного подсчета всходов сахарной свеклы проведен комплекс статистических процедур. Точность работы алгоритмов оценивали по ключевым метрикам компьютерного зрения (Precision, Recall, F1-score, AP50, AP50:95). Для проверки согласованности автоматического и визуального подсчета использовали коэффициент

детерминации (R^2) и величину среднеквадратической ошибки (RMSE).

Для оценки статистической значимости различий между автоматическим и ручным подсчетом применяли t-критерий Стьюдента (двусторонний, $p < 0,05$), а также бутстрэп-анализ с формированием 1000 псевдобыборок, позволившим получить 95%-ные доверительные интервалы для ключевых метрик. Данный подход позволил не только подтвердить высокую точность автоматизированного метода, но и исключить вероятность случайных совпадений результатов.

Выбор архитектур YOLO обусловлен их высокой эффективностью в задачах объектной детекции в реальном времени. Модель YOLOv8n включена в исследования как облегченный вариант с низким числом параметров (~3,2 млн, обеспечивающий высокую скорость инференса (>120 FPS на GPU) и потенциальную интеграцию в мобильные и встраиваемые системы для полевых условий. Модель YOLOv5m, напротив, характеризуется увеличенным числом параметров (~21,2 млн, что повышает ее способность к обобщению, особенно при сложных условиях съемки (наличие сорняков, неоднородный фон, вариации освещенности). Сопоставительный анализ двух моделей позволил количественно оценить компромисс между вычислительной сложностью и точностью подсчета.

После фотограмметрической подготовки изображений в Agisoft Metashape дальнейшая обработка выполнялась в среде Python 3.10 с использованием библиотек OpenCV, NumPy, scikit-image и scikit-learn. Разработанный алгоритм автоматического выделения растений включал в себя два этапа: сегментацию по вегетационному индексу и классификацию растительных объектов.

Первый этап включал в себя 5 операций:

1. Сегментация растительности по показателю избытка зелени (Excess Green, ExG) (рис. 1) [15-17].

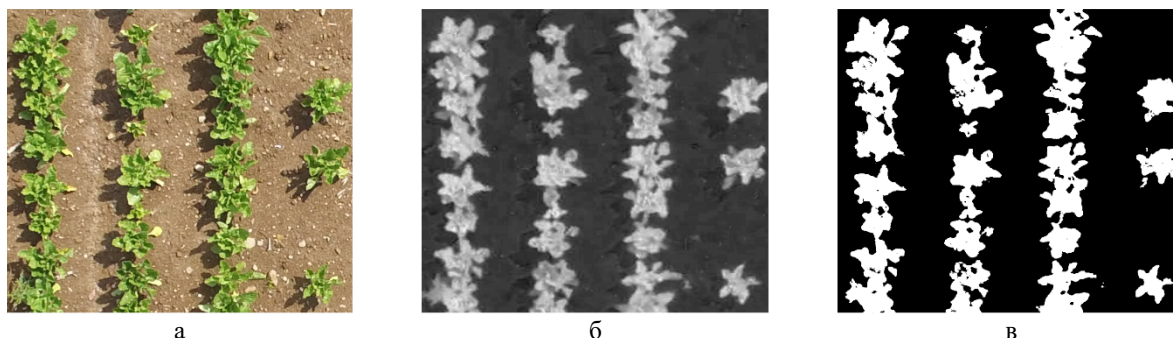


Рис. 1. Сегментация растительности по показателю избытка зелени (Excess Green, ExG):

а – оригинальное изображение; б – Excess Green, ExG индекс; в – сегментация растительности ($ExG > \text{порога}$)

Fig. 1. Vegetation segmentation based on the Excess Green (ExG) index:

a – original image; b – Excess Green, ExG index; c – vegetation segmentation ($ExG > \text{threshold}$)

Для каждого пикселя ортофотоплана вычисляли показатель избытка зелени с нормализованными каналами по формуле:

$$\text{ExG}_n = 2g - r - b,$$

а для «сырых» значений (8-бит) –

$$\text{ExG} = 2G - R - B,$$

где R , G , B – цифровые значения каналов красного, зеленого и синего цвета, нормированные в диапазон 0...255. Данный индекс эффективно выделяет зеленую растительность на фоне почвы при съемке в видимом диапазоне, не требуя мультиспектральных данных [17].

2. Бинаризация и формирование маски растительности (рис. 2).

На основе полученной карты ExG проводилась автоматическая бинаризация по методу Оцу, который определяет порог разделения классов «Растительность» и «Фон», исходя из распределения значений индекса [18]. Оптимальный порог t^* определялся путем максимизации межклассовой дисперсии:

$$t^* = \arg \max_t \sigma_b^2(t);$$

$$\sigma_b^2(t) = \omega_0(t)\omega_1(t)[\mu_0(t) - \mu_1(t)]^2,$$

где ω_k – доли классов «Фон»/«Растительность»; μ_k – их средние яркости.

Адаптивный учет различий в освещенности и цветовой температуре по полю позволил сформировать бинарную маску, на которой пиксели с ExG выше порога обозначались как «Зеленая растительность».

3. Предварительная фильтрация и морфологическая обработка.

Для устранения шумов и мелких артефактов, вызванных отражением света от влажной почвы или

растительных остатков, применяли морфологические операции:

– открытие (opening) с ядром 3×3 пикселя для удаления точечных шумов;

– закрытие (closing) с ядром 5×5 пикселей для сглаживания границ объектов:

$$M \circ B = (M \ominus B) \oplus B;$$

$$M \cdot B = (M \oplus B) \ominus B,$$

где \oplus , \ominus – дилатация и эрозия.

4. Выделение контуров и подготовка ROI (regions of interest).

Контурные растительных объектов определяли методом поиска связанных компонент (Connected Components Analysis). Каждая связанная область сохранялась как отдельный ROI с координатами ограничивающего прямоугольника.

5. Передача ROI в классификатор.

На этом этапе выполнялось различение культурных растений и остальных слоев с использованием обученной сверточной сети. На вход модели подавались фрагменты исходного RGB-изображения, соответствующие найденным ROI, что позволяло учитывать текстурные и морфологические признаки объекта, а не только цветовые характеристики.

Метод ExG + пороговая бинаризация применен на первом этапе как вычислительно легкий способ быстрой фильтрации фоновых пикселей, позволяющий существенно сократить объем данных, обрабатываемых нейросетью. Это важно при анализе ортофотопланов большой площади (сотни мегапикселей), когда прямая сегментация всей сцены глубокими моделями требует значительных вычислительных ресурсов [16, 17].

На втором этапе исследований для дифференциации культурных проростков использовали

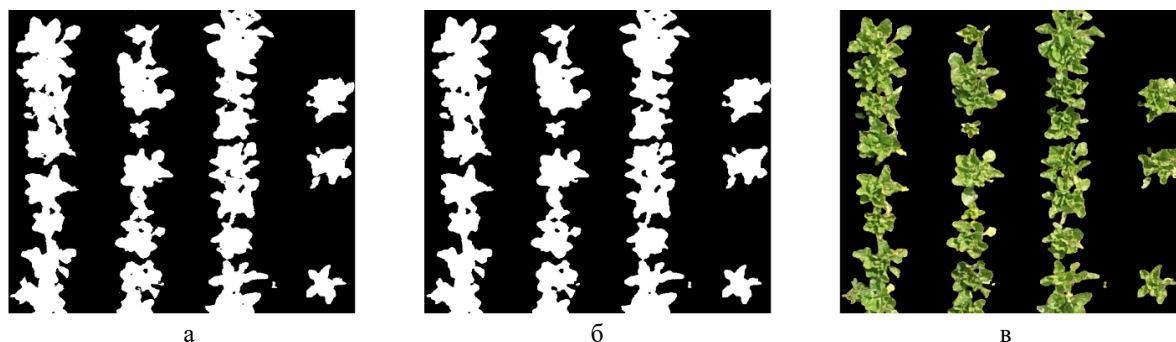


Рис. 2. Результаты бинаризации и построения маски растительности по индексу избытка зелени (ExG) с применением морфологической фильтрации:

а – бинаризация (метод Оцу); б – очищенная маска растительности; в – выделенная растительность

Fig. 2. Results of binarization and vegetation mask construction based on the Excess Green (ExG) index with the application of morphological filtering:

a – binarization (Otsu method); b – refined vegetation mask; c – extracted vegetation

обученную сверточную нейронную сеть на базе архитектур YOLOv8n и YOLOv5 [19]. В отличие от подхода пиксельной сегментации (FCN) методика YOLO выполняет прямое обнаружение и локализацию объектов на изображении в виде ограничивающих рамок (bounding boxes) и классовых меток, что позволяет значительно ускорить обработку данных и упростить интеграцию алгоритма в полевые мобильные системы.

Модель обучалась на размеченной вручную выборке, включающей в себя 800 фрагментов аэрофотоснимков в фазе развития BBCH 12-14. Разметка выполнялась в программе LabelStudio, где эксперт указывал ограничивающие рамки для каждого проростка сахарной свеклы и остальных объектов – сорняков (рис. 3).

Для каждой рамки присваивался соответствующий класс: «Свекла» – класс 0, «Остальной» – класс 1. Разметка сохранялась в формате YOLO (txt-файлы с нормализованными координатами центра, ширины и высоты рамки относительно размеров изображения). Для обучения и оценки моделей датасет был случайным образом разделен на 3 подмножества: обучающую выборку (70%), валидационную (20%) и тестовую (10%).

При формировании датасета учитывались следующие принципы:

- в каждое подмножество включались изображения из разных участков поля, чтобы исключить переобучение на фоне;

- валидационные и тестовые изображения не пересекались с обучающими по пространственным координатам;

- баланс классов «Свекла»/«Остальное» контролировался на уровне количества аннотированных объектов, а не только числа изображений.

Распределение объектов по классам и подмножествам представлено в таблице 2.

В процессе обучения выполнялась аугментация данных с использованием инструментов, встроенных в PyTorch и Ultralytics YOLO [20]:

- геометрические трансформации (повороты $\pm 15^\circ$, масштабирование $0,9-1,1 \times$, горизонтальные отражения);

- фотометрические трансформации (изменение яркости $\pm 20\%$, контрастности $\pm 20\%$, насыщенности $\pm 15\%$);

- случайное изменение гаммы и добавление гауссова шума ($\sigma = 0,01 \dots 0,03$).

Обучение моделей YOLOv8n и YOLOv5 проводили в среде PyTorch 2.0 на графическом процессоре NVIDIA GTX 1080 с использованием методики трансферного обучения. Начальные веса были инициализированы на основе предварительно обученных моделей на датасете COCO, что позволило ускорить сходимость и повысить точность на малом объеме данных. В процессе обучения использовалась функция потерь, включающая в себя компоненты CIoU Loss для регрессии координат рамок, Binary



Рис. 3. Пример аннотирования аэрофотоснимка посевов сахарной свеклы в системе Label Studio:
красный – класс «Свекла»; синий – класс «Остальное-сорняки»

Fig. 3. Example of annotating an aerial photograph of sugar beet crops in the Label Studio system:
red – class “Beet”; blue – class “Other – weeds”

Таблица 2

Распределение объектов в датасете по классам и подмножествам

Table 2

Distribution of objects in the dataset by classes and subsets

Подмножество	Количество изображений, ед.	Класс «Свекла», шт.	Класс «Остальное», шт.	Всего объектов, шт.
Обучающая выборка	560	29 120	3 360	32 480
Валидационная выборка	160	8 320	960	9 280
Тестовая выборка	80	4 160	480	4 640
Итого	800	41 600	4 800	46 400

Cross-Entropy (BCE) для классификации и BCE с логитами для сегментационной маски (в случае YOLOv8n-seg).

В процессе обучения отслеживали ключевые метрики качества: точность (Precision), полноту (Recall) и среднюю точность при различных порогах IoU – mAP@0.5 и mAP@0.5:0.95. Дополнительно фиксировали значения функций потерь для различных компонентов модели (box_loss, seg_loss, cls_loss, dfl_loss) как на обучающей, так и на валидационной выборках.

Для получения непосредственно количества растений алгоритм обрабатывал выходные bounding boxes класса «Свекла» из результатов детекции:

- исключались рамки с вероятностью ниже 0,5 (score threshold);
- применялось Non-Maximum Suppression (NMS) с порогом IoU = 0,45 для устранения дубликатов;
- каждой оставшейся рамке присваивались координаты центра, которые считались положением растения.

Автоматизированный подсчет всходов сахарной свеклы выполнялся простым суммированием всех центроидов детекций класса «Свекла». Полученные данные масштабировались до значения на 1 га:

$$N_{\text{га}} = \frac{N_{\text{plot}}}{A_{\text{plot}}} \cdot 10^4,$$

где N_{plot} – число растений на контрольной площадке; A_{plot} – площадь этой площадки, м².

Для контроля точности автоматического счета произведен традиционный визуальный подсчет растений на ряде пробных участков. На поле выбрали 15 пробных квадратов площадью 5 × 2 м в различных зонах (с краю поля, в центральной части, на участках с признаками ухудшенных условий). В фазу 2...4 настоящих листьев (ВВСН 12-14) два наблюдателя вручную подсчитали количество всходов внутри каждого такого квадрата, стараясь не пропустить скрытые сорняками или находящиеся в тени экземпляры. Эти данные послужили эталонными значениями (ground truth) для оценки алгоритма. Автоматизированный подсчет всходов по ортофотоснимкам

осуществлялся для тех же участков. Из общей карты выделяли фрагменты, соответствующие контрольным квадратикам, и извлекали число обнаруженных алгоритмом проростков внутри них. Точность оценивали по нескольким метрикам: а) абсолютной разнице между автоматическим и контрольным количеством растений; б) относительной ошибке в процентах, рассчитываемой по формуле $E = |N_{\text{авто}} - N_{\text{визуал}}| / N_{\text{визуал}} \cdot 100\%$; в) коэффициенту детерминации (R^2) линейной зависимости между автоматически подсчитанным и фактическим числом растений по всем выборкам.

Результаты и их обсуждение

Автоматическая детекция и сегментация всходов сахарной свеклы на аэрофотоснимках, полученных с беспилотного летательного аппарата, осуществлены в результате обучения и сравнительной оценки двух архитектур сверточных нейронных сетей YOLOv8n и YOLOv5m. Оценка эффективности моделей выполнялась по ключевым метрикам компьютерного зрения включая точность (Precision), полноту (Recall) и среднюю точность определения (mAP) при различных порогах IoU, а также по функциям потерь для детекции (box_loss), сегментации (seg_loss) и классификации (cls_loss).

Построенные графики (рис. 4, 5) отражают динамику изменения метрик и функций потерь, позволяя визуально оценить процесс сходимости моделей и выявить различия в их обучаемости, обобщающей способности и вычислительной производительности.

У YOLOv8n кривая train/box_loss снижается с 1,4 до 0,35, а val/box_loss демонстрирует устойчивое падение с 1,45 до 0,85 без значительных выбросов. Потери сегментации (seg_loss) и классификации (cls_loss) уменьшаются синхронно для тренировочной и валидационной выборок, что указывает на более стабильную сходимость. Precision(B) достигает 0,80; Recall(B) – около 0,70; mAP50(B) – 0,75; mAP50-95(B) – около 0,60. Для сегментации масок метрики выше, чем у YOLOv5m, – mAP50(M) ~0,69 и mAP50-95(M) ~0,37.

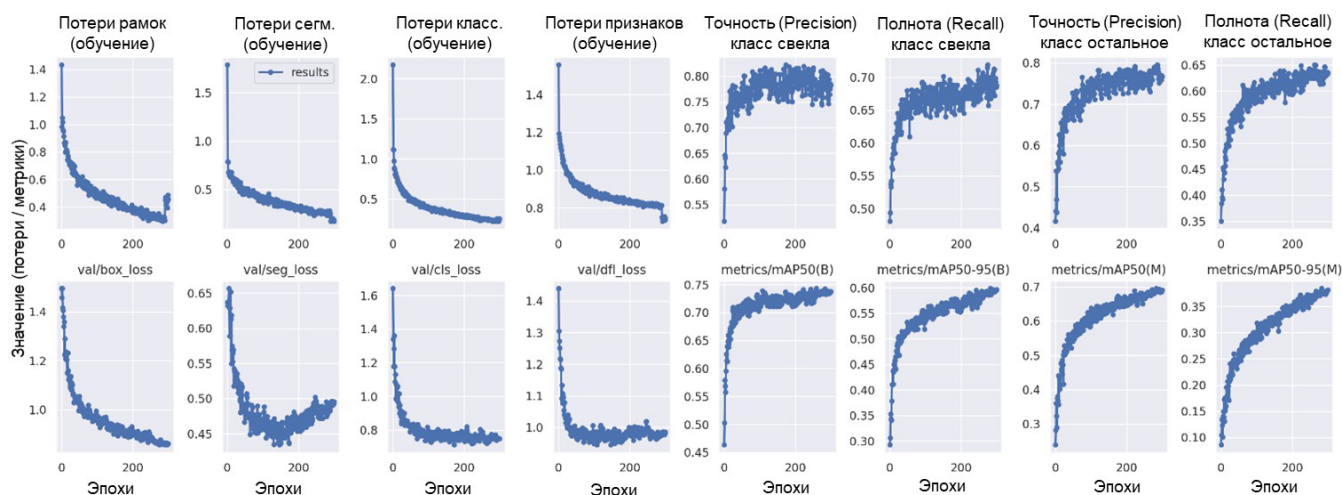


Рис. 4. Динамика обучения модели YOLOv8n при детекции и сегментации всходов сахарной свеклы

Fig. 4. Training dynamics of the YOLOv8n model for detection and segmentation of sugar beet seedlings

Из данных графиков рисунка 5 следует, что train/box_loss для YOLOv5m снижается с $\approx 1,75$ до 0,3. При этом val/box_loss колеблется в диапазоне 1,15...1,25, что указывает на возможные проблемы с обобщением; seg_loss и cls_loss также уменьшаются, но валидационные значения для сегментации растут после 100-й эпохи, что может говорить о начале переобучения. Precision(B) стабилизируется в районе 0,72; Recall(B) – около 0,44; mAP50(B) достигает примерно 0,51, а mAP50-95(B) – 0,33. Для масок (M) показатели значительно ниже: mAP50(M) – около 0,025,

mAP50-95(M) – менее 0,007, что отражает сложность задачи сегментации для данной архитектуры.

Для сравнения работы YOLOv8n и YOLOv5m при детекции всходов сахарной свеклы использовали метрики Precision (P), Recall (R), Average Precision (AP) и F1-score 1-3. Precision отражает долю верных детекций, Recall – полноту обнаружения [0, 0]. AP рассчитывался при пороге IoU = 0,5 (AP50) и как среднее по порогам 0,5...0,95 (AP50:95). F1-score позволяет оценить баланс точности и полноты (табл. 3).

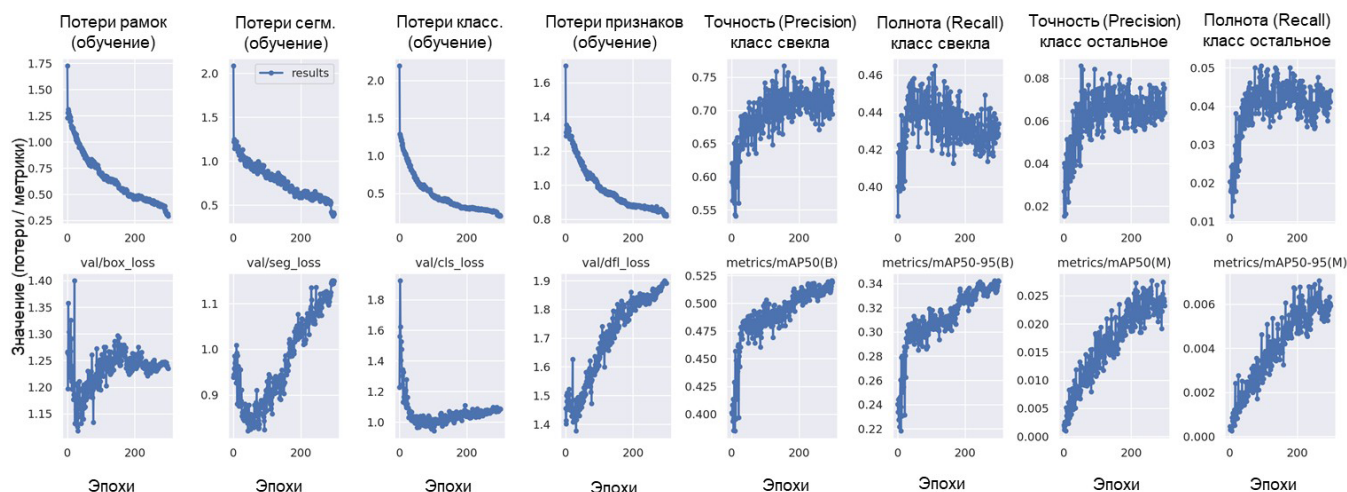


Рис. 5. Динамика обучения модели YOLOv5m при детекции и сегментации всходов сахарной свеклы

Fig. 5. Training dynamics of the YOLOv5m model for detection and segmentation of sugar beet seedlings

Таблица 3

Результаты оценки качества моделей на тестовых данных

Table 3

Results of quality assessment of models on test data

Модель	Precision (P)	Recall (R)	AP50	AP50:95	F1-score
YOLOv8n	0,80	0,70	0,75	0,60	0,75
YOLOv5m	0,72	0,44	0,51	0,33	0,54

YOLOv8n продемонстрировала лучшие результаты по всем показателям, особенно по Recall (0,70 против 0,44) и AP50 (0,75 против 0,51), что указывает на более высокую способность к обобщению.

В ходе исследований фактическое количество всходов сахарной свеклы на тестовых изображениях сравнивалось с количеством обнаруженных всходов с помощью моделей YOLOv8n и YOLOv5m (рис. 6).

Установлено, что обе модели демонстрируют высокую корреляцию с реальным количеством растений, при этом коэффициент детерминации (R^2) составил 0,99 для YOLOv8n и 0,98 для YOLOv5m. Однако модель YOLOv5m показала большую погрешность с репрезентативным наклоном 0,91, в то время как YOLOv8n наиболее точно соответствовала фактическому количеству обнаружений с наклоном 0,97. YOLOv8n обеспечила наилучшие результаты по детекции и подсчету всходов сахарной свеклы, которые были наиболее близки к фактическому количеству растений и лучше отражали реальные полевые условия. Визуализация результатов работы обеих моделей с демонстрацией различий в сегментации, количестве выявленных объектов и корректности выделения растений сахарной свеклы относительно класса остальных представлена на рисунке 7.

Визуальный анализ полученного ортофотомозаика и результатов сегментации показал, что разработанный алгоритм успешно обнаруживает большинство всходов сахарной свеклы.

Установленные различия в точности детекции дополнительно подтверждены количественными расчетами. В таблице 4 для каждой модели приведены количество детектированных растений на опытном участке площадью 25 м² и на 1 га, а также значения контрольного подсчета, относительной ошибки, RMSE и коэффициента детерминации R^2 .

Анализ данных показывает, что YOLOv8n обеспечивает минимальную относительную ошибку (1,11%) и наименьшее значение RMSE (3,0), которые указывают на более высокую стабильность детекции по сравнению с YOLOv5m. При этом обе модели демонстрируют высокий коэффициент детерминации ($R^2 > 0,98$), что подтверждает их надежную

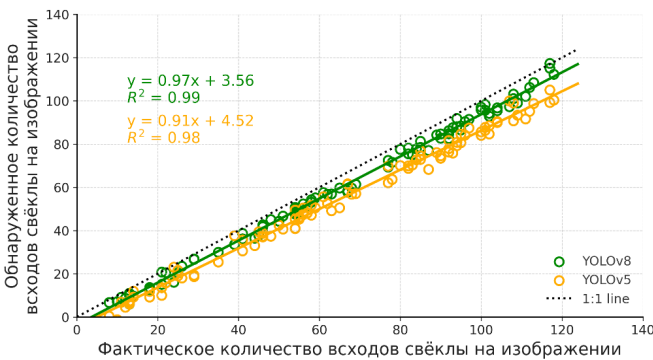


Рис. 6. Сравнение фактического и обнаруженного количества всходов сахарной свеклы на тестовом изображении при использовании различных методов глубокого обучения
Fig. 6. Comparison of the actual and detected number of sugar beet seedlings in a test image when using various deep learning methods

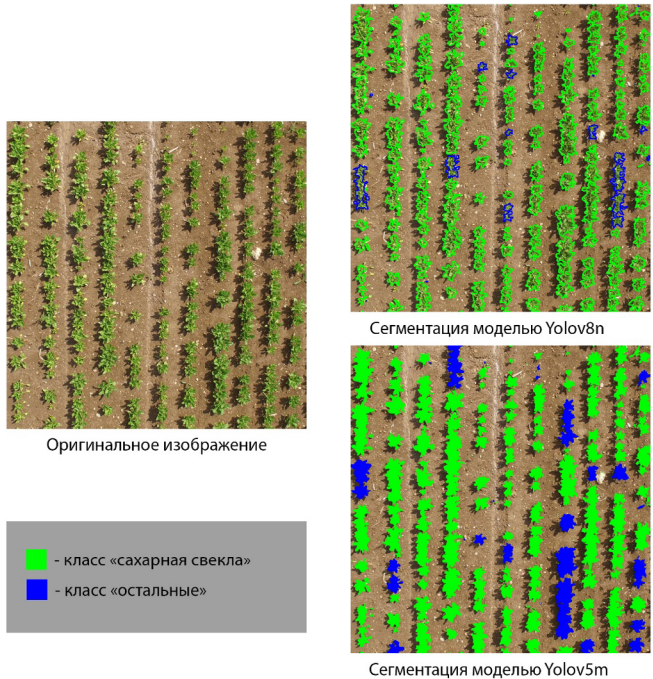


Рис. 7. Результаты сегментации всходов сахарной свеклы и сорной растительности по данным БПЛА с использованием моделей YOLOv8n и YOLOv5m

Fig. 7. Segmentation results of sugar beet seedlings and weeds from UAV data using YOLOv8n and YOLOv5m models

Сравнительные результаты автоматической детекции всходов сахарной свеклы моделями YOLOv8n и YOLOv5m
Таблица 4

Comparative results of automatic detection of sugar beet seedlings by YOLOv8n and YOLOv5m models
Table 4

Модель	Площадь участка, м ²	Детекты, N_{plot} , шт.	Пересчет на 1 га, N_{ha} , шт.	Контроль, N_{gt} , шт.	Относительная ошибка, %	RMSE	R^2
YOLOv8n	25	712	28 480	720	1,11	3,0	0,99
YOLOv5m	25	688	27 520	720	4,44	6,4	0,98

корреляцию с фактическим количеством растений. YOLOv5m, несмотря на несколько большую ошибку (4,44%) и RMSE (6,4), также показала удовлетворительную точность и может использоваться в задачах полевого мониторинга, но для высокой точности подсчета более предпочтительной является модель YOLOv8n.

Результаты проведенных нами исследований находятся на уровне лучших мировых достижений в этой области. Ранее А.А. Barreto и соавт. [4] на посевах сахарной свеклы при различных параметрах съемки получили среднюю ошибку прогноза числа растений 4,6%. При этом они отметили рост погрешности на более поздних этапах роста и при уменьшении интервала между растениями, и эти тенденции полностью согласуются с нашими наблюдениями. В работе S. Oh [11], посвященной учету густоты хлопчатника с помощью дрона, достигнута сопоставимая точность коэффициента детерминации $R^2 \sim 0,97$ и RMSE порядка 0,5 растения на 1 м ряда. Предложенный метод подсчета свеклы демонстрирует эффективность, сопоставимую с методами для других культур, подтверждая универсальность подхода на основе глубокого обучения.

Отметим преимущество автоматизированного подхода, заключающееся не только в высокой точности, но и в оперативности и масштабируемости. На полный облет поля площадью ~20 га и обработку данных в наших исследованиях уходило менее одного рабочего дня, тогда как ручной подсчет с аналогичной детализацией потребовал бы несколько дней работы группы агрономов.

Автоматический метод исключает субъективные ошибки и вариабельность оценок разных наблюдателей. Кроме того, помимо общего числа растений, наш алгоритм предоставляет геокоординаты каждого проростка, что позволяет визуализировать пространственное распределение густоты всходов на карте поля. Это дает ценные сведения для дифференцированного управления посевами: например, можно выделить зоны с изреженными всходами и своевременно провести там подсев или коррекцию ухода. Современные онлайн-платформы (например, Proofminder, Agremo и др.) уже реализуют похожие функции, предоставляя отчеты о посеве на основе снимков дронов.

Следует отметить, что условия проведения съемки и стадии развития растений существенно влияют на качество распознавания. Наш опыт подтверждает рекомендации практиков: оптимальным временем для аэрофотосъемки всходов является фаза, когда растения достаточно подросли для уверенного обнаружения, но еще не сомкнулись листьями.

Для сахарной свеклы это интервал примерно от 2 до 6 настоящих листьев (ВВСН 12-16). Съемка на более ранней стадии (семядоли) может привести к пропуску самых мелких проростков или ошибочной классификации комочков почвы как растения. С другой стороны, в фазе смыкания листового полога отдельные растения уже трудно различимы даже визуально – здесь метод может недооценивать численность по причине слияния смежных особей. В таких случаях возможна модификация подхода: использование нейросетей, генерирующих карту плотности (density map), либо комбинирование RGB-снимков с данными других сенсоров (например, лидаром или мультиспектральной камерой), что помогло бы разделять перекрывающиеся объекты. Еще один фактор – наличие сорной растительности. В нашем эксперименте фон сорняков был слабым (благодаря вовремя проведенной химпрополке), но при обилии сорняков необходимо дополнять обучающую выборку примерами сорных растений, чтобы сеть не смогла перепутать их со свеклой. Использование мультиспектральных снимков (включая ближний ИК-диапазон) могло бы упростить эту задачу, так как индексы типа NDVI легче отделяют культурные всходы от некоторых видов сорняков. Уже существуют успешные примеры применения мультиспектральных камер на дронах для классификации свеклы и сорняков по отражательным характеристикам, и в перспективе интеграция спектральных признаков в нашу модель может повысить ее надежность.

Данные исследования показали принципиальную осуществимость и высокую эффективность автоматического учета всходов сахарной свеклы в условиях Республики Башкортостан. Полученные нами уровни точности (ошибка порядка нескольких процентов) свидетельствуют о том, что технология готова к внедрению в производственных хозяйствах. Автоматический подсчет может использоваться агрономическими службами для подтверждения качества посева и принятия решений о частичном пересевании. Карта распределения всходов может быть основой для дифференцированного ухода: участки с угнетенными всходами можно точно подкормить, а на равномерных густых всходах можно снизить нормы удобрений или гербицидов с целью экономии ресурсов.

В перспективе планируется адаптация разработанного алгоритма для мобильных устройств (например, быстрая обработка данных непосредственно в полевых условиях на ноутбуке или планшете), а также расширение функциональности до одновременного учета сорной растительности. Последнее позволит считать всходы и генерировать карту засоренности посева для прецизионной междурядной обработки

или выборочного опрыскивания гербицидами. Оправданной стала бы проверка метода на других культурах, выращиваемых в регионе (например, подсолнечнике, кукурузе), что может внести вклад в развитие универсальных систем мониторинга посевов на основе БПЛА.

Выводы

Для условий Республики Башкортостан разработана и экспериментально подтверждена методика автоматизированного учета всходов сахарной свеклы на основе аэрофотосъемки с БПЛА и алгоритмов глубокого обучения. Показано, что комбинация пороговой сегментации и сверточной нейронной сети обеспечивает высокую достоверность результатов, сопоставимую с визуальным

контролем. Наилучшие показатели продемонстрировала модель YOLOv8n (Precision = 0,80; Recall = 0,70; AP50 = 0,75; R^2 = 0,99; ошибка = 1,11%; RMSE = 3,0), что статистически значимо превосходит результаты YOLOv5m (Precision = 0,72; Recall = 0,44; R^2 = 0,98; ошибка = 4,44%; RMSE = 6,4; $p < 0,05$).

Внедрение разработанной технологии позволяет снизить трудоемкость подсчета всходов в 30...40 раз по сравнению с ручными методами, исключает субъективные ошибки наблюдателей и обеспечивает агронома объективными данными о пространственном распределении густоты стояния растений. Построенные карты могут быть интегрированы в системы точного земледелия для оптимизации агротехнологических решений, повышения урожайности и ресурсной эффективности производства сахарной свеклы.

Список источников / References

1. Альт В.В., Пестунов И.А., Мельников П.В., Ёлкин О.В. Автоматизированное обнаружение сорняков и оценка качества всходов сельскохозяйственных культур по RGB-изображениям // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2018. Т. 48, № 5. С. 52-60. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2018-5-7>
- Alt V.V., Pestunov I.A., Melnikov P.V., Elkin O.V. Automated detection of weeds and evaluation of crop sprouts quality based on RGB images. *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2018;48(5):52-60. (In Russ.) <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2018-5-7>
2. Бастаубаева Н.Л., Бекбатыров М.Б., Табынбаева Л.К., Буряходжа А.М. Формирование запрограммированного урожая сахарной свеклы путем воздействия основных элементов регулирования // Сахар. 2021. № 10. С. 32-38. EDN: XTUBQI
- Bastaubaeva N.L., Bekbatyrov M.B., Tabynbaeva L.K., Burakhjoja A.M. Formation of a programmed sugar beet harvest by influencing the basic elements of regulation. *Sakhar*. 2021;10:32-38. (In Russ.)
3. Василенко В.В., Василенко С.В. Инверсия семян и ее влияние на качество пунктирного посева // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2019. Т. 12, № 2. С. 102-108. EDN: WMRPRL
- Vasilenko V.V., Vasilenko S.V. Inversion of seeds and its effect on the quality of single-grain sowing. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2019;12(2):102-108. (In Russ.) EDN: WMRPRL
4. Barreto A.A., Lottes P., Yamati F.R.I. et al. Automatic UAV-based counting of seedlings in sugar beet fields and extension to maize and strawberry. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021;191:106493. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106493>
5. Голтыяпин В.Я., Голубев И.Г. Направления и опыт использования беспилотных летательных аппаратов для обследования земель сельскохозяйственного назначения // Актуальные вопросы развития аграрного сектора экономики Байкальского региона: Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной Дню российской науки, Улан-Удэ, 4-10 февраля 2021 г. Улан-Удэ: Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В.Р. Филиппова, 2021. С. 81-85. EDN: OWFSMS
- Goltyapin V.Ya., Golubev I.G. Areas and experience of using unmanned aerial vehicles for surveying agricultural lands. *Aktualnye voprosy razvitiya agrarnogo sektora ekonomiki baykalskogo regiona: Proceedings of the All-Russian (National) scientific and practical conference dedicated to the Day of Russian Science*, Ulan-Ude, February 04-10, 2021. Ulan-Ude: Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov, 2021. Pp. 81-85.
6. Zhang S., Yang Y., Tu L. et al. Comparison of YOLO-based sorghum spike identification detection models and monitoring at the flowering stage. *Plant Methods*. 2025;21(20). <https://doi.org/10.1186/s13007-025-01338-z>
7. Casado-García A., Heras J., Milella A., Marani R. Semi-supervised deep learning and low-cost cameras for the semantic segmentation of natural images in viticulture. *Precision Agriculture*. 2022;23(6):2001-2026. <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09929-9>
8. Мударисов С.Г., Мифтахов И.Р. Методы глубокого обучения и технологии БПЛА для идентификации заболеваний сельскохозяйственных растений // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2024. Т. 18, № 4. С. 24-33. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-4-24-33>
- Mudarisov S.G., Miftakhov I.R. Deep learning methods and UAV technologies for crop disease detection. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024;18(4):24-33. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-4-24-33>
9. Lottes P., Behley J., Milioto A., Stachniss C. Fully convolutional networks with sequential information for robust crop and weed detection in precision farming. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2018;3(4):2870-2877. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1806.03412>
10. Logeshwaran J., Srivastava D., Kumar K.S. et al. Improving crop production using an agro-deep learning framework in precision agriculture. *BMC Bioinformatics*. 2024;25:341. <https://doi.org/10.1186/s12859-024-05970-9>
11. Oh S., Chang A., Ashapure A. et al. Plant counting of cotton from UAS imagery using deep learning-based object detection framework. *Remote Sensing*. 2020;12(18):2981. <https://doi.org/10.3390/rs12182981>
12. Миннихметов И.С., Мурзабулатов Б.С., Шафеева Э.И., Лыкасов О.Н. Развитие сельского хозяйства Буздякского района Республики Башкортостан // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2021. № 1 (57). С. 27-34. EDN: XLXCGQ
- Minniakhmetov I.S., Murzabulatov B.S., Shafeeva E.I., Lykasov O.N. Development of agriculture in the Buzdyaksky

district of the Republic of Bashkortostan. *Vestnik Bashkir State Agrarian University*. 2021;1:27-34. (In Russ.)

13. Бушнев А.С., Орехов Г.И., Котлярова И.А. и др. Эффективность технологических приемов возделывания материнской линии подсолнечника // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2025. Т. 26, № 1. С. 115-128. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.115-128>

Bushnev A.S., Orekhov G.I., Kotlyarova I.A. et al. Efficiency of technological methods of cultivation of sunflower maternal line. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2025;26(1):115-128. (In Russ.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.115-128>

14. Сычёва И.В., Сычёв С.М., Осипов А.А. Оценка распространности болезней на гибридах сахарной свеклы // *Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии*. 2024. № 2 (102). С. 31-36. EDN: VCIEZH

Sycheva I.V., Sychev S.M., Osipov A.A. Evaluation of disease prevalence on sugar beet hybrids. *Vestnik Bryanskoy GSKhA*. 2024;2:31-36. (In Russ.)

15. Han X., Wang H., Yuan T. et al. A rapid segmentation method for weed based on CDM and ExG index. *Crop Protection*. 2023;172:106321. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106321>

16. Vaghefi S.A., Ibrahim M.F., Mohd M.H. et al. Optimized weed image classification via parallel convolutional neural networks integrating an excess green index channel. *International journal of electrical and computer engineering systems*. 2025;16(3):205-216. <https://doi.org/10.32985/ijeces.16.3.2>

17. Ueno T., Nagano Sh., Moriyuki Sh. et al. Optimized excess-green image binarization for accurate estimation of lettuce seedling leaf-area in a plant factory. *Environmental Control in Biology*. 2022;60(3):153-159. <https://doi.org/10.2525/ecb.60.153>

18. Сухобок Ю.А., Тен Е.Е., Пономарчук Ю.В., Шоберг К.А. Автоматический поиск рельсовых стыков

с использованием методов обработки // *Актуальные теоретико-методологические и прикладные проблемы виртуальной реальности и искусственного интеллекта: Материалы Международной научной конференции*. Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2021. С. 56-63. EDN: AEKRDH

Sukhobok Yu.A., Ten Ye.E., Ponomarchuk Yu.V., Shoberg K.A. Railway gap detection based on image processing and deep learning techniques. *Aktualnye teoretiko-metodologicheskie i prikladnye problemy virtualnoy realnosti i iskusstvennogo intellekta: Proceedings of the International Scientific Conference*. 2021. Khabarovsk: Far Eastern State University of Railway Transport. Pp. 56-63

19. Кутырёв А.И. Сверточная нейронная сеть для сегментации цветков яблони на изображениях // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2024. Т. 25, № 5. С. 949-961. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.5.949-961>

Kutyrev A.I. Convolutional neural network for segmentation of apple blossoms in images. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2024;25(5):949-961. (In Russ.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.5.949-961>

20. Ронкин М.В., Акимова Е.Н., Мисиллов В.Е., Решетников К.И. Обзор применения глубоких нейронных сетей и параллельных архитектур в задачах фрагментации горных пород // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Вычислительная математика и информатика»*. 2023. Т. 12, № 4. С. 5-54. <https://doi.org/10.14529/cmse230401>

Ronkin M.V., Akimova E.N., Misilov V.E., Reshetnikov K.I. Review on application of deep neural networks and parallel architectures for rock fragmentation problems. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*. 2023;12(4):5-54. (In Russ.) <https://doi.org/10.14529/cmse230401>

Информация об авторах

¹ Мударисов Салават Гумерович, д-р техн. наук, профессор; salavam@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-9344-2606>; SPIN-код: 6893-9957

² Мифтахов Ильнур Ринатович, канд. техн. наук; info323@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3125-3532>; SPIN-код: 9429-5990

³ Фархутдинов Илдар Мавляирович, д-р техн. наук, доцент; ildar1702@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6443-8584>; SPIN-код: 8646-6670

^{1,2,3} Башкирский государственный аграрный университет, кафедра мехатронных систем и машин аграрного производства; 450001, Российская Федерация, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. 50 лет Октября, 34

Вклад авторов

С.Г. Мударисов – руководство исследованиями, методология; И.Р. Мифтахов – проведение исследований, верификация данных, визуализация, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование; И.М. Фархутдинов – анализ предметной области, проведение исследований

Конфликт интересов

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

Статья поступила 26.09.2025, после рецензирования и доработки 10.10.2025; принята к публикации 13.10.2025

Author Information

Salavat G. Mudarisov¹, DSc (Eng), Professor; salavam@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-9344-2606>; Scopus Author ID: 57200284613

Ilnur R. Miftakhov², CSc (Eng); info323@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3125-3532>

Ildar M. Farkhutdinov³, DSc (Eng), Associate Professor; ildar1702@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6443-8584>; ResearcherID: G-2816-2018

^{1,2,3} Bashkir State Agrarian University, Department of Mechatronic Systems and Machines for Agricultural Production; St. 50 years of October, 34, Ufa, 450001, Republic of Bashkortostan, Russian Federation

Author Contributions

S.G. Mudarisov: research supervision, methodology. I.R. Miftakhov: investigation, data verification, visualization, writing – review and editing of the manuscript. I.M. Farkhutdinov: research background analysis, investigation.

Conflict of interests

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

Received 26.09.2025; Revised 10.10.2025; Accepted 13.10.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.51

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-17-26>**Моделирование воздействия сжатого воздуха на поверхностный слой суглинистой почвы****Я.П. Лобачевский¹, С.И. Старовойтов²**¹ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия² Брянский государственный аграрный университет; с. Кокино, Брянская обл., Россия¹ lobachevsky@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7863-2962>² starovoitov.si@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4429-7929>

Аннотация. Перспективным видом воздействия на почву является рыхление ее сжатым воздухом. Технология рыхления почвы сжатым воздухом предусматривает два режима: воздействие на поверхностный слой ультразвуковых колебаний и без сверхвысокочастотного воздействия. Исследования проведены с целью определения степени интенсивности воздействия струи сжатого воздуха на поверхностный слой почвы. Интенсивность воздействия сжатого воздуха на почву оценивалась такими показателями, как коэффициент рыхления, форма сечения области рыхления, глубина рыхления, максимальная ширина области рыхления, ширина зоны входа воздушной струи в почву. Для оценки интенсивности воздействия сжатого воздуха на почву применен метод конечных элементов, когда почва как объект обработки представлена модулем упругости первого рода, коэффициентом Пуассона, величиной удельной потенциальной энергии разрушения почвенных частиц. Метод конечных элементов реализован в программе Labview в интервале физической спелости почвы 16...23% при сбросе давления ресивера 0,2...0,5 МПа. Экспериментальными исследованиями установлен факт различия сечений внутренней области рыхления в зависимости от режима обработки. С ростом сброса давления ресивера для всех значений абсолютной влажности суглинистой почвы характерно увеличение коэффициента и глубины рыхления, а также максимальной ширины сечения области рыхления. В диапазоне абсолютной влажности почвы 16...23% и давления сброса ресивера 0,2...0,5 МПа максимальная глубина рыхления суглинистой почвы сжатым воздухом составила 5 см. При этом максимальная ширина сечения области рыхления почвы варьировалась с 2 до 5 см, а ширина зоны входа воздушной струи в почву соответствовала 2...3 см. Максимальное значение коэффициента рыхления 17% достигнуто при абсолютной влажности 16% и давлении сброса ресивера 0,5 МПа. Полученные результаты исследований будут способствовать эффективной расстановке газоструйных излучателей без внедрения деформатора.

Ключевые слова: почва; рыхление; влажность почвы; сжатый воздух; коэффициент рыхления; форма сечения области рыхления; глубина рыхления; максимальная ширина области рыхления; ширина зоны входа воздушной струи в почву

Для цитирования: Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И. Моделирование воздействия сжатого воздуха на поверхностный слой суглинистой почвы // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 6. С. 17-26. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-17-26>

ORIGINAL ARTICLE

Modeling the impact of compressed air on the surface layer of loamy soil**Y.P. Lobachevsky¹, S.I. Starovoitov²**¹ Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia² Bryansk State Agrarian University; Bryansk, Russia¹ lobachevsky@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7863-2962>² starovoitov.si@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4429-7929>

Abstract. Soil loosening with compressed air is a promising technique. This technology offers two modes: surface layer treatment with and without ultrasonic vibration. The study aimed to quantify the impact intensity of compressed air jets on the soil surface. To assess intensity, the author used the following indicators: loosening coefficient, loosening area cross-section shape, loosening depth, maximum loosening area width, and the zone width of an air jet entry. The finite element method (FEM) was employed to model soil response to treatment, using parameters such as Young's modulus, Poisson's ratio, and the specific potential energy of soil particle destruction.

This FEM analysis was implemented in LabVIEW software, simulating soil at its physical ripeness (16-23% moisture content) under receiver pressure drops of 0.2-0.5 MPa. Experiments revealed that inner loosening area sections varied based on the treatment mode (with or without ultrasonic vibration). Increasing receiver pressure consistently increased the loosening coefficient, loosening depth, and maximum loosening area width across all moisture content levels of the loamy soil tested. Within the specified moisture and pressure ranges (16-23% moisture, 0.2 to 0.5 MPa), the maximum loosening depth achieved was 5 cm, the maximum loosening width ranged from 2 to 5 cm, and the air jet entry zone width was 2 to 3 cm. A maximum loosening coefficient of 17% was observed at 16% moisture content and 0.5 MPa receiver discharge pressure. These findings will help determine the optimal placement of gas jet emitters in future designs, potentially eliminating the need for a deformer.

Keywords: soil; loosening; soil moisture; compressed air; loosening coefficient; loosening area cross-section shape; loosening depth; maximum loosening area width; and the zone width of an air jet entry

For citation: Lobachevsky Y.P., Starovoitov S.I. Modeling the impact of compressed air on the surface layer of loamy soil. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(6):17-26 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-17-26>

Введение

Обработка почвы при возделывании и уборке сельскохозяйственных культур – наиболее трудоемкая и энергоемкая операция, на выполнение которой тратится около 40% энергетических и 35% трудовых затрат от всего комплекса полевых работ¹.

Снижение энергоемкости при воздействии на почву является актуальной задачей² [1-3]. К перспективным видам воздействия на почву относится ее рыхление сжатым воздухом [4-10]. Так, использование сжатого воздуха для рыхления поверхностного слоя почвы при реализации полосовой обработки позволило осуществить объемное рыхление без внедрения механического деформатора [11].

Для удержания влаги на глубине от 3 до 10 см можно с помощью сжатого воздуха проводить осеннее поверхностное рыхление по стерне и весеннее рыхление верхнего слоя почвы.

В настоящее время совершенствование почвообрабатывающих орудий базируется на классических аналитических методах расчета и проектирования машин, что заметно усложняет и затягивает процесс их внедрения в производство.

Реализация цифровых двойников технологических процессов с использованием современных компьютерных технологий инженерного проектирования и расчета является важной и актуальной задачей. Модели обработки почвы в зависимости от численной реализации подразделяются на модели с использованием метода вычислительной гидродинамики, дискретных и конечных элементов.

Методы вычислительной гидродинамики для задач почвообработки в России первыми начали использовать В.С. Казаков³, А.П. Иофинов⁴, С.Г. Мударисов [12, 13]. С.Г. Мударисовым установлено, что величины давлений и, как следствие, силы и моменты, действующие на рабочие органы почвообрабатывающих машин, зависят от вязкости моделируемой среды. Это обстоятельство предполагает использование метода вычислительной гидродинамики для почв, абсолютная влажность которых находится выше верхнего предела физической спелости.

Метод дискретных элементов имитирует механическое поведение системы, состоящей уже из набора «твердых частиц» произвольной формы при их взаимодействии с деформаторами. С учетом состояния объекта и условий его нагружения применяются различного рода модели контакта для описания нормальных и тангенциальных сил, адгезии и когезии взаимодействующих частиц. Реализация данного метода показала его эффективность только при использовании эквивалентных, искусственно полученных физико-механических характеристик обрабатываемой среды.

Метод конечных элементов (МКЭ) имеет право на существование, а почва как объект обработки представляется сплошной деформируемой квазиоднородной средой⁵. Линейно-упругая мо-

¹ Бурченко П.Н. Механико-технологические основы почвообрабатывающих машин нового поколения: Монография. М.: ВИМ, 2002. 212 с.

² Ториков В.Е., Мельникова О.В. Научные основы агрономии: Учебное пособие. СПб.: Издательство «Лань», 2017. 348 с.

³ Казаков В.С. Гидромеханическое подобие потоков жидкости // Техника в сельском хозяйстве. 1989. № 3. С. 22-25.

⁴ Иофинов А.П., Вахитов Н.У., Лоренц С.В. Возможности гидродинамической гипотезы обработки почвы // Совершенствование конструкций и методов повышения работоспособности сельскохозяйственной техники: Сборник научных трудов / ГОСАГРОПРОМ СССР, Ульяновский сельскохозяйственный институт. Уфа; Ульяновск, 1989. С. 30-34. EDN: VDJKHT.

⁵ Кушнарев А.С. Механико-технологические основы обработки почвы. Киев: Урожай, 1989. 144 с.

дель является наиболее простой для моделирования поведения почвы, находящейся в состоянии физической спелости, однако и она не будет учитывать критические характеристики поведения почвы.

В настоящее время для описания поведения почвы под нагрузкой используются «полуэмпирические методы», сочетающие в себе, в частности, метод конечных элементов и экспериментально полученное значение удельной потенциальной энергии разрушения почвенных частиц [14]. Последний показатель является экспериментальной величиной, характеризующей почву определенного гранулометрического состава и влажности.

Наиболее простейшей и надежной технической системой является почвообрабатывающее орудие, у которого рабочий орган скользит по поверхности почвы и характер воздействия сжатого воздуха является постоянным. Интенсивность воздействия струи будет зависеть от объемного расхода и скорости истечения сжатого воздуха, скорости движения агрегата.

Моделирование воздействия сжатого воздуха на почву с помощью полуэмпирического метода, сочетающего в себе МКЭ и показатель удельной потенциальной энергии разрушения почвенных частиц, позволит качественно оценить интенсивность деформаций поверхностного слоя почвы.

Цель исследований: определение степени интенсивности воздействия струи сжатого воздуха на поверхностный слой почвы.

Материалы и методы

Фрагмент поверхностного слоя суглинистой почвы, на который оказывает воздействие воздушный поток, представлен на рисунке 1.

Фрагмент поверхностного слоя почвы включает в себя равнобедренные прямоугольные треугольники, связанные между собой узловыми точками. Принятая длина катета составляет 0,01 м. Это связано с тем, что исследователи⁶ за оптимальное крошение принимают такое, при котором пласт имеет 50% комков диаметром 1...10 мм и 50% комков диаметром 10...50 мм. Принято допущение: сжатый воздух оказывает воздействие только на шестую узловую точку. Вектор перемещений всех 66 узловых точек обозначается следующим образом:

$$\bar{Z} = [u_1, v_1, \dots, u_{66}, v_{66}]^T, \quad (1)$$

где u_i и v_i – перемещения узловых точек по горизонтали и вертикали, м.

Взаимосвязь всех элементов представлена в виде выражения:

$$A \cdot A^T \cdot B^{-1} \cdot \bar{Z} = \bar{P}, \quad (2)$$

где $A \cdot A^T \cdot B^{-1}$ – глобальная матрица жесткости, Н/м²; \bar{Z} – вектор перемещений узловых точек, м; \bar{P} – вектор нагрузки, действующей на узловые точки, Н.

Усилие, приходящееся на шестую узловую точку, определяется с помощью уравнения:

$$P_i = \sigma \cdot F, \quad (3)$$

где P_i – усилие, приложенное к узловой точке, Н; σ – давление в ресивере, Па; F – площадь сечения струи воздушного потока, м².

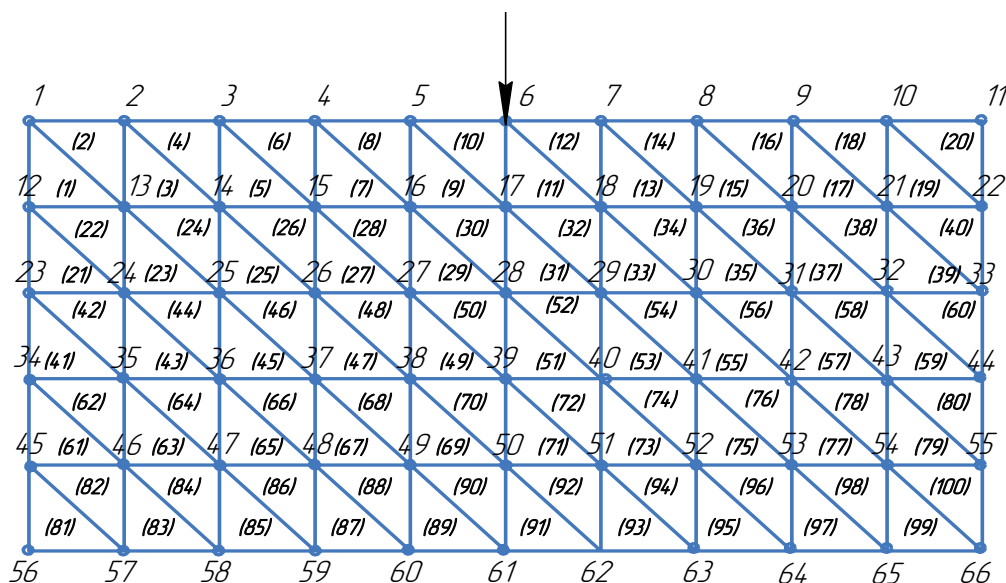


Рис. 1. Фрагмент поверхностного слоя суглинистой почвы, на который оказывает воздействие сжатый воздух

Fig. 1. Fragment of the surface layer of loamy soil affected by the compressed air

⁶ Саакян Д.Н. Система показателей комплексной оценки мобильных агрегатов. М.: Агропромиздат, 1988. 144 с

Для вычисления вектора усилий $\bar{r}_i = [r_{u1}, r_{v1}, r_{u2}, r_{v2}, r_{u3}, r_{v3}]$ каждого элемента воспользуемся уравнением:

$$\bar{r}_i = a \cdot b^{-1} \cdot a^T \cdot \begin{bmatrix} u_{1i} \\ v_{1i} \\ u_{2i} \\ v_{2i} \\ u_{3i} \\ v_{3i} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $a \cdot a^T \cdot b^{-1}$ – местная матрица жесткости, Н/м.

Параметр a представляет собой матрицу, связывающую вектор независимых сил $s = [r_{u2}, r_{u3}, r_{v3}]$ со всеми силами r :

$$a = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 \\ 0 & -\beta & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где β – отношение катетов прямоугольного треугольника.

Для равнобедренного прямоугольного треугольника $\beta = 1$.

Матрица b^{-1} имеет вид:

$$b^{-1} = \frac{E \cdot \delta}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \begin{bmatrix} 6 \cdot \beta & 0 & 6 \cdot \mu \\ 0 & 3 \cdot (1 - \mu) \cdot \beta^{-1} & 0 \\ 6 \cdot \mu & 0 & 6 \cdot \beta^{-1} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где E – модуль упругости почвы первого рода, Н/м²; μ – коэффициент Пуассона почвы; δ – толщина равнобедренного прямоугольного элемента, м ($\delta = 0,01$ м).

Модуль упругости почвы первого рода E и коэффициент Пуассона μ отражают почву определенного гранулометрического состава и абсолютной влажности.

Нормальные и касательные напряжения в почвенных фрагментах определяются через независимые силы следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \sigma_\delta \\ \tau_{xy} \\ \sigma_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{\delta \cdot d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{c \cdot \delta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{c \cdot \delta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{u2} \\ r_{u3} \\ r_{v3} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где d, c – длина катета прямоугольного элемента, м; r_{u2}, r_{u3}, r_{v2} – независимые силы, действующие на равнобедренный прямоугольный элемент, Н.

Минимальные и максимальные напряжения определяются с помощью следующих выражений:

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}; \quad (8)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}. \quad (9)$$

Удельная потенциальная энергия, накопленная элементарными почвенными фрагментами, –

$$\sigma = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} \quad (10)$$

Для моделирования процесса крошения почвы разработана компьютерная программа на языке Labview, включающая в себя три этапа. На первом этапе формируются местная матрица жесткости элементарного фрагмента, глобальная матрица жесткости массива поверхностного слоя почвы, грузовой столбец. На втором этапе происходит решение кластера линейных уравнений. Третий этап направлен на определение накопленной удельной потенциальной энергии элементарными почвенными фрагментами. На рисунке 2 отражен фрагмент данной программы.

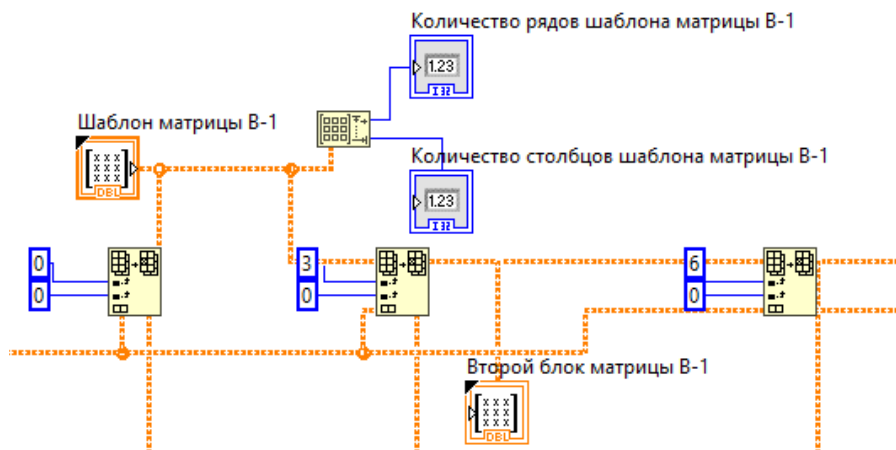


Рис. 2. Фрагмент программы, моделирующей крошение поверхностного слоя почвы

Fig. 2. Fragment of the model that simulates the crumbling of the surface soil layer

Физико-технологические параметры суглинистой почвы^{7,8} приведены в таблице 1 [15, 16]. План проведения численного эксперимента отражен в таблице 2.

Результаты моделирования, в частности, опыта № 26, при абсолютной влажности суглинистой почвы 18% и давлении сброса ресивера 0,3 МПа представлены на рисунке 3. Результат опыта № 26 является частным случаем, случайным образом выбранным, совокупного результата моделирования.

К показателям, оценивающим интенсивность воздействия воздушного потока, относятся коэффициент рыхления, форма сечения области рыхления, глубина, максимальная ширина области рыхления, ширина зоны входа воздушной струи в почву.

Коэффициент рыхления определяется выражением:

$$K_p = \frac{N_u}{N} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где K_p – коэффициент рыхления, %; N_u – количество частиц, у которых величина удельной потенциальной энергии разрушения почвенных частиц

превышает допустимое значение (выделены красным цветом на рисунке 3); N – количество всех частиц ($N = 100$).

Технология рыхления почвы сжатым воздухом предусматривает его воздействие на поверхностный слой как в режиме ультразвуковых колебаний, так и без него [17]. Показатель «Глубина рыхления» при исключении режима ультразвуковых колебаний сжатого воздуха оценивает кинетическую энергию струи воздушного потока и реакцию среды.

В результате предварительных экспериментальных исследований воздействия сжатого воздуха на почву как в режиме ультразвуковых колебаний, так и без него, установлен факт различия сечений области рыхления (рис. 4).

Область, подвергшаяся воздействию струи воздушного потока, приобретает цилиндрическую (колоннообразную) форму с постоянной по глубине обработки шириной сечения.

При подаче сжатого воздуха в почву в режиме ультразвуковых колебаний агрессивность потока проявляется уже в момент входа воздушного потока в поверхностный слой.

Таблица 1

Физико-технологические параметры суглинистой почвы*

Table 1

Values of physical and technological parameters of loamy soil*

Абсолютная влажность почвы, ω , %	Модуль упругости первого рода, E , Па	Коэффициент Пуассона, μ	Величина удельной потенциальной энергии разрушения почвенных частиц, u , Дж/м ³
16	4312795	0,472	7643
17	4249778	0,468	7492
18	4090765	0,46	7439
19	3835756	0,448	7483
20	3484751	0,432	7625
21	3037750	0,412	7864
22	2494753	0,388	8201
23	1855760	0,36	8636

*В пределах одного образца свойства почвы постоянны / *Within a single sample, soil properties are constant.*

⁷ Старовойтов С.И., Чемисов Н.Н. К определению модуля упругости почвы // Вестник МГАУ имени В.П. Горячкина. 2011. № 1. С. 39-41. EDN: RASSXD.

⁸ Старовойтов С.И., Чемисов Н.Н. К определению коэффициента Пуассона среднесуглинистой почвы // Инновационные процессы в АПК: Сборник статей IV Международной научно-практической конференции преподавателей, молодых ученых, аспирантов и студентов (Москва, 11-13 апреля 2012 г.). URL: <https://www.researchgate.net/profile/Ofem-Ujong/publication/287992587> (дата обращения: 26.01.2024)

Таблица 2

План численного эксперимента

Table 2

Design of a numerical experiment

Номер опыта	Абсолютная влажность почвы, ω , %	Давление сброса ресивера, МПа	Номер опыта	Абсолютная влажность почвы, ω , %	Давление сброса ресивера, МПа
1	16	0,2	17	20	0,2
2		0,3	18		0,3
3		0,4	19		0,4
4		0,5	20		0,5
5	17	0,2	21	21	0,2
6		0,3	22		0,3
7		0,4	23		0,4
8		0,5	24		0,5
9	18	0,2	25	22	0,2
10		0,3	26		0,3
11		0,4	27		0,4
12		0,5	28		0,5
13	19	0,2	29	23	0,2
14		0,3	30		0,3
15		0,4	31		0,4
16		0,5	32		0,5

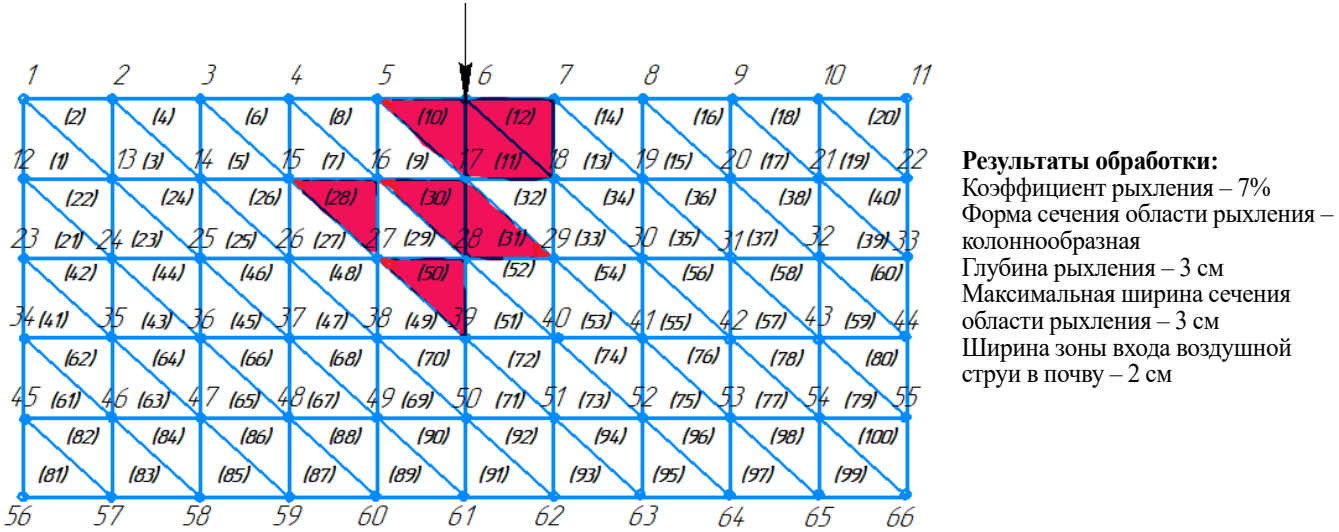


Рис. 3. Напряженное состояние почвенных фрагментов при давлении сброса ресивера 0,3 МПа и абсолютной влажности суглинистой почвы 18%

Fig. 3. Stress state of soil fragments at a receiver discharge pressure of 0.3 MPa and an absolute moisture content of 18% of loamy soil fragments



Рис. 4. Слпки области деформации при воздействии на почву сжатого воздуха в режиме ультразвуковых колебаний (а) и без него (б)

Fig. 4. Casts of the deformation area under the influence of compressed air on the soil in the mode of ultrasonic vibrations (a) and without it (b)

Форма тела разрушения соответствует усеченному конусу, повернутому большим основанием к дневной поверхности [17].

Такие показатели, как ширина зоны входа воздушной струи в почву, максимальная ширина области рыхления, форма сечения области рыхления, влияют на шаг расстановки газоструйных излучателей, обеспечивающих поверхностное рыхление почвы без внедрения деформатора.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследований интенсивности воздействия струи сжатого воздуха на поверхностный слой почвы отражены в таблице 3.

Для всех значений абсолютной влажности суглинистой почвы характерно увеличение коэффициента и глубины рыхления, максимальной ширины сечения области рыхления при увеличении сброса давления ресивера.

Максимальные значения параметров достигаются при сбросе давления ресивера 0,5 МПа. Минимальное значение коэффициента рыхления 3% реализуемо при абсолютной влажности почвы 22% и сбросе давления ресивера 0,2 МПа. Максимальное значение коэффициента рыхления 17% достижимо при абсолютной влажности 16% и сбросе давления ресивера 0,5 МПа. В большей мере это связано с охрупчиванием почвенного пласта при снижении влаги ближе к нижнему пределу физической спелости почвы. Повышение величины абсолютной влажности способствует созданию амортизирующей подушки.

Глубина рыхления суглинистой почвы влажностью 16...23% при сбросе давления ресивера в диапазоне 0,2...0,5 МПа изменяется в интервале 2...5 см. Максимальное значение глубины рыхления 5 см достижимо для всех значений абсолютной влажности при сбросе давления ресивера 0,5 МПа (рис. 5), а также при влажности 17 и 18% и сбросе давления ресивера 0,4 МПа. В исследовании [11] максимальная

глубина рыхления 5 см была достигнута при абсолютной влажности 22% и сбросе давления ресивера 0,35 МПа.

Максимальная ширина сечения области рыхления суглинистой почвы в исследуемых диапазонах влажности и сбросе давления ресивера изменяется в интервале 2...5 см. Максимальное значение ширины сечения области рыхления, равное 5 см, достижимо при абсолютной влажности 17, 18 и 19% и сбросе давления ресивера 0,5 МПа. В то же время в интервале абсолютной влажности 17...18% при сбросе давления ресивера 0,4 МПа можно достичь максимальной глубины рыхления 5 см и максимального значения ширины сечения области рыхления 4 см при максимально возможной величине 5 см.

Ширина зоны входа воздушной струи в почву находится в интервале 2...3 см. Ширина входа воздушной струи в почву, равная 3 см, в большей мере характерна для грушевидной области рыхления. Минимальное значение характерно для величины сброса давления ресивера 0,2 и 0,3 МПа, а максимальное – для 0,4 и 0,5 МПа. Повышение абсолютной влажности обрабатываемой почвы и величины сброса давления ресивера не приводит к увеличению ширины зоны входа воздушной струи в почву – данный показатель является нейтральным. Возможно, данный показатель будет востребован при ультразвуковом воздействии сжатого воздуха на почву.

Грушевидная форма связана с тем, что энергии струи уже недостаточно для рыхления на большей глубине, но достаточно, чтобы смещаться в сторону. На наш взгляд, грушевидная прерывистая форма является избыточной, трудно прогнозируемой, нецелесообразной.

В дальнейших экспериментальных исследованиях планируется изучить влияние величины абсолютной влажности, степени задерненности поверхностного слоя и величины сброса давления ресивера на характер области рыхления.

Таблица 3

Результаты исследований интенсивности воздействия струи сжатого воздуха на поверхностный слой суглинистой почвы

Table 3

Research results on the intensity of compressed air jet impact on the surface layer of loamy soil

Величина абсолютной влажности суглинистой почвы, %	Давление сброса ресивера, МПа	Коэффициент рыхления, %	Глубина рыхления, см	Максимальная ширина сечения области рыхления, см	Ширина зоны входа воздушной струи в почву, см	Форма области рыхления
16	0,2	5	2	2	2	Колоннообразная
	0,3	6	3	2	2	Колоннообразная
	0,4	9	3	4	3	Грушевидная
	0,5	17	5	4	3	Грушевидная
17	0,2	5	2	2	2	Колоннообразная
	0,3	6	3	2	2	Колоннообразная
	0,4	11	5	4	3	Колоннообразная
	0,5	14	5	5	3	Грушевидная
18	0,2	4	2	2	2	Колоннообразная
	0,3	7	3	3	2	Колоннообразная
	0,4	11	5	4	3	Грушевидная
	0,5	13	5	5	3	Грушевидная
19	0,2	5	2	2	2	Колоннообразная
	0,3	7	3	3	2	Колоннообразная
	0,4	10	3	4	3	Грушевидная
	0,5	14	5	5	3	Грушевидная
20	0,2	4	2	2	2	Колоннообразная
	0,3	5	2	2	2	Колоннообразная
	0,4	10	3	4	3	Грушевидная
	0,5	14	5	4	3	Грушевидная
21	0,2	4	2	2	2	Колоннообразная
	0,3	5	2	2	2	Колоннообразная
	0,4	9	3	3	3	Грушевидная
	0,5	13	5	4	3	Грушевидная прерывистая
22	0,2	3	2	2	2	Колоннообразная
	0,3	5	2	2	2	Колоннообразная
	0,4	9	3	4	3	Грушевидная
	0,5	11	5	4	3	Грушевидная прерывистая
23	0,2	4	2	2	2	Колоннообразная
	0,3	5	2	2	2	Колоннообразная
	0,4	8	3	3	3	Грушевидная
	0,5	11	5	4	3	Грушевидная прерывистая



Рис. 5. Показатели качества воздействия воздушного потока на почву абсолютной влажности 16...23% при давлении сброса ресивера 0,5 МПа

Fig. 5. Airflow impact quality indicators on soil at a moisture content of 16-23% and a receiver discharge pressure of 0.5 MPa

Список источников

1. Лобачевский Я.П., Сизов О.А., Ахалая Б.Х. Ресурсосберегающий и экологически эффективный способ сохранения плодородия почвы в ротации севооборота // Научно-инновационная деятельность в агропромышленном комплексе: Сборник научных статей 6-й Международной научно-практической конференции, г. Минск, 11-12 июня 2014 г. Минск: БГАТУ, 2014. С. 174-179. EDN: UCWFPZ
2. Мазитов Н.К., Рахимов Р.С., Лобачевский Я.П. и др. Влажно- и энергосберегающая технология обработки и посева в острозасушливых условиях // Техника и оборудование для села. 2013. № 3. С. 2-6. EDN: PWVYJN
3. Мазитов Н.К., Шогенов Ю.Х., Ценч Ю.С. Сельскохозяйственная техника: решения и перспективы // Вестник ВИАХ. 2018. № 3 (32). С. 94-100. EDN: YLWHAL
4. Разливопредотвращатель нефтепродуктов: Патент РФ на изобретение № 94009414/26 / А.В. Бакулин; опубл. 10.04.1996; Бюл. № 1. Режим доступа: https://patents.s3.yandex.net/RU94009414A1_19960410.pdf (дата обращения: 25.01.2024)
5. Способ обработки, аэрации и удобрения почвы и устройство для его осуществления: Патент RU2608728 С / В.А. Плотников, А.В. Гостев, Л.В. Нитченко; опубл. 23.01.2017; Бюл. № 3. EDN: EISCQT
6. Способ повышения эффективности посевных сельскохозяйственных работ (варианты): Патент RU2536877 С2 / С.В. Бриндюк; опубл. 27.12.2014; Бюл. № 38. EDN: PLXTIF
7. Агротехнический комплекс: Патент RU2087087 С1 / Н.И. Бурангулов, Г.В. Золототрубов, А.И. Плугин; опубл. 20.08.1997; Бюл. № 3. EDN: TGGFIZ
8. Почвообрабатывающий агрегат для обработки почвы пульсирующим сжатым воздухом: Патент RU183739 U1 / А.Ю. Измайлов, Я.П. Лобачевский, Б.Х. Ахалая, Ю.Х. Шогенов; опубл. 02.10.2018; Бюл. № 28. EDN: XCOUEW
9. Власенко А.Н., Власенко Н.Г., Коротких Н.А. Проблемы и перспективы разработки и освоения технологии No-Till

Выводы

1. Интенсивность воздействия сжатого воздуха на почву можно оценить с помощью коэффициента рыхления, формы сечения области рыхления, глубины рыхления, максимальной ширины области рыхления, ширины зоны входа воздушной струи в почву.
2. При абсолютной влажности суглинистой почвы 16...23% и давлении сброса ресивера 0,2...0,5 МПа максимальная глубина рыхления почвы сжатым воздухом составила 5 см.
3. Максимальное значение коэффициента рыхления достигается при абсолютной влажности 16% и давлении сброса ресивера 0,5 МПа.
4. Внутренняя область рыхления поверхностного слоя может принимать разнообразную сложную форму: симметричную или асимметричную грушевидную, или колоннообразную область рыхления.
5. Для суглинистой почвы с абсолютной влажностью 17...18% целесообразно работать в режиме сброса давления ресивера 0,4 МПа.

References

1. Lobachevsky Y.P., Sizov O.A., Akhalaya B.H. Resource-saving and environmentally effective way to preserve soil fertility in rotation of crop rotation. *Nauchno-innovatsionnaya deyatel'nost v agropromyshlennom komplekse: Proceeding of the 6th International scientific and practical conference*: June 11-12, 2014; Minsk. (In Russ.).
2. Mazitov N.K., Rakhimov R.S., Lobachevsky Ya.P. et al. Moisture and energy-saving technology of soil cultivation and sowing in strongly arid conditions. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2013;3:2-6. (In Russ.)
3. Mazitov N.K., Shogenov Yu.H., Tsench Yu.S. Agricultural machinery: solutions and prospects. *Vestnik VIESKh*. 2018;3(32):94-100. (In Russ.)
4. Bakulin A.V. Oil Product Preventer: Patent RUS No.94009414/ 10.04.1996. Bul. No.1. Available from: https://patents.s3.yandex.net/RU94009414A1_19960410.pdf. (In Russ.)
5. Plotnikov V.A., Gostev A.V., Nitchenko L.V. Method of soil treatment, aeration and fertilization and device for its implementation: Patent RUS No.2608728. 23.01.2017. Available from: https://yandex.ru/patents/doc/RU2608728C2_20170123?ysclid=lrsm02zefg570910872. (In Russ.)
6. Brindyuk S.V. Method for increasing efficiency of sowing agricultural works: Patent RUS No.2536877. 27.12.2017. Available from: https://yandex.ru/patents/doc/RU2536877C2_20141227?ysclid=lrnwtont5214460268. (In Russ.)
7. Burangulov N.I., Zolototrubov G.V., Plugin A.I. Agrotechnical complex: Patent RUS No.2087087. 10.03.1997. Available from: <https://www.freepatent.ru/patents/2087087?ysclid=lru02gihg5779606983>. (In Russ.)
8. Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Y.P., Akhalaya B.H., Shogenov Yu.H. Tillage unit for soil tillage with pulsating compressed air: Patent RUS No.183739. 02.10.2018. Available from: https://yandex.ru/patents/doc/RU183739U1_20181002?ysclid=lru0evkc9n794128477. (In Russ.)

на черноземах лесостепи Западной Сибири // Достижения науки и техники АПК. 2013. № 9. С. 16-19. EDN: RCLTOB

10. Способ снижения тягового сопротивления плуга и повышения качества пахоты тяжелых почв: Патент SU209867 A1 / А.Т. Буряков, Н.А. Уфиркин; опубл. 26.01.1968; Бюл. № 5. EDN: ОРУНОВ

11. Старовойтов С.И., Гринь А.М., Ахалая Б.Х. и др. Об интенсивности воздействия сжатого воздуха на поверхностный слой суглинистой почвы // Современные тенденции развития аграрной науки: Сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции, г. Брянск, 2023 г. С. 14-20. EDN: VKHOKT

12. Мударисов С.Г. Моделирование процесса взаимодействия рабочих органов с почвой // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2005. № 7. С. 27-30. EDN: ROJUVN

13. Мударисов С.Г. Моделирование воздействия рабочих органов на почву // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2005. № 5. С. 8-11. EDN: ZCGZFB

14. Дорохов А.С., Ерохин М.Н., Сибирев А.В., Мосяков М.А. Энергия разрушения почвенных комков сепарирующими рабочими органами в зависимости от физико-механических свойств почвы // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 4. С. 4-12. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-4-12>

15. Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И. Теоретические и технологические аспекты работы рыхлительного рабочего органа // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2016. № 5. С. 17-23. EDN: WYCKKL

16. Старовойтов С.И., Старовойтова Н.П., Чемисов Н.Н. О крошении суглинистой почвы // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2014. № 3. С. 30-34. EDN: SIWANX

17. Старовойтов С.И., Старовойтова Н.П. Интенсивность воздействия газоструйного излучателя на поверхностный слой суглинистой почвы: результаты исследований // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 4. С. 13-18. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-13-18>

9. Vlasenko A.N., Vlasenko N.G., Korotkikh N.A. Problems and prospects of development and exploitation of no-till technology on chernozem of forest-steppe of Western Siberia. *Achievements of Science and Technology of the Agro-Industrial Complex*. 2013;9:16-19. (in Russ.)

10. Buryakov A.T., Ufirkin N.A. Method of reducing the traction resistance of a plow and improving the quality of plowing heavy soils: Patent USSR No. 209867. 26.01.1968. Available from: https://yandex.ru/patents/doc/SU209867A1_19680126?ysclid=lrulco58m8369096043. (In Russ.)

11. Starovoitov S.I., Grin A.M., Akhalaya B.H., Starovoitova N.P., Belyaeva N.I. On the intensity of compressed air influence on the surface layer of loamy soil. *Sovremennye tendentsii razvitiya agrarnoy nauki: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference*. Bryansk. 2023;14-20. (In Russ.)

12. Mudarisov S.G. Modeling the process of interaction of working bodies with the soil. *Traktory i selskokhozyaystvennyye mashiny*. 2005;7:27-30. (In Russ.)

13. Mudarisov S.G. Modeling the impact of working bodies on the soil. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva*. 2005;5:8-11. (In Russ.)

14. Dorokhov A.S., Erokhin M.N., Sibirev A.V., Mosyakov M.A. Energy of soil clod crushing with a separating working tool, depending on physical and mechanical properties of the soil. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(4):4-12. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-4-12>

15. Lobachevskiy Ya.P., Starovoytov S.I. Theoretical and technological aspects of ripper working tools operation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2016;5:17-23. (In Russ.)

16. Starovoitov S.I., Starovoitova N.P., Chemisov N.N. On the crumbling of loamy soil. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2014;3:32-36. (In Russ.)

17. Starovoitov S.I., Starovoitova N.P. Intensity of the impact made by a gas-jet emitter on the surface layer of the loamy soil: research results. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(4):13-18. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-13-18>

Информация об авторах

¹ **Яков Петрович Лобачевский**, доктор технических наук, профессор, академик РАН, главный научный сотрудник отдела почвообрабатывающих машин, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5; lobachevsky@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7863-2962>; SPIN-код: 6097-6246

² **Старовойтов Сергей Иванович**, д-р техн. наук, доцент кафедры технических систем в агробизнесе, природообустройстве и дорожном строительстве, Брянский государственный аграрный университет; 243365, Российская Федерация, Брянская обл., Выгоничский р-н, с. Кокино, ул. Советская, 2а; starovoitov.si@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4429-7929>; SPIN:3535-6905

Конфликт интересов

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи. **Статья поступила 25.04.2025, после рецензирования и доработки 04.10.2025; принята к публикации 06.10.2025**

Author Information

Yakov P. Lobachevsky¹, DSc (Eng), Professor, Full Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Research Engineer of the Department of Tillage Machines; Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5, 1st Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, Russian Federation; lobachevsky@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7863-2962>

Sergei I. Starovoitov², DSc (Eng), Associate Professor, the Department of Technical Systems in Agribusiness, Environmental Management and Road Construction; Bryansk State Agrarian University; Russian Federation, Bryansk Region, Vygonichi district, 243365, Kokino, Sovetskaya Str., 2a; starovoitov.si@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4429-7929>

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests and are responsible for plagiarism
Received 25.04.2025; Revised 04.10.2025; Accepted 06.10.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.171

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-27-34>

Повышение эффективности механизированной уборки пшеницы в условиях Ирака с применением полиэтиленовых рукавов

И.А.Х. Хуссейн¹, А.Г. Левшин²✉, И.Н. Гаспарян³^{1,2} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия³ Всероссийский НИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова; г. Москва, Россия¹ Abu.alhumam6@Gmail.com² alevshin@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0001-8010-4448>³ irina150170@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4702-0095>

Аннотация. Производство пшеницы в Ираке составляет 54,6% от общего объема выращиваемой сельскохозяйственной продукции. Производство зерна отличается большими потерями и продолжительными сроками уборки, обусловленными недостаточной обеспеченностью и низкой производительностью комбайнов, слабым уровнем механизации (ниже 31,63%) и продолжительными холостыми переездами комбайнов (61% рабочего времени). Ввиду нехватки зернохранилищ потери зерна достигают 20...30%. Цель исследований – повысить эффективность уборки пшеницы за счет оптимизации состава уборочно-транспортного комплекса и использования полиэтиленовых рукавов для хранения части урожая. Применимость предлагаемой технологии в Ираке рассматривали на примере района Эс-Сувайра. Количество точек размещения временных складов определяли с учетом среднего радиуса перевозок зерна от комбайнов прицепами-перегрузчиками, затрат на охрану, эксплуатационных затрат на дополнительное оборудование для заполнения и разгрузки рукавов вместимостью 200 т. Эффективность каждой схемы уборки оценивали по суммарным эксплуатационным затратам. Эксплуатационные затраты на существующую традиционную технологию, учитывающую работу одного комбайна New Holland TC5040, автомобильную перевозку до элеватора на расстояние 72 км и хранение 49 тыс. т зерна, составили 2136,9 руб/т. В предлагаемой технологии для уборочно-транспортного комплекса, включающего в себя 4 зерноуборочных комбайна New Holland TC5040 и 2 прицепа-перегрузчика БПЗ-16 грузоподъемностью 16 т эксплуатационные затраты составили 618,9 руб/т. По результатам имитационного моделирования минимум эксплуатационных затрат (1015,7 руб/т) получен для 8 точек хранения – 30 рукавов, вмещающих 6,12 тыс. т зерна. Производительность комбайна в составе уборочно-транспортного комплекса составила 7,34 т/ч, что соответствует 71% от потенциальной производительности 10,21 т/ч. Эффективность уборки с применением полиэтиленовых рукавов для хранения зерна в условиях Ирака подтверждена.

Ключевые слова: технология уборки; схемы уборки; потери зерна; эффективность уборки; уборочно-транспортный комплекс; бункер-перегрузчик зерна; хранение зерна в полиэтиленовых рукавах; производительность комбайна

Для цитирования: Хуссейн И.А.Х., Левшин А.Г., Гаспарян И.Н. Повышение эффективности механизированной уборки пшеницы в условиях Ирака с применением полиэтиленовых рукавов // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 6. С. 27-34. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-27-34>

ORIGINAL ARTICLE

Improving the efficiency of mechanized wheat harvesting in Iraq using polyethylene hoses

I.A.H. Hussein¹, A.G. Levshin^{2✉}, I.N. Gasparyan³

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

³ Russian Institute of Agrochemistry named after D. Pryanishnikov; Moscow, Russia

¹ abu.alhumam6@gmail.com

² alevshin@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-8010-4448>

³ irinal50170@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4702-0095>

Abstract. Wheat production is a critical component of Iraqi agriculture, accounting for 54.6% of total agricultural output. However, grain harvesting suffers from significant losses and extended timelines due to a combination of factors: an insufficient number and low productivity of combine harvesters, limited mechanization (31.63%), and excessive idle time for combines (61% of working hours). Further exacerbating the problem is a shortage of adequate grain storage facilities; elevators can only accommodate 70-80% of the harvest. This study proposes a system optimization approach to increase the efficiency of wheat harvesting, combining an improved harvesting and transport system with the use of polyethylene hoses as temporary storage. The applicability of this technology was assessed in the Essaouira area of Iraq. The number of optimal temporary storage facilities was determined based on the average grain transport radius from combines by reloading trailers, security costs, and operating expenses for filling and emptying the hoses. The proposed solution utilizes *Qirgdao* polyethylene hoses with a 200-ton capacity, costing 54,000 rubles per unit. The effectiveness of different harvesting schemes was evaluated based on total operating costs. The operating cost of the existing conventional technology – employing one New Holland TC5040 combine harvester, trucking grain 72 km to an elevator, and storing 49,000 tons – was estimated at 2,136.9 rubles per ton. The proposed harvesting and transport system, incorporating four New Holland TC5040 combine harvesters and two BPZ-16 reloading trailers (16-ton capacity), yielded significantly lower operating costs of 618.9 rubles per ton. Simulation results indicated that the lowest operating cost (1015.7 rubles/ton) was achieved with eight storage locations, utilizing 30 hoses to store 6,120 tons of grain. The improved productivity of the combine within the optimized system was 7.34 tons per hour, representing 71% of its potential productivity (10.21 tons/hour). The study confirmed the economic benefits of integrating polyethylene hose-based grain storage into wheat harvesting operations in Iraq.

Keywords: harvesting technology; harvesting schemes; grain losses; harvesting efficiency; harvesting and transportation system; grain reloading bunker; grain storage in polyethylene hoses; combine productivity

For citation: Hussein I.A.H., Levshin A.G., Gasparyan I.N. Improving the efficiency of mechanized wheat harvesting in Iraq using polyethylene hoses. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(6):27-34 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-27-34>

Введение

Производство зерна имеет важное значение в обеспечении продовольственной безопасности Ирака. Из 43,5 млн га общей площади Ирака 12,5% земель используется для выращивания сельскохозяйственных культур [1, 2]. В 2023 г. на долю пшеницы приходилось 54,6% от общего объема сельскохозяйственного производства [3-5], и произведено 4420 тыс. т, что на 37,8% больше значения предыдущего года. В 2024 г. сбор увеличился на 42,5% и достиг 6300 тыс. т при средней урожайности 2,58 т/га.

Эффективность производства зерна во многом зависит от технической оснащенности. В различных регионах Ирака этот показатель значительно

отличается. Так, в 2023 г. в районе с наибольшей площадью пашни Ниневия достигнут наивысший уровень механизации – 31,63% [6]: на один трактор приходится 52 га пашни, на один комбайн – 601 га [7-9]. Для района Эс-Сувайра этот показатель существенно ниже. Низкий уровень механизации обусловлен недостаточным количеством комбайнов и их низкой производительностью, что в свою очередь приводит к длительным срокам уборки и росту потерь.

Существующая традиционная технология уборки заключается в многократном перемещении комбайна с заполненным бункером к краю поля, разгрузке зерна в автомобиль и возврату к месту уборки (рис. 1). При этом 61% времени работы комбайна

Традиционная технология уборки зерновых в Ираке		
		
Уборка одним комбайном	Выгрузка зерна в зерновоз	Доставка зерна в элеватор на расстояние 72 км
Уборка зерновых с использованием полиэтиленовых рукавов		
		
Уборка группой комбайнов	Выгрузка зерна в бункер-перегрузчик	Загрузка-выгрузка полиэтиленовых рукавов

Рис. 1. Сравнение двух технологий уборки зерна
Fig. 1. Comparison of two grain harvesting technologies

затрачивается на холостые переезды и простои [10]. Автомобилю с зерном также приходится преодолевать значительное расстояние до элеватора. Все это значительно увеличивает затраты на уборку и приводит к большим потерям зерна.

Ввиду отсутствия современных зернохранилищ и неэффективной инфраструктуры в Ираке теряется от 20 до 30% урожая [11, 12]. По причине нехватки элеваторов Ирак вынужден поставлять пшеницу в качестве пожертвования в соседние страны: Сирию, Иорданию, Тунис. В связи с этим целесообразно вместо традиционной технологии применять технологию с использованием полиэтиленовых рукавов (временного склада) (рис. 1) [13, 14].

Опыт применения полиэтиленовых рукавов в Аргентине, Египте и России подтвердил перспективность такой технологии и в условиях Ирака.

У предлагаемой технологии есть много преимуществ. Герметичность трехслойного рукава создает герметичную среду, предотвращающую проникновение повреждающих урожай насекомых, грызунов и грибов. Влагостойкость рукава предотвращает попадание влаги в зерно, снижая риск образования плесени и порчи. Защиту от вредителей и болезней

обеспечивает бескислородная среда, создаваемая за счет дыхания зерна. Поддержание оптимального уровня влажности зерна внутри рукава обеспечивает его сохранность и качество при длительном хранении.

Цель исследований: повысить эффективность уборки пшеницы за счет оптимизации состава уборочно-транспортного комплекса (УТК) и использования для хранения части урожая полиэтиленовых рукавов (временный склад).

Материалы и методы

На одном из полей, принадлежащих Министерству сельского хозяйства Ирака в районе Эс-Сувайра, проведено сравнительное исследование и рассчитаны эксплуатационные расходы для традиционной технологии и предлагаемого варианта. Для повышения производительности зерноуборочных комбайнов (ЗУК) использовали групповую форму работы, в качестве обслуживающего звена рассматривали бункер-перегрузчик зерна.

Эффективность каждой схемы уборки оценивали по суммарным эксплуатационным затратам (C_{Σ} , руб/ч). Для каждого агрегата

уборочно-транспортного комплекса часовые эксплуатационные затраты определяли по формуле:

$$C_{\Sigma \text{Эт}} = \{C_{\text{тсм}} + C_{\text{аморт}} + C_{\text{страховки}} + C_{\text{тор}} + C_{\text{труда}}\}, \quad (1)$$

где $C_{\text{аморт}}$ – затраты на амортизацию, руб/ч; $C_{\text{тор}}$ – затраты на техническое обслуживание и ремонт, руб/ч; $C_{\text{тсм}}$ – затраты на топливо и смазочные масла, руб/ч; $C_{\text{страх}}$ – затраты на страхование (для тракторов и зерноуборочных комбайнов), руб/ч; $C_{\text{труд}}$ – оплата труда, руб/ч.

Расход топлива ($Q_{\text{тсм}}$, кг/ч) агрегатом на уборке зерновых определяли по формуле (2), затраты ($C_{\text{тсм}}$, руб/ч) с учетом комплексной цены на топливо и масла – по формуле (3):

$$Q_{\text{тсм}} = \frac{N_{\text{н}} \cdot \varepsilon_{\text{н}} \cdot g_{\text{е}} \cdot V_{\theta}}{10^3}; \quad (2)$$

$$C_{\text{тсм}} = Q_{\text{тсм}} \cdot \Pi_{\text{тсм}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{н}}$ – номинальная мощность двигателя, кВт; $\varepsilon_{\text{н}}$ – коэффициент загрузки двигателя трактора на сельскохозяйственных работах; $g_{\text{е}}$ – удельный расход топлива двигателя г/кВт · ч; $\Pi_{\text{тсм}}$ – комплексная цена на топливо и смазочные масла, руб/кг; V_{θ} – коэффициент, зависящий от типа агрегата и длины гона, определяется по типовым нормам выработки.

Затраты на амортизацию, техническое обслуживание и ремонт, страховку определяли по формулам (4), (5) и (6):

$$C_{\text{аморт}} = \frac{B}{T_{\text{лет}} \cdot T_{\text{г}}}; \quad (4)$$

$$3_{\text{то}} = \frac{B \cdot H_{\text{то}}}{100 T_{\text{г}}}; \quad (5)$$

$$C_{\text{страховки}} = \frac{B \cdot C_{\text{с}}}{100 T_{\text{г}}}, \quad (6)$$

где B – балансовая цена агрегата, руб.; $T_{\text{г}}$ – годовая загрузка, ч; $T_{\text{лет}}$ – срок службы, лет; $H_{\text{то}}$ – норматив затрат на техническое обслуживание и ремонт, % от балансовой стоимости; $C_{\text{с}}$ – страховая стоимость, % от балансовой стоимости¹.

Часовая ставка работника, руб/ч, устанавливается центральным правительством Ирака.

Эксплуатационные затраты $C_{\text{зук}}$ (руб/т) на 1 т убранных зерна –

$$C_{\text{зук}} = \frac{C_{\Sigma \text{Эт}}}{W_{\text{У}}}, \quad (7)$$

где $W_{\text{У}}$ – производительность, т/ч.

¹ Зангиев А.А., Скороходов А.Н. Практикум по эксплуатации машинно-тракторного парка: Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Издательство «Лань», 2016. 464 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/87575>.

Транспортные расходы ($C_{\text{авт}}$, руб/т) включают в себя затраты на ожидание погрузки на поле (t_1 , ч) и ожидание разгрузки на элеваторе (t_2 , ч), учитывают тариф на простой (g , руб/ч) и транспортные расходы, зависящие от перевезенного груза ($Q_{\text{т}}$, т · км) и тарифа на перевозку (p , руб/т · км). Общие затраты на транспортировку зерна автомобилями определим по формуле (8):

$$C_{\text{авт}} = \{(t_1 + t_2) \cdot g + p \cdot Q_{\text{т}}\} Q_{\text{н}} \cdot \alpha, \quad (8)$$

где $Q_{\text{н}}$ – номинальная грузоподъемность автомобиля, т; α – коэффициент использования грузоподъемности (для зерна $\alpha = 1$).

При традиционной технологии уборки общие затраты ($\Sigma C_{\text{техн}}$, руб/т) включают в себя затраты на уборку одним комбайном $C_{\text{зук}}$, затраты на автомобильные перевозки на расстояние 72 км $C_{\text{авб}}$ и затраты на хранение $C_{\text{хран}}$, устанавливаемые централизованно Министерством экономики для каждого элеватора:

$$\Sigma C_{\text{техн}} = \{C_{\text{зук}} + C_{\text{авб}} + C_{\text{хран}}\}. \quad (9)$$

В предлагаемой технологии используется m зерноуборочных комбайнов типа New Holland 5040 и два ($n = 2$) прицепа-перегрузчика зерна БПЗ-16, каждый из которых вмещает 4 бункера комбайна. Время заполнения бункера t_1 и время обслуживания одной заявки t_2 – случайные величины. С учетом этого оптимальное количество комбайнов m , которое может эффективно обслужить 2 бункера-перегрузчика, определяли с использованием теории массового обслуживания². Интенсивность потока заявок от комбайнов (λ , ч⁻¹) и интенсивность обслуживания (μ , ч⁻¹) определяли по данным хронометражных наблюдений. Вероятность поступления в систему ($P_k(t)$) точно k требований за t время описывается законом Пуассона (12):

$$\lambda = 1/t_{1\text{ср}}; \quad (10)$$

$$\mu = 1/t_{2\text{ср}}; \quad (11)$$

$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}, \quad (12)$$

где $t_{1\text{ср}}$ – среднее время заполнения бункера комбайна, ч; $t_{2\text{ср}}$ – среднее время заполнения бункера-перегрузчика, ч.

Задаваясь количеством заявок k от 1 до m в системе обслуживания, определяем вероятности их появления, среднее количество простаивающих

² Зангиев А.А., Скороходов А.Н. Практикум по эксплуатации машинно-тракторного парка: Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Издательство «Лань», 2016. 464 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/87575>

комбайнов (L_1 , шт.) и среднее количество простаивающих прицепов-перегрузчиков (L_3 , шт.). Коэффициенты простоя комбайнов $K_{пр1}$ и прицепов-перегрузчиков $K_{пр3}$ можно найти по формулам (13, 14):

$$K_{пр1} = \frac{L_1}{m} = \frac{1}{m} \sum_{k=n+1}^m (k-n)P_k; \quad (13)$$

$$K_{пр3} = \frac{L_3}{n} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} (n-k)P_k. \quad (14)$$

Рассматривая разное количество комбайнов в системе, определяем общие эксплуатационные затраты уборочно-транспортного комплекса:

$$C = \frac{mC_m + nC_n}{W_F \cdot m(1 - k_{пр1})}, \quad (15)$$

где C_m , C_n – эксплуатационные затраты за 1 ч работы обслуживаемых (зерноуборочные комбайны) и обслуживающих агрегатов (бункеры-накопители) соответственно; W_F – производительность зерноуборочного комбайна, т/ч.

Определим оптимальное количество комбайнов $m_{опт}$, которое может обслужить два бункера-перегрузчика по минимуму функции $C = f(m, n)$.

Общие затраты на предлагаемую технологию ($\Sigma C_{техн}$, руб/т) включают в себя затраты уборочно-транспортного комплекса $C_{утк}$, на охрану временных складов $C_{охрана}$, на заполнение рукавов $C_{загр}$, выгрузку зерна $C_{разгр}$ и удельную стоимость полиэтиленовых рукавов $C_{рукав}$:

$$\Sigma C_{техн} = \{C_{утк} + C_{охран} + C_{загр} + C_{разгр} + C_{рукав}\}. \quad (16)$$

Удельная стоимость рукавов определяется как отношение цены одного рукава ($\Pi_{рук}$, руб.) и вместимости ($Q_{рук}$, т):

$$C_{рукав} = \Pi_{рук} / Q_{рук}.$$

Для определения оптимального количества пунктов расположения полиэтиленовых рукавов

при хранении зерна в полевых условиях рассматривали разное количество точек хранения (1...10) и рассчитывали общую стоимость по формуле (16). В таблице 1 приведены исходные данные для расчета эксплуатационных затрат.

Результаты и их обсуждение

Рассчитанные по данным таблицы 1 эксплуатационные затраты на традиционную технологию, учитывающую работу одного зерноуборочного комбайна, автомобильную перевозку до дальнего элеватора на расстояние 72 км и хранение 49 тыс. т зерна, составили 2136,9 руб/т.

При оптимизированном составе уборочно-транспортного комплекса, включающем в себя 2 бункера-перегрузчика БПЗ-16 грузоподъемностью 16 т и 4 зерноуборочных комбайна New Holland TC5040, наименьшие эксплуатационные затраты составили 618,9 руб/т (табл. 2).

Вместо хранения зерна в удаленном на 72 км втором элеваторе предлагается использовать полиэтиленовые рукава фирмы *Qirgdao* вместимостью 200 т и стоимостью 54 тыс. руб.

Количество точек размещения временных складов определяли с учетом среднего радиуса перевозок зерна от комбайнов прицепами-перегрузчиками, затрат на охрану, эксплуатационных затрат на дополнительное оборудование для заполнения и разгрузки рукавов (зернозагрузочной машины МЗУ-01К и зерноразгрузочной МЗР компании «*Liliani*»). По данным расчетов, минимум эксплуатационных затрат (1015,7 руб/т) получили при 8 точках хранения (рис. 2). При этом вместимость временного склада составила 6,12 тыс. т, среднее расстояние перевозки зерна – 4,8 км. Для хранения такого количества зерна понадобится 30 рукавов.

Расчетные значения эксплуатационных затрат по двум технологиям сведены в таблицу 3.

Таблица 1

Исходные данные для расчета эксплуатационных затрат на уборке зерновых

Table 1

Initial data for calculating operational costs of grain harvesting

Показатель	Комбайн New Holland TC5040	Бункер-перегрузчик AGRESTO (БПЗ-16)	Машина для загрузки зерна МЗУ-01К	Машина для выгрузки зерна МЗР
Балансовая цена агрегата, Б, тыс. руб.	6100	2910,3	1720	2337
Годовая загрузка, $T_{год}$, ч	420	850	196	220
Срок службы, $T_{лет}$	15	15	12	12

Таблица 2

**Изменение суммарных эксплуатационных затрат уборочно-транспортного комплекса
в зависимости от количества комбайнов**

Table 2

Change in the total operating costs of the harvesting and transport system depending on the number of combine harvesters

Количество комбайнов, m	Количество бункеров-перегрузчиков, n	Коэффициент простоя комбайнов, $K_{пр1}$	Коэффициент простоя прицепов-перегрузчиков, $K_{пр3}$	$C = f(m, n)$, руб/т
2	2	0	0,641	691,0
3	2	0,023	0,474	631,9
4	2	0,062	0,328	618,9
5	2	0,117	0,210	632,4

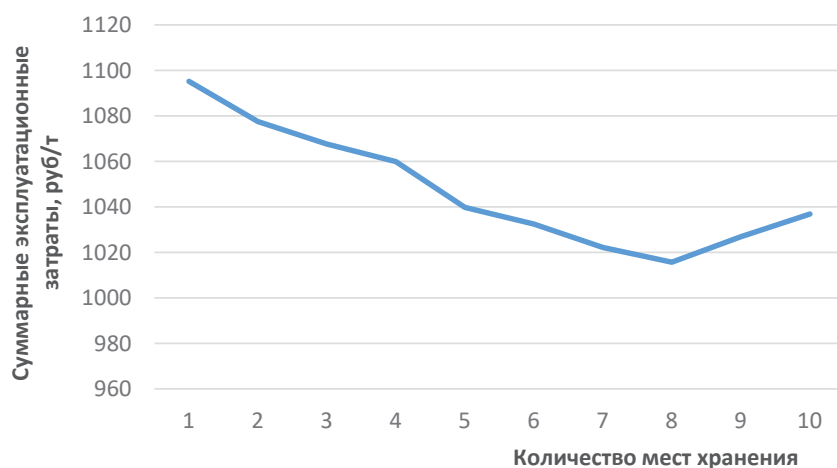


Рис. 2. Зависимость эксплуатационных затрат от количества мест размещения рукавов для хранения зерна

Fig. 2. Relationship between operating costs and the number of locations of grain storage hoses

Таблица 3

Сравнение эксплуатационных затрат по двум технологиям, руб/т [15]

Table 3

Comparison of operating costs for two working schemes, rub /t [15]

Технология	Составляющие затрат для технологий							Общие эксплуатационные затраты
	Уборка одним комбайном	Уборочно-транспортный комплекс	Автоперевозки	Хранение	Охрана*	Стоимость рукавов	Загрузчик, разгрузчик	
Традиционная	887,9	0	553	696	0	0	0	2136,9
Технология с применением рукавов	0	618,9	0	0	117,5	270	9,3	1015,7

*Затраты на охрану варьируются в зависимости от количества пунктов охраны [4].

Выводы

1. Потенциальная производительность зерноуборочного комбайна New Holland TC5040 при определенных условиях составляет 10,21 т/ч. При традиционной уборке с использованием комбайна без бункера производительность достигает 4,01 т/ч, что эквивалентно 39% от расчетной производительности. Производительность комбайна в составе уборочно-транспортного комплекса увеличивается до 7,34 т/ч (71% от потенциальной производительности).

2. В предлагаемой технологии минимум эксплуатационных затрат достигается для 8 точек

размещения полиэтиленовых рукавов (временных складов). При оптимальном составе уборочно-транспортного комплекса (4 зерноуборочных комбайна и 2 бункера-перегрузчика БП-16 грузоподъемностью 16 т) минимальные эксплуатационные затраты составили 618,9 руб/т.

3. Суммарные эксплуатационные затраты для традиционной технологии уборки зерн, составили 2136,9 руб/т, а для предлагаемой технологии эксплуатационные затраты – ниже на 52,4% (1015,7 руб/т).

Список источников / References

- Ahmed A.F., Almo-sabbah I.A. An economic analysis of the role of agricultural foreign trade and exchange rates in the growth of agricultural output in Iraq (1990-2020). *Anbar Journal of Agricultural Sciences*, 2024;22(2):1260. <https://www.researchgate.net/publication/387938295>
- Turky T., Momtaz I., Hassan N., Sabah K. Mechanization status, its technical indicators and impact on the wheat crop production in Iraq. *Agricultural Engineering*. 2023;27(1):75-85. <https://doi.org/10.2478/agriceng-2023-0006>
- Al-Ansari N., Abed S.A., Ewald S.H. Agriculture in Iraq. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*. 2021;11(2):223-241. <https://doi.org/10.47260/jesge/1126>
- Man N., Kadhim Z., Latif I., Wong K. Transactions costs analysis of agricultural machinery hiring decision in Iraq. *Management Science and Engineering*. 2016;10(4):75-86. <https://core.ac.uk/reader/236302543>
- Amer K.Z., Muter S.A. The impact of two types of tillage machines on the tillage dates and numbers of durum wheat, Triticum durum yield (Waha Iraq). *International Journal of Agricultural & Statistical Sciences*. 2023;19(1):231-237. <https://doi.org/10.59467/IJASS.2023.19.231>
- Al Jabouri A.A.N., Al-Akili R.N.K. Industrial agriculture and its role in realizing the dream of self-sufficiency in Iraq (Theoretical conceptual design of food manufacturing infrastructure and innovation in the food industry to boost the Iraqi economy). *Ishtar journal of economics and business studies*. 2022;3(2):39-55. <https://www.researchgate.net/publication/360439493>
- Yakoub Hilal Y. An investigation of the amount of grain loss—using plant density and reel index of two popular brands of combine harvesters. *Agronomy Research*. 2022;20(1). <https://doi.org/10.15159/AR.22.011>
- Madgul N.S., Al-Najjar E.Y., Baker Y.T., Irhaim F.I. Using the Arima models to predict wheat crop production in Iraq. *International Journal of Agricultural and Statistical Sciences*. 2020;16(1):121-127. https://eurekamag.com/research/071/044/071044512.php?srsltid=AfmBOoot-rl_0QVQYiR_7CPQYpJHq6prCWP8pe4jopejdN_S_9likrsrQ
- Муса А.А.Х., Хуссейн И.А., Левшин А.Г. О состоянии производства пшеницы в условиях мелкоконтурного земледелия Республики Ирак // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2024. № 1. С. 116-119. EDN: GUHRPE
- Musa A.A.Kh.N., Hussein I.A., Levshin A.G. On the state of wheat production in the conditions of small-scale agriculture in the Republic of Iraq. *Technologies of the Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex – Healthy Food Products*. 2024;1:116-119.
- Alsudani A.A. Postharvest management practices of wheat in Iraq: A review. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2025;1487(1):012015. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1487/1/012015>
- Хуссейн И.А.Х., Алшабеби А.Н.М., Аль-Гайлани А.А.У. Изучение производительности молотильной машины в процессе уборки урожая и возможности снижения потерь // Journal of agriculture and environment. 2023. № 1 (29). <https://doi.org/10.23649/jae.2023.1.39.001>
- Hussein I.A.H., Alshabebi al –Kh.N.M., Al-Gaylani A.A.A. A study of the productivity of a threshing machine during harvesting and the possibility of reducing losses. *Journal of agriculture and environment*. 2023;1(29). <https://doi.org/10.23649/jae.2023.1.39.001>
- Mahdi R.S., Omran F.K. Determination of heavy metals concentration of local and imported wheat grains storage and wheat flour in some silos of Baghdad City. *Iraqi Journal of Agricultural Sciences*. 2021;52(5):1139-1149. <https://doi.org/10.36103/ijas.v52i5.1452>
- Ziegler V., Paraginski R.T., Ferreira C.D. Grain storage systems and effects of moisture, temperature and time on grain quality – A review. *Journal of Stored Products Research*. 2021;91:101770. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2021.101770>
- Павлов С.Б., Новиков М.А., Смелик В.А. Проект технологии хранения зерна в полиэтиленовых рукавах в условиях Новгородской области // Инновационное развитие агропромышленного, химического, лесного комплексов и рациональное природопользование: Сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции, г. Великий Новгород, 20 апреля 2023 г. Великий Новгород: Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, 2023. С. 103-108. EDN: PIVALP
- Pavlov S.B., Novikov M.A., Smelik V.A. The project of grain storage technology in polyethylene sleeves in the conditions of the Novgorod region. *Innovatsionnoye razvitiye agropromyshlennogo, khimicheskogo, lesnogo kompleksov i ratsionalnoe prirodo polzovanie* [Innovative development of the agro-industrial, chemical, and forestry complexes and rational use of natural resources]: *Proceedings of the II All-Russian scientific and practical conference*, Veliky Novgorod, April 20, 2023. Veliky Novgorod: Yaroslav the Wise Novgorod State University, 2023. Pp. 103-108.

Информация об авторах

- ¹ Хуссейн Ибрагим Адил Хуссейн, аспирант кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка; abu.alhumam6@gmail.com
- ² Левшин Александр Григорьевич, д-р техн. наук, профессор кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка; alevshin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8010-4448>; SPIN-код: 1428-5710
- ³ Гаспарян Ирина Николаевна, д-р с.-х. наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории географической сети опытов и цифровых агротехнологий; irina.150170@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4702-0095>; SPIN-код: 3354-1594
- ^{1,2} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49
- ³ Всероссийский НИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Прянишникова, 31а

Вклад авторов

Хуссейн И.А.Х. – концептуализация, проведение исследований, создание черновика рукописи, визуализация;
Левшин А.Г. – методология, руководство исследованиями, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
Гаспарян И.Н. – администрирование проекта.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 24.07.2025, после рецензирования и доработки 15.10.2025; принята к публикации 16.10.2025

Author information

- Ibrahim A.H. Hussein¹, postgraduate student, the Department of Operation of the Machine and Tractor Fleet; abu.alhumam6@gmail.com
- Aleksandr G. Levshin², DSc (Eng), Professor, the Department of Operation of the Machine and Tractor Fleet; alevshin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8010-4448>; Scopus Author ID: 57209271454; ResearcherID: AAC-5222-2021
- Irina N. Gasparyan³, DSc (Ag), Associate Professor, Chief Researcher, the Laboratory of Geographic Network Experiments and Digital Agricultural Technologies; <https://orcid.org/0000-0003-4702-0095>; Scopus Author ID: 57209269061
- ^{1,2} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation
- ³ Russian Institute of Agrochemistry named after D. Pryanishnikov; 31a Pryanishnikova Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Author Contributions

Hussein I.A.Kh. – conceptualization, investigation, writing – original draft, visualization;
Levshin A.G. – methodology, research supervision, writing – review and editing of the manuscript;
Gasparyan I.N. – project administration.

Conflict of interests

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

Received 24.07.2025; Revised 15.10.2025; Accepted 16.10.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.22

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-35-44>

Методика вибрационной диагностики гидравлической системы технологических машин при выполнении сельскохозяйственных работ на примере шестеренного насоса НШ-32А

О.А. Ступин¹✉, А.В. Шитикова², А.С. Апатенко³^{1,2,3} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ stupin@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-1466-572X>² plant@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5943-0430>³ a.apatenko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>

Аннотация. Традиционная система технического обслуживания и ремонта гидравлических систем технологических машин не позволяет прогнозировать внезапные отказы. Для перехода к обслуживанию по фактическому состоянию необходимо разработать методику, позволяющую в режиме реального времени выявлять дефекты деталей и сборочных единиц. Оценка состояния элементов гидросистем можно эффективно выполнять на основе вибрационного анализа. Исследования проведены с целью разработки и апробации методики вибрационной диагностики гидравлических систем технологических машин на основе спектрального анализа плотности мощности вибросигнала. Предложенная методика включает в себя этапы: получение исходных данных с датчика контролируемых механизмов; предварительная обработка данных и выделение признаков для снижения размерности необработанных данных и получения полезной информации из сигнала; СПМ-анализ и расчет пик-фактора и эксцесса; диагностическая классификация неисправностей, выявление дефектов; визуализация данных в режиме реального времени. Для автоматизированной обработки вибросигналов разработан программный комплекс. Проведенный анализ по показателю спектральной плотности мощности вибросигнала показал эффективность идентификации дефектов при различных режимах работы. Апробацию методики проводили на шестеренном гидронасосе НШ-32А при трех рабочих режимах: 1000, 1500 и 2000 об/мин. При этом выделяли информативные признаки в вибросигнале для диагностирования четырех состояний насоса (исправное, износ подшипника, износ шестерни, комбинированный дефект) с точностью 90...93%. Применение методики контроля технического состояния гидравлических систем технологических машин позволило диагностировать появление внезапных отказов с высокой точностью. В дальнейших исследованиях планируется установить зависимость изменения виброускорения на величину объемного КПД шестеренного насоса.

Ключевые слова: вибродиагностика; гидронасос; диагностика неисправностей; спектральный анализ; дефекты; неисправности; КПД шестеренного насоса; методика вибрационной диагностики

Для цитирования: Ступин О.А., Шитикова А.В., Апатенко А.С. Методика вибрационной диагностики гидравлической системы технологических машин на примере шестеренного насоса НШ-32А // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 6. С. 35-44. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-35-44>

ORIGINAL ARTICLE

Vibration diagnostics method applied to the hydraulic equipment of technological machines: a case of a gear pump NSh-32A

O.A. Stupin¹, A.V. Shitikova², A.S. Apatenko³^{1,2,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ stupin@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-1466-572X>² plant@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5943-0430>³ a.apatenko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>

Abstract. The conventional system of maintenance and repair of hydraulic systems in technological (or industrial) machines cannot predict sudden failures. Transition to condition-based maintenance requires developing a methodology for real-time detection of defects in parts and assemblies. The condition of hydraulic system components can be more effectively assessed with the vibration analysis. The research aimed to develop and test a methodology for vibration diagnostics of hydraulic systems in technological machines based on the spectral

analysis of the spectral power density of a vibration signal. The proposed methodology includes the following stages: obtaining raw data from sensors of the monitored mechanisms; preliminary data processing and feature selection to reduce the dimensionality of the raw data and obtain useful information from the signal; SPM-analysis and calculation of the peak factor and kurtosis; diagnostic classification of faults, defect identification; and real-time data visualization. The authors have developed a software package for automated processing of vibration signals. The analysis based on measuring the spectral density of vibration signal power demonstrated the effectiveness of defect identification under various operating modes. The methodology was tested on an NSh-32A gear-type hydraulic pump at three operating modes: 1000, 1500, and 2000 rpm. Informative features were detected from the vibration signal for diagnosing four pump conditions (serviceable, worn bearing, worn gear, and combined defects) with an accuracy of 90 to 93%. The developed methodology for controlling the hydraulic systems of technological machines can diagnose sudden failures with high accuracy. Future research plans to establish the relationship between the change in vibration acceleration and the volumetric efficiency of the gear pump.

Keywords: vibration diagnostics; hydraulic pump; fault diagnosis; spectral analysis; defects; malfunctions; gear pump efficiency; vibration diagnostic technique

For citation: Stupin O.A., Shitikova A.V., Apatenko A.S. Vibration diagnostics method applied to the hydraulic equipment of technological machines: a case of a gear pump NSh-32A. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(6):35-44 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-35-44>

Введение

В соответствии с положениями «Стратегии развития сельского хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года» (утвержденной распоряжением Правительства РФ от 8 сентября 2022 г. № 2567-р (с изменениями на 7 февраля 2025 года)) и задачами, определенными в рамках реализации Государственной программы развития сельского хозяйства, ключевым направлением является обеспечение технологической независимости и конкурентоспособности агропромышленного комплекса России. Достижение этих стратегических целей напрямую связано с поддержанием высокого уровня технической готовности и надежности машинно-тракторного парка. Гидравлические системы являются основным силовым элементом большинства современных технологических машин, включая широкий парк сельскохозяйственной техники. Эти системы обеспечивают выполнение критически важных операций – от подъема навесного оборудования и поворота рулевых механизмов до привода рабочих органов посевных и уборочных агрегатов. Надежность гидравлики обеспечивает бесперебойность технологических циклов в растениеводстве, где простои техники в периоды посевной или уборочной кампании ведут к критическим нарушениям сроков выполнения агротехнических задач и как следствие, значительным экономическим потерям. При этом традиционная система планово-предупредительного обслуживания демонстрирует низкую эффективность, не позволяя прогнозировать внезапные отказы. В этих условиях развитие методов анализа данных и средств диагностики, в том числе вибродиагностики, создает возможность для перехода к интеллектуальному

мониторингу технического состояния в режиме реального времени. Вместе с тем, существующие методы вибродиагностики не обеспечивают необходимой точности при работе в нестационарных режимах, что особенно актуально для мобильной сельскохозяйственной техники, работающей в условиях ограничения сроков выполнения сельскохозяйственных работ.

При эксплуатации в нестационарных режимах, в условиях высокой запыленности и вибрационных нагрузках ресурс гидравлических насосов существенно снижается.

Гидравлическая система применяется практически в каждой технологической машине. Гидравлические системы обладают высокой энергонасыщенностью, способны к плавному регулированию скорости и усилий в широком диапазоне, устойчивы к ударным нагрузкам. Надежная и эффективная работа гидросистемы обеспечивает непрерывность технологического процесса.

Диагностирование элементов гидравлической системы в режиме реального времени позволяет контролировать ее техническое состояние, выявлять дефекты и неисправности для дальнейшего технического обслуживания и ремонта.

Вибрационный метод – один из актуальных методов диагностики гидросистем [1-3], позволяющий по параметрам вибраций определять техническое состояние элементов гидросистем технологических машин. Метод позволяет оперативно и дистанционно проводить диагностику в режиме реального времени, однако очень сложно обрабатывать вибросигналы и выявлять полезную диагностическую информацию.

Можно ожидать, что применение методики контроля технического состояния гидравлических

систем технологических машин по параметрам вибрации с использованием разработанной программы ЭВМ обеспечит высокую точность диагностики.

Цель исследований: разработка методики адаптивной системы вибрационного диагностирования гидросистем технологических машин при выполнении сельскохозяйственных работ.

Материалы и методы

Рассмотрели основные технологии и методы мониторинга и теоретико-методологические предпосылки проблем мониторинга и диагностирования технических систем. Исследовали информационные свойства и диагностические признаки вибрационных сигналов, генерируемых шестеренным гидравлическим насосом. Классифицировали методы диагностики неисправностей по трем категориям: методы, основанные на режиме, знаниях и сигналах. Признаки неисправностей предложили структурировать по трем областям: временной, частотной и частотно-временной.

Применили аналитический инструментальный мониторинга обработки данных технического состояния оборудования по параметрам вибраций. Разработали программную платформу для автоматизированного анализа вибрационных сигналов с использованием СПМ-анализа.

Апробацию методики проводили на шестеренном гидронасосе НШ-32А при трех рабочих режимах: 1000, 1500 и 2000 об/мин. В качестве гидравлической жидкости использовали масло И-20А. Датчиком служил пьезоэлектрический акселерометр (модель Metrix SA6200А), установленный на корпусе насоса (рис. 1). Характеристики датчика представлены в таблице 1.

Акселерометр подключен к блоку формирования сигнала (анализатору X-Viber FFT), где сигнал проходит через усилитель заряда и аналого-цифровой преобразователь. Сигнал вибрации в цифровом виде подается на компьютер через порт USB. Программное обеспечение SpectraPro-4, прилагаемое к блоку формирования сигналов, используется для записи сигналов непосредственно во вторичную память компьютера. Затем сигнал считывается из памяти и обрабатывается для извлечения БПФ спектра вибрации. Максимальная частота сигнала составляла 1 кГц.

Вибрационные сигналы обрабатывали с использованием классического БПФ-метода (быстрое преобразование Фурье) и спектральной плотности мощности СПМ(f), рассчитываемой по формуле:

$$\text{СПМ}(f) = \frac{2|X(f)|^2}{(t_2 - t_1)},$$

где $|X(f)|$ – амплитудный спектр сигнала; $(t_2 - t_1)$ – длительность сигнала.

Таблица 1

Характеристики акселерометра
для измерения виброускорения

Table 1

Characteristics of an accelerometer used
for measuring vibration acceleration

Параметр, размерность	Значение
Диапазон измеряемых частот, Гц	0,5...10000
Температурный диапазон, °C	–54...+121
Резонансная частота, кГц	13
Материал корпуса	Нержавеющая сталь
Материал чувствительного элемента	Кварц
Масса, г	91



Рис. 1. Расположение датчика на корпусе насоса

Fig. 1. Sensor placement on the pump casing

При сравнении методов выявлены существенные погрешности БПФ-метода при нестационарных режимах, тогда как СПМ-анализ обеспечивал стабильное выделение дефект-специфических признаков.

При анализе БПФ-методом спектры идентичных дефектов демонстрировали значительную вариабельность, затрудняя однозначную диагностику. В отличие от него СПМ-анализ показал устойчивые закономерности: при развитии дефектов наблюдалось систематическое увеличение пиковых значений на 40...60% и смещение энергетического максимума в диапазон 70...120 Гц.

Результаты и их обсуждение

Усложнение функциональности современных сельскохозяйственных машин сопровождается повышенными требованиями к их надежности и эффективности эксплуатации. В этих условиях традиционные методы планово-предупредительного

обслуживания оказываются неэффективными. Развитие методов анализа данных и средств диагностики создает возможность для перехода к интеллектуальному мониторингу технического состояния в режиме реального времени [4]. Общая эволюция концепций систем мониторинга, отражающая этот технологический переход, представлена на рисунке 2.

Каждая новая концепция систем мониторинга содержит основные элементы предыдущих. Научной базой первого поколения систем мониторинга являются физические процессы, последующие поколения интегрируют разработки из области информатики, сенсорики и теории управления.

Концепция системы обслуживания по состоянию ориентирована на данные режимов работы оборудования для определения состояния машин и механизмов и текущего состояния оборудования (неисправность/отказ), планирования ремонтно-технических воздействий и предварительного технического обслуживания (ТО).

В общем случае систему обслуживания по состоянию можно рассматривать для уменьшения неопределенности работ по ТО [5]. Система непрерывного мониторинга позволяет выявлять и решать проблемы заранее, до возникновения неисправностей.

Система обслуживания по состоянию шестеренных насосов ориентирована на диагностику конкретных компонентов – таких, как подшипники и/или

шестерни, путем анализа изменений их вибрации. Система мониторинга целостности конструкции оценивает объект как единое целое с учетом влияния внешней среды. Отличие объектов оценки определяет различие датчиков: в системе обслуживания применяются внешние датчики, а в системе мониторинга – интегрированные. Несмотря на различия вибродиагностика остается общим эффективным методом для обеих систем.

В сложных технических системах у сопрягаемых деталей со временем меняется геометрия поверхности взаимодействия, что в свою очередь вызывает повышение вибраций. Величина вибраций нормируется и ограничивается в соответствии с функциональной эффективностью, ресурсом и сроком службы агрегата.

В вибродиагностике о состоянии оборудования сообщает виброакустический сигнал, содержащий информацию о колебательных процессах и акустическом шуме^{1,2}. Вибрационный сигнал имеет сложную форму, и проводить его анализ на работающей машине весьма сложно. Однако если из широкополосного вибрационного сигнала с помощью полосового частотного фильтра выделить информативный диапазон частот, то форма сигнала позволит получить информацию и зафиксировать дефектное состояние контролируемого сопряжения³ (рис. 3).

При разработке методик контроля и диагностирования наиболее сложными являются поиск



Рис. 2. Эволюция концепций систем мониторинга

Fig. 2. Evolution of monitoring system concepts

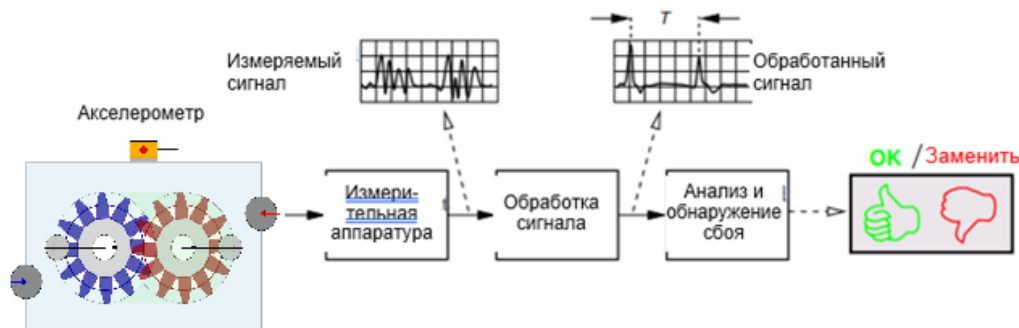


Рис. 3. Схема процесса вибродиагностики

Fig. 3. Vibration diagnostics process diagram

¹ Балицкий Ф.Я. Современные методы вибрационной диагностики машин и конструкций. М.: МЦНТИ, 2015. 115 с.

² Ширман А., Соловьев А. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. М.: Спектр-инжиниринг, 1996. 252 с.

³ Там же.

и выделение из вибрационного сигнала информативных диагностических признаков дефектов, по которым в дальнейшем выстраиваются эталоны нормального и неисправного состояний для принятия решения о принадлежности текущего технического состояния объекта диагностирования тому или иному классу состояний.

Сложность выделения вибрационного сигнала обусловлена зависимостью параметров вибрации от большого количества факторов, оказывающих влияние на возникновение неисправности, а также факторных признаков идентификации их видов [6].

В соответствии с ГОСТ^{4,5,6} обработка данных включает в себя сбор исходных данных, фильтрацию «белого-серого» шума и других сигналов, не представляющих интерес для последующего анализа, и представление сигналов в форме, требуемой для проведения диагностики.

Большинство классических методов анализа вибраций обеспечивает точные результаты только для стационарных сигналов [7]. В этой связи для анализа нестационарных сигналов и обработки большого количества переменных применяются современные технологии: распределение Вигнера-Вилле (РВВ), метод эмпирической модовой декомпозиции (ЭМД) и вейвлет-преобразования (ВП). Unal и соавт [8] предложили несколько методов выделения признаков с помощью анализа огибающей, поддерживаемого преобразованием Гильберта и быстрым преобразованием Фурье.

Исходные характеристики неисправности, полученные современными методами обработки сигналов, содержат определенную избыточность (представлены в нелинейной, неоднородной и рассредоточенной форме). При использовании таких сигналов скорость обнаружения неисправностей может быть низкой. Следовательно, на этапе первичной обработки данных необходимо произвести отбор наиболее отличительных признаков неисправности с помощью методов интеллектуального анализа.

Методы выделения признаков можно структурировать по трем областям: временной, частотной и частотно-временной. Например, методы выделения признаков во временной области включают в себя статистический анализ, который учитывает среднее и стандартное отклонение, среднеквадратическое

значение (Root Mean Square, RMS), асимметрию, эксцесс, максимум, минимум и пик-фактор. В общем случае для диагностики неисправности нет необходимости использовать все признаки.

Эффективность методики диагностики в значительной степени зависит от качества используемых признаков. В случае переменных условий работы признаки в явной или неявной формах должны содержать всю информацию об этих вариациях.

Пример процедуры извлечения признаков представлен на блок-схеме (рис. 4).

Методика оценки состояния элементов гидросистем технологических машин на основе вибрационного анализа включает в себя:

- получение исходных данных с датчика контролируемых механизмов;
- предварительную обработку данных и выделение признаков для снижения размерности необработанных данных и получения полезной информации из сигнала;
- СПМ-анализ и расчет пик-фактора и эксцесса;
- диагностическую классификацию неисправностей, выявление дефектов;
- визуализацию данных в режиме реального времени.

Для диагностики шестеренных насосов с использованием СПМ-анализа разработана программная платформа, представляющая собой инструментарий, формализующий вычислительные алгоритмы для автоматизированного анализа вибрационных сигналов. Основной целью разработки стала экспериментальная верификация эффективности предложенного метода в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным.

Архитектура программного комплекса построена по модульному принципу, где каждый компонент соответствует этапам диагностического процесса.

Ядро системы реализовано на языке Python с использованием научных библиотек SciPy и NumPy (которые входят в стандартный набор дополнений в платформе программирования PyCharm на языке программирования Python), обеспечивающих эффективные математические вычисления. Вычисления включают в себя три последовательных этапа: предварительную обработку сигнала, спектрально-статистический анализ и диагностическую классификацию. На этапе обработки сигнала

⁴ГОСТ Р ИСО 13374-1-2011. Контроль состояния и диагностика машин. Обработка, передача и представление данных. Часть 1. Общее руководство. М.: Стандартинформ, 2018. 20 с.

⁵ГОСТ Р ИСО 13374-2-2011. Контроль состояния и диагностика машин. Обработка, передача и представление данных. Часть 2. Обработка данных. М.: Стандартинформ, 2018. 42 с.

⁶ГОСТ Р ИСО 13373-2-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации. М.: Стандартинформ, 2018. 36 с.

применяются цифровая фильтрация Баттерворта 4-го порядка для устранения низкочастотных помех (ниже 5 Гц), вызванных вибрацией корпуса, и нормализация амплитуд по методу Z-score для компенсации вариативности датчиков. Алгоритм автоматически определяет частоту дискретизации по временным меткам данных, что исключает ошибки ручного ввода параметров и обеспечивает воспроизводимость результатов.

Спектральный анализ реализовали через метод Уэлча с использованием окна Хэннинга длиной 1024 отсчета, что обеспечило оптимальное соотношение между частотным разрешением и вычислительной эффективностью. Программа автоматически идентифицирует и маркирует гармоники вращательного движения, отмечая первые 5 гармоник вертикальными линиями красного цвета с соответствующими подписями частот (рис. 5).

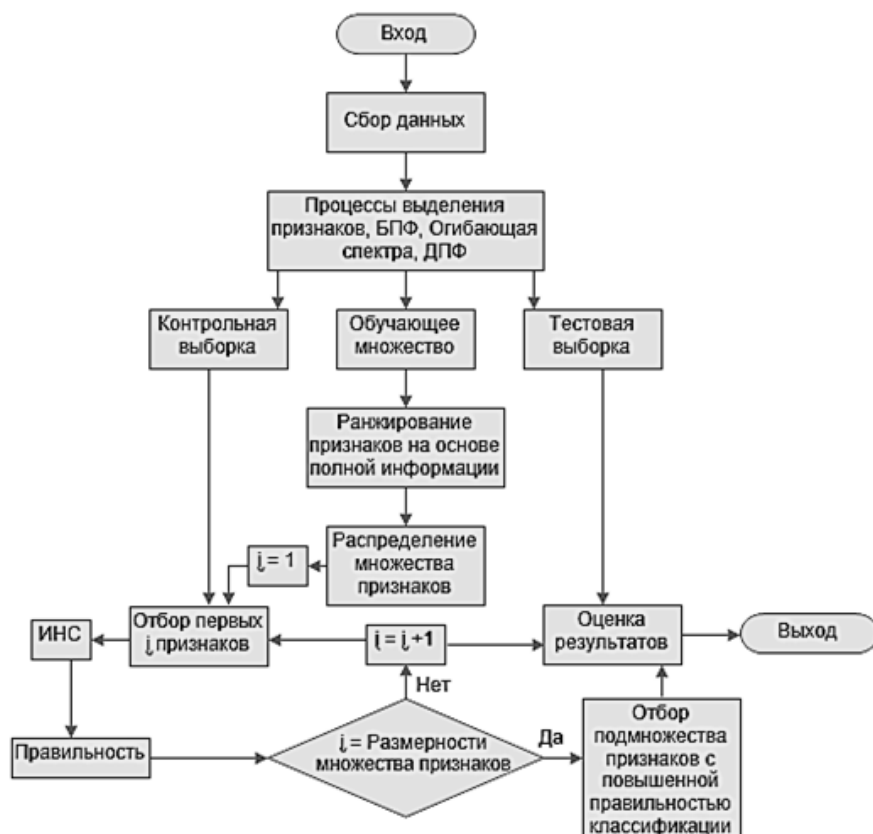


Рис. 4. Алгоритм отбора признаков, выделенных из сигнальной информации вибродиагностики

Fig. 4. Feature selection algorithm based on vibration diagnostic signal information

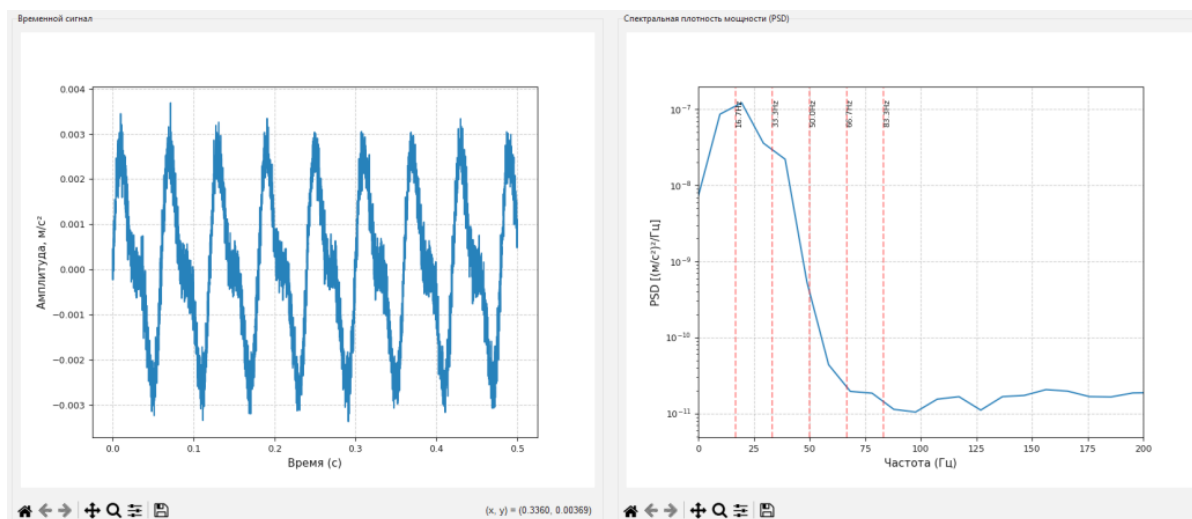


Рис. 5. Демонстрация преобразования вибросигнала в спектральную плотность мощности

Fig. 5. Demonstration of vibration signal transformation into spectral power density

Для каждой гармоники рассчитывается энергетический вклад через коэффициент гармонических искажений. Параллельно вычисляются статистические параметры сигнала⁷: среднеквадратичное значение (статус «Норма» при 2,30 мм/с); пиковое значение (статус «Норма» при 3,69 мм/с); пик-фактор (статус «Норма» при 1,61); эксцесс (статус «Норма» при 2,06); асимметрия и импульсный фактор, доказавшие свою диагностическую значимость в экспериментальных исследованиях.

Диагностический модуль основан на адаптивной системе пороговых значений, которые динамически корректируются в зависимости от скорости вращения вала шестеренного насоса согласно экспериментально установленным зависимостям. Для формализации правил классификации разработана математическая модель, связывающая статистические параметры с типами дефектов. Например, комбинация

повышенного эксцесса ($>4,5$) и высокого пик-фактора ($>5,0$) интерпретируется как признак усталостного разрушения подшипника, а рост энергии в высокочастотном диапазоне СПМ (>100 Гц) при одновременном снижении среднеквадратичного значения свидетельствует о развитии кавитационных процессов. Каждое диагностическое правило имеет коэффициент достоверности, рассчитанный на основе байесовского подхода к анализу экспериментальных данных.

Визуализационная подсистема обеспечивает многоуровневое отображение результатов и представлена в интерфейсе программного окна (рис. 6).

Архитектура системы предусматривает возможность интеграции новых диагностических модулей через API, что открывает перспективы для адаптации программы при диагностике других типов оборудования гидравлических систем технологических машин⁸ [9].

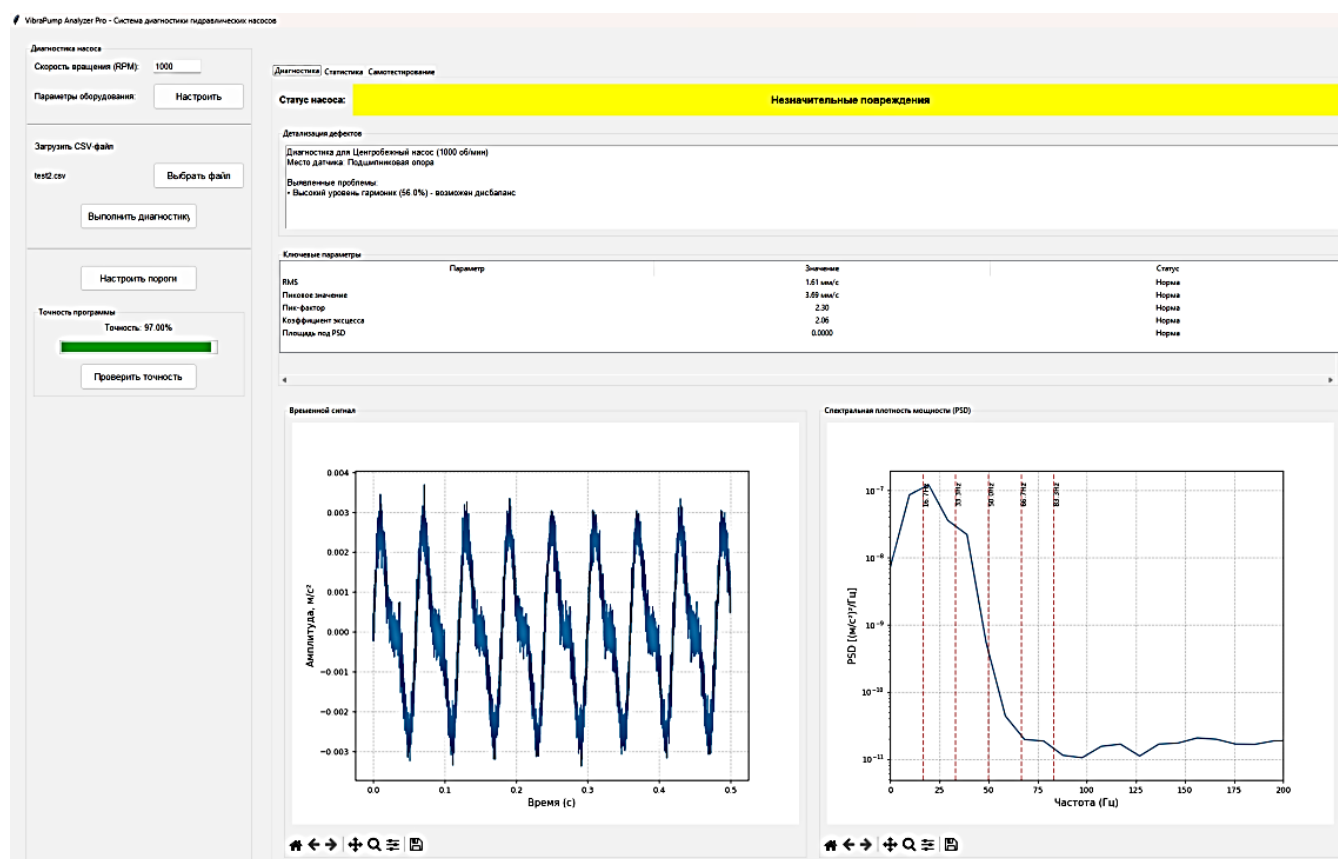


Рис. 6. Интерфейс программного окна получения информации о состоянии шестеренного насоса в режиме реального времени

Fig. 6. Software window interface providing real-time information on the gear pump condition

⁷ Использование размерности, мм/с, в диагностических признаках «среднеквадратичное значение» и «пиковое значение» и процедура использования акселерометра являются требованием международного стандарта вибродиагностики ISO 20816, которое реализуется разработанным программным обеспечением. Остальные показатели имеют безразмерное значение (примеч. авт.).

⁸ Цифровизация в сфере технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственной техники: Аналитический обзор / И.Г. Голубев, Н.П. Мишуков, В.Ф. Федоренко и др. М.: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2023. 80 с. EDN: SLRTIS

Апробацию представленной методики провели на гидравлическом насосе НШ-32А, устанавливаемом на тракторах МТЗ-82.2, МТЗ-1005, МТЗ-1221, широко распространенных в отечественной сельскохозяйственной отрасли. В результате экспериментальных исследований получили сигналы вибрации, характерные для различных состояний деталей насоса. Первоначально данные получили от исправно работающего насоса, а затем – при выявленных отклонениях в геометрии и целостности компонентов, вызывающих в последующем неисправность. Каждому типу выявленных неисправностей присваивался статус (табл. 2). Точность выявления дефектов с использованием СПМ-анализа и разработанной программной платформы составляет 90-93%. Классификация состояний насоса НШ-32А с выявленными неисправностями представлена на рисунке 7.

Решение о необходимости приостановки эксплуатации насоса и проведении внепланового технического обслуживания в рамках предложенной методики принимается на основе комплексной оценки двух ключевых факторов:

1. Превышение адаптивных пороговых значений диагностических признаков, рассчитываемых

в зависимости от скорости вращения вала насоса. Критическими считаются случаи, когда такие показатели, как пик-фактор ($>5,0$) и эксцесс ($>4,5$), одновременно превышают установленные для данного режима работы пороги, что с высокой достоверностью свидетельствует о развитии усталостных разрушений в подшипниковых узлах.

2. Выявление комбинированного дефекта (класс IV по разработанной классификации), характеризующегося одновременным ростом энергии вибрации в нескольких частотных диапазонах – например, в зонах характерных частот подшипника и зацепления шестерен. Такой сценарий указывает на комплексный износ сопрягаемых элементов и риск возникновения отказа.

Таким образом, диагностируемые дефекты подшипников и шестерен напрямую влияют на главный эксплуатационный параметр насоса – его объемный КПД. Развитие этих дефектов приводит к увеличению зазоров и росту внутренних утечек, что вызывает падение производительности (объемного КПД) насоса. Превышение вибрационных порогов служит прямым указанием на достижение критического уровня износа и принятие решения об остановке эксплуатации насоса.

Учитываемые неисправности насоса НШ-32А (фрагмент алгоритма)

Таблица 2

Recorded NSh-32A pump faults (algorithm fragment)

Table 2

Номер	Тип неисправности	Кодирование метки классификации
1	Насос работает в штатном режиме, неисправности не обнаружены	I статус
2	Выявлено отклонение в геометрии и/или целостности опорного подшипника – внутренний торцевой износ	II статус
3	Выявлено отклонение в геометрии и/или целостности шестерни – износ торца зуба	III статус
4	Выявлен комплекс отклонений в сопрягаемых блоках	IV статус

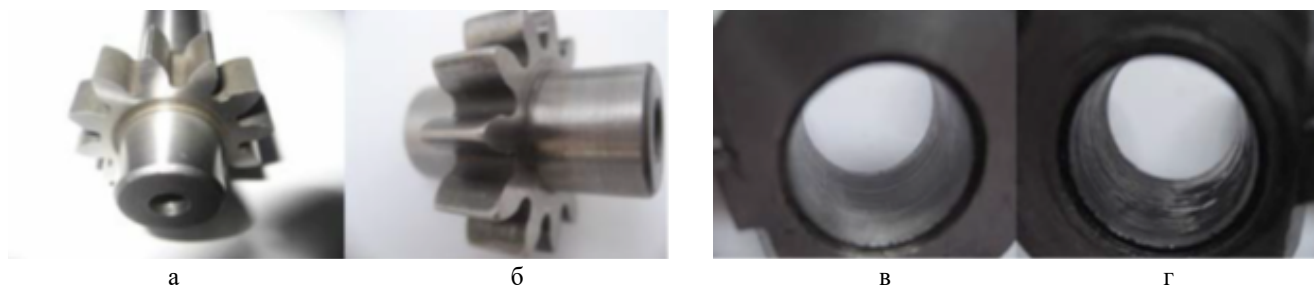


Рис. 7. Детали насоса НШ-32А:

а) исправная шестерня; б) шестерня с износом торца зуба; в) рабочий опорный подшипник; г) опорный подшипник с внутренним износом

Fig. 7. NSh-32A pump parts:

a) serviceable gear; b) gear with a worn tooth face; c) serviceable support bearing; d) support bearing with internal wear

Гипотеза подтверждена: применение предложенной методики контроля технического состояния гидравлических систем технологических машин позволило диагностировать неисправности с высокой точностью.

Направления дальнейших исследований будут ориентированы на установление зависимостей изменения значения виброускорения на величину объемного КПД шестеренного насоса. Это позволит перейти от диагностики по пороговым значениям к прогнозированию остаточного ресурса на основе динамики вибрационных характеристик.

Выводы

1. Разработанная методика вибродиагностики, эффективность которой экспериментально подтверждена на примере работы гидравлического насоса НШ-32А, устанавливаемого на тракторах МТЗ-82.2, МТЗ-1005, МТЗ-1221, создает возможность в режиме

реального времени оценить его состояние и перейти от регламентного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию. При этом минимизируются внеплановые простои технологических машин в период посевных и уборочных работ, уменьшаются затраты на ремонт машин и повышается эффективность сельскохозяйственных работ.

2. Предложенная методика контроля технического состояния гидравлических систем позволяет преобразовывать вибросигналы в систему нечеткого вывода, выявлять/диагностировать 4 состояния насоса (исправное, износ подшипника, износ шестерни, комбинированный дефект) с точностью 90...93% при рабочих скоростях вала 1000...2000 об/мин.

3. С помощью разработанной методики можно дистанционно в режиме онлайн проводить оценку функционального параметра шестеренного насоса – объемного КПД.

Список источников

1. Апатенко А.С., Севрюгина Н.С. Механизм распознавания состояния конструктивных элементов технологических машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 12. С. 23-28. EDN: DCCVQD
2. Севрюгина Н.С., Апатенко А.С. Интеграция профилей цифровых двойников технологических машин в сфере эксплуатации и сопровождения // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы XV Международной научно-практической конференции. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2023. С. 84-91. EDN: BTHBCT
3. Ступин О.А., Некрасов С.И., Кучинский Р.Г. Вибродиагностика как современный метод контроля и диагностирования гидроприводов технологических машин // Международный технико-экономический журнал. 2022. № 5-6. С. 75-86. EDN: SMEEFO
4. Herszberg I., Bannister M.K., Li H.C.H., Tomson R.S. Structural Health Monitoring for advanced composite structures. ICCM International Conferences on Composite Materials. 2007. URL: https://www.researchgate.net/publication/289645207_Structural_health_monitoring_for_advanced_composite_structures
5. Peng Y., Dong M., Zuo M. Current status of machine prognostics in condition – based maintenance: a review. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010;50:297-313. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2482-0>
6. Ступин О.А., Некрасов С.И. Анализ методов обработки вибросигналов при диагностировании элементов гидросистем технологических машин // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях: Материалы IX Международной научно-практической конференции, Саратов, 27-28 апреля 2022 г. Саратов: ООО «Амирит», 2022. С. 371-374. EDN: HBCUDE
7. Saravanan N., Ramachandran K.I. Fault diagnosis of spur bevel gear box using discrete wavelet features and Decision Tree classification. Expert Systems with Applications. 2019;36(5):9564-9573. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.07.089>
8. Unal M., Onat M., Demetgul M., Kucuk H. Fault diagnosis of rolling bearings using a genetic algorithm

References

1. Apatenko A.S., Sevryugina N.S. Mechanism for state recognition of structural components of processing machines. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*. 2020;12:23-28. (In Russ.)
2. Sevryugina N.S., Apatenko A.S. Integration of digital twin profiles for technological machines in the field of operation and maintenance. *Nauchno-informatsionnoe obespechenie innovatsionnogo razvitiya APK = Scientific and Information Support for the Innovative Development of the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference*. M.: FSBNI "Rosinformagrotekh". 2023:84-91. (In Russ.)
3. Stupin O.A., Nekrasov S.I., Kuchinskiy R.G. Vibrodiagnostics as a modern method of monitoring and diagnostics of hydraulic drives of technological machines. *International Technical Journal*. 2022;5-6:75-86. (In Russ.)
4. Herszberg I., Bannister M.K., Li H.C.H., Tomson R.S. Structural Health Monitoring for advanced composite structures. ICCM International Conferences on Composite Materials. 2007. URL: https://www.researchgate.net/publication/289645207_Structural_health_monitoring_for_advanced_composite_structures
5. Peng Y., Dong M., Zuo M. Current status of machine prognostics in condition – based maintenance: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010;50:297-313. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2482-0>
6. Stupin O.A., Nekrasov S.I. Analysis of vibration signal processing methods for diagnostics of elements of hydrosystems of technological machines. *Innovatsii v prirodoobustroytve i zashchite v chrezvychaynykh situatsiyakh = Innovations in Environmental Management and Protection in Emergency Situations: Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference*, Saratov, April 27-28, 2022. Saratov: ООО "Amirit", 2022:371-374. (In Russ.)
7. Saravanan N., Ramachandran K.I. Fault diagnosis of spur bevel gear box using discrete wavelet features and Decision Tree classification. *Expert Systems with Applications*. 2019;36(5):9564-9573. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.07.089>
8. Unal M., Onat M., Demetgul M., Kucuk H. Fault diagnosis of rolling bearings using a genetic algorithm

optimized neural network. Measurement. 2014;58:187-196. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.08.041>

9. Sevryugina N.S., Apatenko A.S. Import substitution and monitoring of workpiece quality. Russian Engineering Research. 2023;43(8):927-933. <https://doi.org/10.3103/s1068798x23080294>

Информация об авторах

¹ Ступин Олег Александрович, старший преподаватель; stupin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1466-572X>; SPIN-код 8620-2870

² Шитикова Александра Васильевна, д-р с.-х. наук, профессор; plant@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5943-0430>; SPIN-код: 8094-8014

³ Апатенко Алексей Сергеевич, д-р техн. наук, профессор; a.apatenko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>; SPIN-код: 7553-2715

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

Вклад авторов

А.С. Апатенко – научное руководство, формулирование основной концепции исследований;

А.В. Шитикова – ресурсы и описание используемых агротехнологий;

О.А. Ступин – разработка и описание программного комплекса, проведение экспериментов.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 29.08.2025, после рецензирования и доработки 29.10.2025; принята к публикации 31.10.2025

optimized neural network. Measurement. 2014;58:187-196. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.08.041>

9. Sevryugina N.S., Apatenko A.S. Import substitution and monitoring of workpiece quality. Russian Engineering Research. 2023;43(8):927-933. <https://doi.org/10.3103/s1068798x23080294>

Author Information

Oleg A. Stupin¹, Senior Lecturer; stupin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1466-572X>

Aleksandra V. Shitikova², DSc (Ag), Professor; plant@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5943-0430> Scopus Author ID: 57212139251; Researcher ID: A-2946-2016

Alexey S. Apatenko³, DSc (Eng), Professor; a.apatenko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>; Scopus Author ID: 57216908465

^{1,2,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Author Contribution

A.S. Apatenko – research supervision, conceptualization;

A.V. Shitikova – resources;

N.S. Sevryugina – literature review, writing – original draft, manuscript review and editing;

O.A. Stupin – development and description of the software package, experimental work.

Conflict of interests

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

Received 29.08.2025; Revised 29.10.2025; Accepted 31.10.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.173:631.95:691.175

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-45-51>

Композиционный биodeградируемый полимерный материал для фильтрационных систем

Е.А. Улюкина¹, С.С. Гусев², А.С. Свиридов³, Н.Д. Блинов⁴, Н.П. Попова⁵^{1,2} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия^{3,4} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия⁵ МИРЭА-РТУ Институт тонких химических технологий; г. Москва, Россия¹ eulykina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3048-6836>² gusev.s@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3619-6848>³ sviridov.vim@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9396-2281>⁴ nik.blinov76@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-8734-2885>⁵ nataliykapopova123@gmail.com

Аннотация. Для очистки воды, топлива и технологических жидкостей традиционно применяют разнообразные виды фильтров, подлежащие замене и утилизации по истечении срока эксплуатации. Мировая тенденция экологизации производств требует грамотной утилизации отработанных материалов. В связи с этим перспективным направлением развития производства новых фильтрующих материалов является создание композиционного полимерного материала, способного самопроизвольно разлагаться после окончания срока эксплуатации, не выделяя токсичных веществ, загрязняющих почву и грунтовые воды. Цель исследований: синтезировать новый биоразлагаемый полимерный композиционный материал для использования в фильтрационных системах. Для создания полимерного фильтра разработана оригинальная методика получения высокопористого полимерного материала растворным методом с помощью напыления коллоидного раствора на подложку. Контроль состава полученной полимерной композиции осуществляли на ИК-Фурье спектрометре SIMEX FT-801 с алмазной НПВО приставкой. Анализ распределения компонентов в композите проводили на микроскопе БИОМЕД-2 посредством окулярной камеры. В результате синтеза получили новый композиционный биodeградируемый материал на основе полилактида с бутадиен-нитрильным каучуком БНКС-28 АМН и резорцином. Методом ИК-спектроскопии в полученном композиционном материале обнаружили наличие цис- и трансзамещенных ароматических соединений, фенолов и сложных эфиров, а также изонитрилов. Это показывает, что исследуемый материал состоит из сложной смеси полимерных волокон, в котором часть макромолекул полилактида взаимодействует с резорцином, а часть – с каучуком. Микроскопическое исследование образца композиционного материала показало наличие 20750 пор/см² со средним размером пор 31 мкм. Результаты исследований доказывают возможность использования полученного биodeградируемого композиционного полимера в качестве фильтра для очистки воздуха, воды и других жидкостей.

Ключевые слова: композиционный биodeградируемый полимерный материал; полимер; композит; фильтр; высокопористый материал; микроскопическое исследование

Для цитирования: Улюкина Е.А., Гусев С.С., Свиридов А.С., Блинов Н.Д., Попова Н.П. Композиционный биodeградируемый полимерный материал для фильтрационных систем // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 6. С. 45-51. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-45-51>

ORIGINAL ARTICLE

Biodegradable polymer composite for filtration applications

E.A. Ulyukina^{1✉}, S.S. Gusev², A.S. Sviridov³, N.D. Blinov⁴, N.P. Popova⁵^{1,2}Russian Timiryazev State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow; Russia^{3,4}Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow; Russia⁵Institute of Fine Chemical Technologies of RTU-MIREA; Moscow; Russia¹eulykina@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-3048-6836>²gusev.s@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3619-6848>³sviridov.vim@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9396-2281>⁴nik.blinov76@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-8734-2885>⁵nataliykapopova123@gmail.com

Abstract. Traditional filters for water, fuel, and process fluids require replacement and disposal, raising environmental concerns. The growing need for sustainable waste management has spurred research into biodegradable filter materials that decompose naturally without releasing harmful substances into the environment. This study aimed to synthesize a novel, biodegradable polymer composite for filtration applications. For this purpose, the authors developed a unique method for producing highly porous polymer materials by spraying a colloidal solution on a substrate. The resulting polymer composite was analyzed using a SIMEX FT-801 FTIR spectrometer with a diamond ATR accessory. Component distribution within the composite was analyzed with a BIOMED-2 microscope and an eyepiece camera. The synthesis yielded a new biodegradable composite material composed of polylactide (PLA), BNK-28 AMN butadiene-nitrile rubber, and resorcinol. FTIR spectroscopy confirmed the presence of cis- and trans-substituted aromatic compounds, phenols, esters, and isonitriles in the composite material, indicating a complex mixture of polymer fibers. This suggests that some PLA macromolecules interact with resorcinol, while others interacted with the rubber component. Microscopic analysis revealed a highly porous structure with 20,750 pores/cm² and an average pore size of 31 microns. These results demonstrate the promising prospects of this novel biodegradable composite polymer as a sustainable filter material for air, water, and other liquids.

Keywords: composite biodegradable polymer material; polymer; composite; filter; highly porous material; microscopic examination

For citation: Ulyukina E.A., Gusev S.S., Sviridov A.S., Blinov N.D., Popova N.P. Biodegradable polymer composite for filtration applications. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(6):45-51 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-45-51>

Введение

В сельскохозяйственном производстве постоянно требуется проводить операции по очистке от загрязнений различных сред: воды, воздуха, технологических жидкостей и т.д. Универсальным средством очистки жидкостей и газов служат разнообразные по устройству и материалам фильтры¹ [1-4]. Среди множества фильтров стоит выделить широко используемые для очистки воды, топлива, нефтепродуктов и другие полимерные фильтры [5-9]. Фильтры на основе волокнисто-пористых полимерных материалов наилучшим образом зарекомендовали себя в качестве основных рабочих компонентов очистных систем²

¹ Коваленко В.П., Турчанинов В.Е. Очистка нефтепродуктов от загрязнений. М.: Недра, 1990. 160 с.

² Кравцов А.Г., Марченко С.А., Зотов С.В., Станкевич В.М., Наумов А.Д. Полимерные волокнисто-пористые фильтрующие материалы / Под общ. ред. Ю.М. Плещачевского. Гомель: БелГУТ. 2012. 319 с.

Эффективность фильтрования зависит от комплекса свойств фильтроматериала и условий протекания процесса фильтрации [10].

Комплекс свойств композиционного полимерного материала обусловлен его составом. В составе смеси каждый полимер придает определенные характеристики получаемому композиту. Таким образом, основная задача технологии получения смесей сосредоточена на выборе индивидуальных полимеров и способе их сочетания с целью получения материалов с заданными свойствами.

В смеси полимеры и полимер-эластомеры имеют особенности взаимодействия. Взаимное термодинамическое сродство полимеров характеризует величина взаиморастворимости. Под совместимостью полимеров понимается молекулярная взаиморастворимость. В зависимости от молекулярной взаиморастворимости смеси полимеров подразделяют на совместимые, несовместимые и ограниченно

растворимые. В частности, различные сочетания каучуков являются несовместимыми, так как они представляют собой двухфазные механические дисперсии, которые отличаются от индивидуальных каучуков физико-химическими характеристиками [11].

Важнейшими факторами, определяющими механические свойства и морфологию композита, являются уровень совместимости компонентов и энергия взаимодействия на границе фаз в смеси полимеров. В смеси каждый полимер стремится образовать свою фазу, что приводит к фазовому разделению [12]. Кроме совместимости, формирование фазовой структуры зависит от концентрации и молекулярной массы компонентов. Таким образом, если полимеры достаточно совместимы, то фазовая структура может быть однородной.

Один из вариантов полимерно-эластомерных смесей – это сочетание полимера с каучуком. Эластомер придает смеси свои уникальные свойства: высокую эластичность, гибкость и устойчивость к разрыву. Взаимодействие полимера и эластомера основано на силах Ван-дер-Ваальса, дисперсионных силах и водородных связях. Это позволяет образовать надмолекулярную структуру, где эластомерные частицы распределены в полимерной матрице. В смесях с каучуками образуется сетка из эластомерных частиц, которые могут быть равномерно распределены или могут иметь различные структурные особенности, а именно дисперсную или агрегатную структуру.

Таким образом, смеси полимер-эластомер обладают улучшенными механическими свойствами по сравнению с чистыми полимерами – такими, как ударопрочность, гибкость и растяжимость. С другой стороны, морфология и надмолекулярная структура в смесях с каучуками могут существенно изменяться в зависимости от условий и состава смеси, что имеет важное значение для оптимизации свойств и применения таких материалов.

При производстве современных фильтров нужно учитывать не только комплекс свойств фильтроматериала, но и его способность самопроизвольно разлагаться. Экологические требования к производству требуют грамотной утилизации отработанных материалов, поэтому перспективным направлением является создание инновационного полимерного материала, который по окончании срока службы мог бы самопроизвольно разлагаться, не образуя при этом токсичных веществ, загрязняющих почву и грунтовые воды. Можно использовать в составе полимера биоразлагаемые добавки, например, полилактид (продукт полимеризации молочной кислоты, ПЛА) – один из современных биоразлагаемых полимеров, который легко разлагается в почве [13].

Цель исследований: синтезировать новый биоразлагаемый полимерный композиционный материал для использования в фильтрационных системах.

Материалы и методы

Для создания полимерного фильтра необходимо получить тонкую пористую пленку из полимерного смесового материала. Полимерная смесь включает в себя матрицу и наполнитель. В качестве матрицы использовали полимер-эластомерную композицию из смеси биodeградируемого пластика полилактида и эластомера – бутадиен-нитрильного каучука БНКС-28 АМН, в качестве наполнителя – резорцин. Полилактид (полимолочная кислота, ПЛА) – полиэфир молочной кислоты, продукт натурального происхождения, разлагаемый в почве при повышенной температуре и наличии влаги.

В исследовании использовали полилактид марки 4032D, характеристики которого представлены в таблице 1.

В качестве эластомера применили бутадиен-нитрильный каучук БНКС-28 АМН (28 означает среднее процентное содержание нитрила акриловой кислоты, А – полимеризован при низкой температуре (5°C), М – каучук мягкий, вязкость по Муни составляет 50...70 усл. ед., Н – заправлен неокрашивающим противостарителем). Свойства каучука представлены в таблице 2.

В качестве наполнителя и функциональной добавки использовали резорцин. Резорцин применяется в медицине в качестве обеззараживающего средства, пары и пыль резорцина могут раздражать кожу и слизистую глаз и дыхательных путей, вызывая кашель [14]. Технические характеристики резорцина высшего сорта ОКП 24 7211 0120 представлены в таблице 3.

Образец композиционного материала получили по оригинальной разработанной методике воздушным напылением.

Таблица 1
Физические свойства полилактида PLA 4032D³

Table 1
Physical properties of polylactide PLA 4032D

Показатель	Значение
Плотность, г/см ³	1,24
Предел прочности на разрыв, МПа	103,4
Температура плавления, °C	155...170

³ Biopolymer 4032D Technical Data Sheet//NatureWorks URL: https://www.natureworksllc.com/~media/Technical_Resources/Technical_Data_Sheets/TechnicalDataSheet_4032D_films_pdf (дата обращения: 20.04.2025).

**Физические свойства каучука
бутадиен-нитрильного БНКС-28 АМН⁴**

Таблица 2

Table 2

Physical properties of butadiene-nitrile rubber BNKS-28 AMN

Показатель	Значение
Массовая доля стабилизатора (Агидол-2), %	0,50...1,20
Потеря массы при сушке, %, не более	0,8
Растворимость в метилэтилкетоне, %	95
Тип антиоксиданта	неокрашивающий
Разброс по вязкости внутри партии, не более	8
Массовая доля золы, %, не более	1,0
Вязкость по Муни, МБ (1 + 4 (100°C))	61...70
Массовая доля связанного нитрила акриловой кислоты, %	27...30

Технические характеристики резорцина⁵

Таблица 3

Table 3

Technical characteristics of resorcinol

Показатель	Значение
Плотность, г/см ³	1,27
Температура плавления, °С	110
Растворимость в воде, г/100 мл	140
Растворимость в бензоле, г/100 мл	193
Дипольный момент	2,70
Массовая доля фенола, %, не менее	0,09
Оптическая плотность водного раствора массовой концентрации 12 г/дм ³ , не более	0,10

Сложный состав полимерной композиции ввиду своих свойств требует контроля как качественного и количественного состава, так и распределения компонентов по поверхности материала. Пористость – важнейшее свойство фильтрующих материалов, поэтому важно оценить размеры частиц

⁴ Каучук бутадиен-нитрильный // Россполимер. URL: https://rosspolimer.ru/produktsiya/catalog_ps/kauchuk/kauchuk-butadien-nitrilnyj-bnks-28amn-gruppa-2-krasnoyarskiy-zavod-sinteticheskogo-kauchuka-oao/?ysclid=m9iaaxv6ca539790729 (дата обращения: 20.04.2025).

⁵ ГОСТ 9970-74. Резорцин технический. Технические условия: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 6 июня 1974 г. № 1405, введен 1975-01-07. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200020188> (дата обращения: 20.04.2025)

и пор. Оценивали размеры частиц с помощью мультипараметрической микроскопии на ИК-Фурье спектрометре SIMEX FT-801 с алмазной НПВО-приставкой (Новосибирск, Россия). Полученные микрофотографии обрабатывали с помощью комплекса программного обеспечения.

Анализ распределения компонентов проводили с помощью оптической микроскопии с последующей программной обработкой. Исследования выполняли на микроскопе БИОМЕД-2 с компьютерным подключением посредством окулярной камеры.

Методика получения образца. Основным отличием от стандартных методик является использование полимер-эластомерной композиции на основе биodeградируемого пластика и вещества-активатора поверхности (резорцин). Для изготовления исследуемого материала взвешивали навески полимерных компонентов, исходя из требуемого объема рабочего раствора. Далее в растворитель последовательно вводили компоненты: полилактид, затем резорцин, и, наконец, каучук. Перемешивание осуществляли верхнеприводной мешалкой в течение 2 ч до полного растворения полимерных компонентов. Была установлена конкуренция между резорцином и каучуком при их взаимодействии с полилактидом.

В соответствии с разработанной методикой раствор смеси полимеров наносили на стеклянную подложку по растворной технологии методом воздушного напыления с помощью аэрографа. В емкость устройства заливали приготовленный раствор и распыляли на стеклянную подложку по заданной области. Распыление проводили с фиксированной позиции на расстоянии 50 см от подложки для получения микропористой поверхности.

Результаты и их обсуждение

Важнейшими показателями для волокнисто-пористых материалов являются параметры, характеризующие пористую структуру. Пористость влияет на поверхностные и объемные свойства фильтрующего материала. Полученный раствор представляет собой коллоидную систему, концентрация и распределение компонентов которой определяет пористость полученного полимерного материала. На рисунке 1 приведена микрофотография структуры композиционного материала, полученного методом напыления коллоидного раствора на подложку.

Для определения пористости провели компьютерную обработку полученного изображения в среде ПО DG Analyser. Результаты исследований показали, что в данном образце 20750 пор/см² со средним

размером пор 31 мкм. Можно заключить, что высокое содержание пор в исследованном композиционном материале позволяет использовать его в качестве фильтра, а размер пор обеспечит высокую тонкость фильтрования.

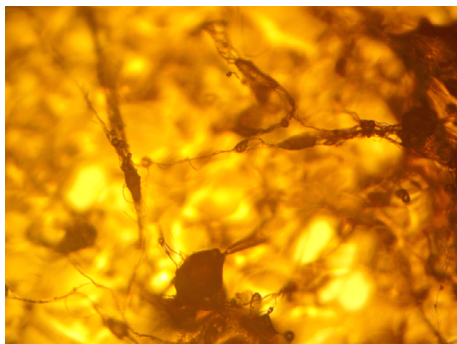


Рис. 1. Микрофотография волокон композиционного материала на основе полилактида с бутадиен-нитрильным каучуком БНКС-28 АМН и резорцином

Fig. 1. Microphotograph of composite material fibers based on polylactide with butadiene-nitrile rubber BNKS-28 AMN and resorcinol

Состав полученных волокон контролировали методом ИК-спектроскопии. На рисунке 2 приведен ИК-спектр композиционного материала.

Анализ полученного ИК-спектра показал наличие следующих значимых полос:

689 см^{-1} – C=C цис-замещенные ароматические соединения;

966 см^{-1} – C=C транс-замещенные ароматические соединения;

1041, 1080, 1126 см^{-1} – замещенные ароматические соединения;

1180 см^{-1} – фенолы, сложные эфиры;

1746 см^{-1} – сложные эфиры;

2116 см^{-1} – изонитрилы, связь между молекулами каучука и полилактида.

Таким образом, результаты ИК-спектроскопии композиционного материала на основе полилактида с бутадиен-нитрильным каучуком БНКС-28 АМН и резорцином показали, что полученный материал состоит из сложной смеси полимерных волокон, в котором часть макромолекул полилактида взаимодействует с резорцином, а часть – с каучуком.

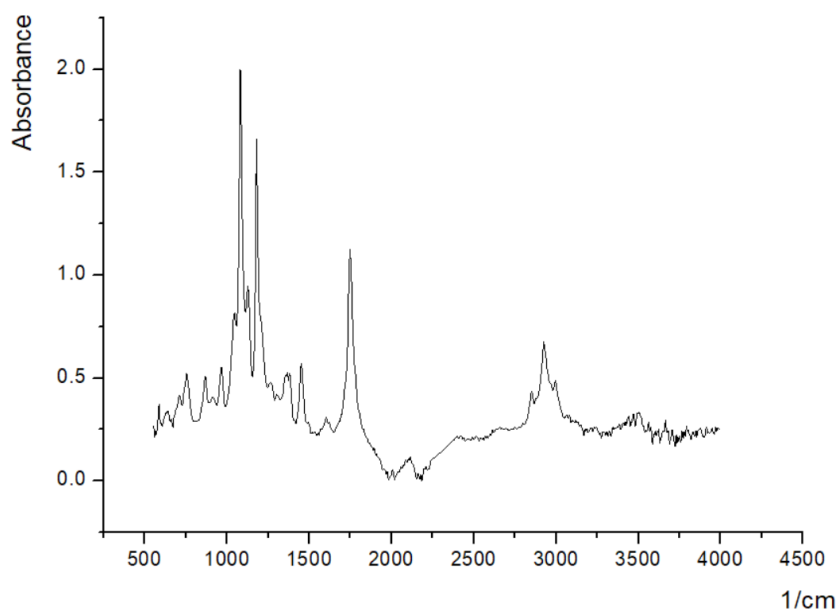


Рис. 2. ИК-спектр композиционного материала на основе полилактида с бутадиен-нитрильным каучуком БНКС-28 АМН и резорцином

Fig. 2. IR spectrum of composite material based on polylactide with butadiene-nitrile rubber BNKS-28 AMN and resorcinol

Выводы

1. Разработана оригинальная методика получения высокопористого полимерного композиционного материала на основе полилактида с бутадиен-нитрильным каучуком БНКС-28 АМН и резорцином раствором методом с помощью напыления коллоидного раствора на подложку.

2. Полученный композит состоит из сложной смеси полимерных волокон (часть макромолекул полилактида взаимодействует с резорцином, а часть – с каучуком) и отличается высоким содержанием пор (20750 пор/ см^2) со средним размером 31 мкм.

3. Полученный новый биodeградируемый композитный полимер может использоваться в качестве

фильтрующего материала и обеспечивать высокую тонкость фильтрации с частицами загрязнений до 10 мкм, а после окончания срока эксплуатации

самопроизвольно разрушаться без выделения токсичных веществ.

Список источников

1. Лебедева О.В., Сипкина Е.И. Полимерные композиты и их свойства // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2022. Т. 12, № 2. С. 192-207. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-2-192-207>
2. Орешников А.В., Пирогов Ю.Н., Константинов В.Е., Шарыкин Ф.Е. Эффективность применения гидрофобных проволочных сетчатых перегородок при гидродинамическом фильтровании топлива // Нефтепереработка и нефтехимия. 2022. № 1. С. 21-25. EDN: HVFXUC
3. Многоканальный гидродинамический фильтр: Патент RU168131 U1, МПК B01 D36/00(2006.01) / В.В. Прошкин, А.Н. Каптюх, Д.Д. Моршан и др.; заявл. 04.07.2016; опубл. 18.01.2017, Бюл. № 2. EDN: UKTAAВ
4. Улюкина Е.А., Орешников А.В., Шарыкин Ф.Е. Экспериментальное исследование эффективности гидродинамического фильтрования дизельного топлива // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 2. С. 34-40. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-2-34-40>
5. Способ получения полимера с пространственно-глобулярной структурой: Патент RU2470948 C1 / Г.С. Жданов, С.С. Новиков, А.Ю. Сандеров; заявл. 11.07.2011; опубл. 27.12.2012. Бюл. № 36. EDN: ZGORNР
6. Фильтрующий материал для тонкой очистки масел и топлив, способ его получения и применение: Патент RU2732273 C1 / М.А. Смульская, И.Ю. Филатов, И.А. Капустин; заявл. 18.09.2019; опубл. 14.09.2020. 10 с. EDN: AEXXRO
7. Способ получения ультратонких полимерных волокон: Патент RU2527097 C2 / И.Д. Симонов-Емельянов Ю.Н. Филатов, А.В. Петров; заявл. 13.12.2012; опубл. 27.08.2014. 5 с. EDN: ZQWJСХ
8. Самоочищающийся фильтр: Патент RU205889 U1 / А.А. Андреев, Е.А. Улюкина, С.С. Гусев, А.С. Апатенко; опубл. 11.08.2021. Бюл. № 23. EDN: PKSHQU
9. Улюкина Е.А., Андреев О.П., Гусев С.С. и др. Очистка биотоплива с помощью высокопористого полимерного фильтра // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 6. С. 71-76. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-71-76>
10. Бардадым В.Ю. Что важнее: высокая эффективность hera-фильтров или их производительность? // Инновационная наука. 2021. № 1. С. 15-18. EDN: PEBNUW
11. Дьяконов А.А., Тапьев С.А., Охлопкова А.А. и др. Исследование свойств эластомеров на основе комбинации изопренового и бутадиен-нитрильного каучуков // Южно-Сибирский научный вестник. 2021. № 3. С. 93-97. <https://doi.org/10.25699/SSSB.2021.37.3.003>
12. Jem K.J., Tan B. The development and challenges of poly (lactic acid) and poly (glycolic acid). *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2020;3(2):60-70. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2020.01.002>
13. Малахов С.Н., Малышкина А.В., Чвалун С.Н. Нетканые материалы на основе полилактида для сорбции углеводородов различной вязкости // Журнал прикладной химии. 2022. Т. 95, № 9. С. 1179-1186. <https://doi.org/10.31857/S0044461822090109>
14. Schmiedel K.W., Decker D. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012. 521 с.

References

1. Lebedeva O.V., Sipkina E.I. Polymer composites and their properties. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2022;12(2):192-207. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-2-192-207>
2. Oreshnikov A.V., Pirogov Yu.N., Konstantinov V.E., Sharykin F.E. Efficiency of application hydrophobic wirenetwork partition in hydrodynamic filtering of fuel. *Neftepererabotka i neftekhimiya*. 2022;1:21-25. (In Russ.)
3. Proshkin V.V., Kaptyukh A.N., Moroshan D.D., Kovalenko V.P., Moroz A.F., Mammadov R.G., Sharykin F.E. Multi-channel hydrodynamic filter: Pat. 168131. Russian Federation, IPC B01 D36/00(2006.01); published on 18.01.2017.
4. Ulyukina E.A., Oreshnikov A.V., Sharykin F.E. Experimental efficiency studies of the hydrodynamic filtration of diesel fuel. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(2):34-40 (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-2-34-40>
5. Zhdanov G.S., Novikov S.S., Sanderov A.Y. Method of producing polymer with spatial-globular structure: Pat. RF 2470948; published on 27.12.2012.
6. Smulskaya M.A., Filatov I.Yu., Kapustin I.A. Filtering material for fine cleaning of oils and fuels, method of production and application thereof: Patent of the Russian Federation, No. 2732273; applied on 18.09.2019; published on 14.09.2020.
7. Simonov-Yemelyanov I.D., Filatov Yu.N., Petrov A.V. Method of obtaining ultrathin polymer fibers: Patent of the Russian Federation, No. 2527097; applied on 13.12.2012; published on 27.08.2014.
8. Andreev A.A., Ulyukina E.A., Gusev S.S., Apatenko A.S. Self-cleaning filter: Pat. RF No. 205889; published on 11.08.2021.
9. Ulyukina E.A., Andreev O.P., Gusev S.S., Andreev A.A., Melikov A.V. Biofuel purification using a highly porous polymer filter. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(6):71-76. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-71-76>
10. Bardadym V.U. What is more important: high efficiency of heap-filters or their performance? *Innovation Science*. 2021;1:15-18. (In Russ.)
11. Diakonov A.A., Tapyev S.A., Okhlopko A.A. et al. Research of elastomers properties based on combination of isoprene and nitrile butadiene rubbers. *South-Siberian Scientific Bulletin*. 2021;3:93-97. (In Russ.)
12. Jem K.J., Tan B. The development and challenges of poly (lactic acid) and poly (glycolic acid). *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2020;3(2):60-70. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2020.01.002>
13. Malakhov S.N., Malyshkina A.V., Chvalun S.N. Polylactide-based nonwoven materials for sorption of oils of different viscosity. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2022;95(9):1373-1379 (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0044461822090109>
14. Schmiedel K.W., Decker D. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012. 521 p.

Информация об авторах

- ¹ **Улюкина Елена Анатольевна**, д-р техн. наук, профессор; eulykina@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-3048-6836>; SPIN-код: 5118-1522
- ² **Гусев Сергей Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент; gusev.s@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3619-6848>; SPIN-код: 3730-7430
- ³ **Свиридов Алексей Сергеевич**, научный сотрудник; sviridov.vim@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9396-2281>; SPIN-код: 7334-3624
- ⁴ **Блинов Никита Дмитриевич**, младший научный сотрудник; nik.blinov76@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-8734-2885>; SPIN-код: 5033-8004
- ⁵ **Попова Наталья Павловна**, студент; nataliykapopova123@gmail.com
- ^{1,2} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49
- ^{3,4} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5
- ⁵ Институт тонких химических технологий РТУ-МИРЭА; 119454, Российская Федерация, г. Москва, Проспект Вернадского, 78

Вклад авторов

Е.А. Улюкина – концептуализация, планирование экспериментов, формулирование выводов;
 С.С. Гусев – организация экспериментов, обработка результатов, анализ;
 А.С. Свиридов – лабораторное обеспечение, организация экспериментов, оформление статьи;
 Н.Д. Блинов – проведение исследований, анализ, обработка результатов, отчет;
 Н.П. Попова – получение полимерного материала, проведение испытаний

Конфликт интересов

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

Статья поступила 03.06.2025, после рецензирования и доработки 23.09.2025; принята к публикации 26.09.2025

Author Information

- Elena A. Ulyukina**¹, DSc (Eng), Professor; eulykina@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-3048-6836>; Scopus ID57218137674
- Sergey S. Gusev**², CSc (Eng), Associate Professor; gusev.s@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3619-6848>; Scopus ID58399738100
- Aleksey S. Sviridov**³, Research Engineer; sviridov.vim@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9396-2281>
- Nikita D. Blinov**⁴, Junior Research Engineer; nik.blinov76@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-8734-2885>
- Nataliya P. Popova**⁵, student; nataliykapopova123@gmail.com
- ^{1,2} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation
- ^{3,4} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5 1st Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, Russian Federation
- ⁵ Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University; 78 Vernadsky Avenue, Moscow, 119454, Russian Federation

Author Contribution

E.A. Ulyukina – conceptualization, methodology, conclusions;
 S.S. Gusev – investigation, validation, formal analysis;
 A.S. Sviridov – resources; investigation; writing – original draft;
 N.D. Blinov – investigation, formal analysis, validation;
 N.P. Popova – resources, investigation.

Conflict of interests

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

Received 03.06.2025; Revised 23.09.2025; Accepted 26.09.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.162

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-52-59>

Направления совершенствования воспроизводства технического потенциала аграрного сектора экономики страны

*Памяти академика РАН Ю.А. Конкина***В.Т. Водяников¹, Е.Ф. Малыха², Н.В. Сергеева³**^{1,2,3} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Москва, Россия¹ vtvodyannikov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7111-9437>² efmalykha@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7143-7574>³ nvsergeewa@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6757-1666>

Аннотация. Доктрины продовольственной безопасности страны требуют наличия современной работоспособной и высокопроизводительной техники, однако отечественный машинно-тракторный парк отличается суженным воспроизводством. Срок списания среднего статистического трактора составляет более 20 лет. Цель исследований – выявить стратегические неиспользованные резервы повышения технического потенциала агропромышленного комплекса за счет совершенствования процесса воспроизводства машин. В качестве методологии исследований использовали результаты, полученные исследователями научной инженерно-экономической школы академика РАН Ю.А. Конкина, а также статистические данные обеспеченности отечественных сельскохозяйственных организаций тракторами и комбайнами в 2021-2023 гг. и сравнительной оценки коэффициентов обновления тракторов. В результате выдвинуты приемы практического осуществления воспроизводства машин: государственное регулирование, поддержка процесса воспроизводства технической базы и практическая реализация правительственных программ развития сельского хозяйства; льготное кредитование и целевое финансирование аграрной отрасли страны. Предложили пересмотреть методы начисления амортизации на реновацию, эквивалентность обмена при купле-продаже новой и поддержанной техники, лизинге, нормативные правовые акты, связанные с экономическими взаимоотношениями сельхозтоваропроизводителей, перерабатывающих предприятий, посредников и торговых сетей. Предложили реализовывать наработки проблемной лаборатории по экономике ремонта и технического обслуживания МИИСП имени В.П. Горячкина, выполненные инженерно-экономической научной школой академика РАН Ю.А. Конкина на базе 3-кратных обследований 150 тыс. тракторов.

Ключевые слова: воспроизводство; экономические отношения; государственное регулирование; вторичный рынок сельскохозяйственной техники; срок службы технических средств; лизинг; трактор

Для цитирования: Водяников В.Т., Малыха Е.Ф., Сергеева Н.В. Направления совершенствования воспроизводства технического потенциала аграрного сектора экономики страны // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 6. С. 52-59. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-52-59>

ORIGINAL ARTICLE

Areas for improving the technical capacity reproduction of the national agricultural sector

*Tribute to Yu.A. Konkin, Full Member of the Russian Academy of Sciences***V.T. Vodyannikov¹, E.F. Malykha², N.V. Sergeeva³**^{1,2,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ vtvodyannikov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7111-9437>² efmalykha@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7143-7574>³ nvsergeewa@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6757-1666>

Abstract. The country's food security doctrines require modern, efficient and high-performance machinery, but the domestic machine and tractor fleet is characterized by limited reproduction. The depreciation period for an average statistical tractor is more than 20 years. The study aimed to identify strategic unused reserves

for increasing the technical capacity of the agro-industrial sector by improving machine reproduction. The research methodology rests on the results obtained by the scientific Engineering and Economics School of Yu.A. Konkin, Full Member of the Russian Academy of Sciences, as well as statistical data on the availability of tractors and combine harvesters for domestic farm enterprises in 2021-2023 and a comparative assessment of tractor renewal coefficients. As a result, techniques for the practical implementation of machine reproduction have been put forward: state regulation and support of the reproduction of technical facilities and the practical implementation of government programs for the development of agriculture.; preferential lending and targeted financing of the national agricultural sector. It was proposed to review the methods of depreciation for renovation, the equivalence of exchange in the purchase and sale of new and used machinery, leasing, and regulatory acts related to the economic relations of agricultural producers, processing enterprises, intermediaries and retail chains. The authors propose to implement the proposals of the Problematic Laboratory on the Economic Aspects of Repair and Maintenance of the Goryachkin Agricultural Engineering Institute (MIISP) performed by the Engineering and Economic Scientific School of Yu.A. Konkin, Full Member of the Russian Academy of Sciences. The research base includes a 3-fold examination of 150 thousand tractors.

Keywords: reproduction; economic relations; government regulation; secondary market for farm machinery; service life of machinery and equipment; leasing; tractor

For citation: Vodyannikov V.T., Malykha E.F., Sergeeva N.V. Areas for improving the technical capacity reproduction of the national agricultural sector. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(6):52-59 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-52-59>

Введение

Экономическая эффективность использования ресурсов в сельскохозяйственном производстве предполагает разработку и практическую реализацию финансово-экономических инструментов инвестирования при воспроизводстве его технического потенциала. Тенденция воспроизводства машинно-тракторного парка России в XXI в. такова, что научное сообщество относит его к суженному, или простому. Средний статистический трактор имеет срок списания более 20 лет. По возобновлению энергетических мощностей машинно-тракторного парка сельскохозяйственных предприятий ситуация иная, но констатировать расширенное воспроизводство не представляется возможным. В этой связи правительство страны реализует на практике программы обновления машинно-тракторного парка посредством льготного кредитования сельхозтоваропроизводителей, финансового укрепления отделений ПАО «Росагролизинг», разработки и практической реализации стратегии машинно-технологической модернизации сельского хозяйства в рамках государственных программ.

Отечественное машиностроение остро нуждается в мерах государственной поддержки и создании благоприятных условий развития промышленных отраслей. Увеличение объемов производства сельскохозяйственной продукции и выполнение условий Доктрины продовольственной безопасности страны требуют наличия современной работоспособной и высокопроизводительной техники.

В условиях необоснованных санкций западных стран происходит деформация рынка

сельскохозяйственной техники, что требует адекватных мер [1].

В структуре фактического воспроизводства машин выявлено два направления. Первое направление – обновление парка машин техникой нового поколения с полной его заменой, предполагающее значительные объемы капитальных вложений в модернизацию отечественного тракторного и сельскохозяйственного машиностроения, а также наличие соответствующих финансовых возможностей сельскохозяйственных товаропроизводителей. Второе направление – организация рынка подержанной техники и ориентация на продление жизненного цикла машин сверх установленных амортизационных сроков на реновацию.

Вторичный рынок сельскохозяйственной техники в настоящее время еще не получил признания, хотя в 1990-е гг. был широко распространен. В тот период ремонтные заводы и специализированные предприятия имели солидные производственные программы. Технические обменные пункты выполняли роль посредников между собственниками машин и предприятиями вторичного производства. В настоящее время присутствуют некоторые элементы вторичного рынка: например, выкуп у населения легковых автомобилей, отработавших десятилетний срок, и их утилизация, и продажа новых машин по льготным ценам с целью развития автопрома. Инициативы организации вторичного рынка со стороны Министерства сельского хозяйства РФ или ПАО «Росагролизинг» применительно к сельскохозяйственным машинам и тракторам не наблюдается.

Цель исследований: провести оценку фактической ситуации и выявить стратегические неиспользованные резервы повышения технического потенциала агропромышленного комплекса за счет совершенствования процесса воспроизводства машин.

Материалы и методы

Методологическую основу исследований составляет диалектическая теория как всеобщая методология науки, законы и категории которой применяются в процессе научно-исследовательской деятельности. В ходе исследований применен комплекс общенаучных методов: анализ, в том числе контент-анализ; анализ документов; синтез; структурно-функциональный, абстрактно-логический, монографический и экономико-статистический анализ. Использованы результаты, полученные исследователями научной инженерно-экономической школы академика РАН Ю.А. Конкина. Информационной базой исследований стали результаты, полученные в проблемной научно-исследовательской лаборатории по экономике ремонта и технического обслуживания машинно-тракторного парка Московского института инженеров сельскохозяйственного производства имени В.П. Горячкина, авторские разработки, а также статистические данные обеспеченности отечественных сельскохозяйственных организаций тракторами и комбайнами в 2021-2023 гг. и результаты сравнительной оценки коэффициентов обновления тракторов [2].

Результаты и их обсуждение

В течение 20 лет государственная поддержка сельских товаропроизводителей оказывает позитивное влияние на доходность продукции, но за последние 5 лет по объективным и субъективным причинам наметилась тенденция снижения уровня рентабельности предприятий и сокращение объемов продаж. Выделенные сельхозтоваропроизводителям государственные средства способствовали увеличению объема производства продукции и накоплению производственного потенциала аграрной отрасли, что позволило по ряду показателей превысить пороговые значения индикаторов отечественной доктрины продовольственной безопасности. Впервые в отечественной практике Минсельхоз России, Правительство и Президент страны отмечают значительный рост объема экспорта продовольствия, соизмеримый с объемом экспорта продукции Минобороны.

Рост цен на горюче-смазочные материалы, увеличение затрат на запасные части, ремонтные работы и техническое обслуживание устаревающей материально-технической базы агропромышленного

комплекса ведут к потере рентабельности и снижению финансовой устойчивости сельхозтоваропроизводителей.

Рост цен на новую и поддержанную технику, а также увеличение эксплуатационных затрат изношенной используемой техники требуют вмешательства государства в виде мер поддержки: например, субсидирования части затрат на покупку горюче-смазочных материалов [3].

Значительный рост цен на сельскохозяйственную технику, связанный с резким удорожанием производства металла и комплектующих, привел к ситуации, когда доходы сельхозтоваропроизводителей от продаж продукции не покрывают расходы на приобретение необходимой техники.

Показатель обеспеченности отечественных сельскохозяйственных организаций тракторами и комбайнами в 2021-2023 гг. отражает рост нагрузки пашни на 1 га (табл. 1).

По нашим подсчетам, каждый трактор должен работать в среднем не менее 20-30 лет (при условии стабильности машинно-тракторного парка) в аграрном секторе [4, 5]. В итоге это приводит к снижению количественных и качественных параметров машинно-тракторного парка в отрасли, что подтверждает необходимость соответствующего изменения технической политики в отрасли со стороны государства [6].

Очевидны необходимость вмешательства государства в лизинговые сделки, обеспечение соблюдения принципа эквивалентности товарообмена – принципа равной экономической заинтересованности и ответственности партнеров лизингового бизнеса [7]. В случае замедления обновления сельскохозяйственной техники необходимо вмешательство государства, так как экономические интересы участников лизинговой сделки носят взаимоисключающий характер. Каждый из участников заинтересован в максимизации собственной прибыли, при этом не исключается вариант ее получения за счет партнера в рамках действующих законов в стране.

При условии господдержки показатели обновления сельскохозяйственной техники до уровня 6,0...7,0% достижимы, процесс сдерживается ситуацией на рынках сельхозпродукции. Государство призвано не ограничивать экспорт, а стимулировать его, чтобы аграрии могли зарабатывать и инвестировать, тем более что в стране есть потенциал усиления сельскохозяйственного производства.

Появилась настоящая проблема в период планово-директивной экономики, когда государство активно регулировало доходность производителей, посредников и потребителей машин. В рамках прав

Таблица 1

Обеспеченность сельскохозяйственных организаций тракторами и комбайнами по Российской Федерации в 2021-2023 гг.

Table 1

Availability of tractors and combines in farm enterprises of the Russian Federation in 2021-2023

Показатели	Годы		
	2021	2022	2023
Приходится тракторов на 1000 га пашни, шт.	3	3	3
Приходится пашни на 1 трактор, га	349	363	372
Приходится на 100 тракторов, шт.:			
плугов	28	28	28
культиваторов	40	40	39
в том числе комбинированных агрегатов	5	5	5
борон	26	24	24
машин для посева	17	18	17
Приходится комбайнов на 1000 га посевов (посадки): соответствующих культур, штук			
зерноуборочных	4	3	3
кукурузоуборочных	2	2	1
картофелеуборочных	21	24	24
льноуборочных	9	8	8
свеклоуборочных машин (без ботвоуборочных)	4	3	3

Примечание. Составлено авторами на основе данных Росстата РФ (http://ssl.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/S_x_2023.pdf).

Таблица 2

Показатели обновления сельскохозяйственной техники

Table 2

Agricultural machinery upgrade indicators

Федеральные округа	Количество тракторов на 1000 га (без учета тракторов со спец-оборудованием), шт.	Приобретено в 2023 г. новых тракторов (без учета специальных), шт.	Списано в 2023 г. тракторов по причине износа (без учета специальных), шт.	Коэффициент обновления (приобретено к наличию на конец года), %
Центральный	2,87	1855	1024	4,0
Северо-Западный	6,59	419	206	4,8
Южный	2,69	1635	954	4,5
Северо-Кавказский	2,44	378	235	3,5
Приволжский	2,14	2219	1739	4,2
Уральский	2,08	398	232	3,7
Сибирский	1,72	1101	687	4,3
Дальневосточный	2,33	171	225	3,3
По Российской Федерации	2,39	8176	5302	4,2

Примечание. Составлено авторами на основе данных Росстата РФ (http://ssl.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Nalich_...).

и полномочий Минсельхоза, Союзсельхозтехники, Минавтотранса, Минтракторного и сельскохозяйственного машиностроения Госплану СССР удавалось балансировать экономическими интересами субъектов хозяйствования лишь потому, что отношение собственности к использованию средств производства и экономическому результату для всех было одно – государственное [8, 9]. В настоящее время, в условиях отсутствия добросовестной конкуренции

и наличия элементов монопольного положения производителей, переработчиков и торговых сетей по реализации продовольствия, посредников и иных субъектов рынка, достичь справедливой рыночной конкуренции без жесткого государственного регулирования невозможно. Это показывает современная действительность в сфере агролизинга.

Отметим, что сегодня множество договоров лизинга техники находится в судебном разбирательстве,

что говорит о неблагоприятии экономических отношений в этой сфере. Кроме того, имеет место продажа права собственности по расторгнутым договорам, а это – инструмент передела собственности активной части основных средств производства сельскохозяйственных предприятий [9]. Данная ситуация сказалась на финансово-экономическом механизме функционирования зарождающегося рынка подержанной сельскохозяйственной техники [8].

Негативный отпечаток на процессе воспроизводства техники наложило отсутствие эффективных регламентаций в решениях и постановлениях Правительства страны, Минсельхоза России и соответствующей практики внедрения ПБУ (в части ведения бухгалтерского учета машиноиспользования), отражающих не только физический, но и экономический (моральный) износ машин в зависимости от срока службы. В расчет полезного срока эксплуатации по-прежнему принимается только физическая выработка машины.

Износ технических средств при производстве сельскохозяйственной продукции следует рассматривать как необратимый и непрерывный экономический процесс. Установление общего износа затруднено в связи с необходимостью учета морального износа техники, снижающего потребительскую стоимость технических средств производства [5, 6].

В соответствии с теорией движения капитала и кривой изменения износа процесс переноса стоимости техники на единицу выполняемой работы отражается на себестоимости производимой продукции. Согласно законам воспроизводства техники производимые отчисления от стоимости используемой техники должны эквивалентно отражаться в нормах амортизационных отчислений на реновацию техники. Сельхозтоваропроизводитель, приобретая технические средства, зачастую обращает пристальное внимание на цену и гарантии производителя или посредника. В итоге он принимает управленческое решение в соответствии с величиной общественно необходимых затрат, переносимых техникой на производимую продукцию, эквивалентно параметрам экономического снашивания, то есть утрате своей первоначальной потребительной стоимости. При этом целесообразно учесть в данной стоимости не только расходы, проявляющиеся при производительном использовании технических средств в данный момент [9], но и те, которые будут появляться в ходе износа в последующие периоды их эксплуатации.

В 90-е гг. закономерности экономического снашивания технических средств для рыночных отношений были реализованы Минфином РФ в нормативных

документах и ПБУ как база воспроизводства активной части основного капитала предприятия и действуют в хозяйственной практике в настоящее время. Из этого следует, что рекомендации инженерно-экономической научной школы академика РАН Ю.А. Конкина и проблемной лаборатории по экономике ремонта и технического обслуживания МТП в сельском хозяйстве МИИСП имени В.П. Горячкина востребованы в настоящее время. Рекомендации ученых школы по установлению амортизационных сроков, обеспечивающих воспроизводство техники, направленного на снижение потерь при моральном износе, способствуют ускоренному обновлению технического потенциала сельхозтоваропроизводителей. Еще одна рекомендация инженерно-экономической школы академика Ю.А. Конкина заключается в том, чтобы амортизационные отчисления не производить в случаях, когда амортизационный срок истек, а технические средства продолжают производительно применяться [8, 10, 11].

Сегодня, независимо от динамики изменения основного эксплуатационного параметра, сельхозтоваропроизводителям предоставляется право самостоятельно устанавливать амортизационный срок службы технических средств с учетом их фактических параметров. Результаты и закономерности, полученные учеными инженерно-экономической школы, следовало бы учесть лизинговой компании ПАО «Росагролизинг» при заключении лизинговых сделок и установить соответствующую дифференциацию лизинговых платежей. Лизингополучатель вынужден опытным путем определять срок полезного использования машин, учитывая интенсивность использования техники и свои экономические возможности для обновления, принимать управленческое решение о целесообразности исполнения лизингового договора в части платежей и сроков эксплуатации объекта лизинга. Наличие 56%-ной просроченной дебиторской задолженности ПАО «Росагролизинг» свидетельствует о проблемах и несовершенстве экономического механизма применения агролизинга [11].

Наблюдаемое в настоящее время свободно-стихийное формирование взаимоотношений не контролирует эквивалентность, что порождает диспаритет цен. Отношения формируются в условиях недостаточной компетентной научной проработки, но некоторые элементы вправе использовать результаты исследований научных школ прошлых лет, где были рекомендованы пропорциональные методы исчисления амортизации машин, а рекомендованный срок полезного использования был определен не более 10 лет. С переходом на рыночные отношения использован лишь принцип ускоренного формирования

фонда амортизации, а нормативы, рекомендованные Госпланом СССР, остались неизменными.

В настоящее время при определении оптимального срока начисления амортизации следует руководствоваться принципами полной (максимальной) среднегодовой загрузки машин и финансовыми возможностями обновления парка машин предприятия. Если для хозяйства есть возможность сократить срок полезного использования и срок исчисления амортизации до 5-7 лет, а затем приобрести новую технику, то нет смысла препятствовать этому, так как обновление будет проходить более высокими темпами. Рекомендации по экономически целесообразному в современных условиях хозяйствования сроку службы тракторов не соответствуют рациональному сроку и минимуму затрат потребителя.

Согласно рекомендациям зарубежных экономистов ключевым регулятором экономических взаимоотношений между потребителями и производителями признается цена. Соотношение спроса и предложения – рыночное равновесие на конкурентных рынках – порождает цену. Однако проявление закона спроса-предложения возможно лишь в сбалансированной рыночной системе, в которой субъекты рынка находятся в рыночном равновесии. Выводы зарубежных экономистов подтверждают отсутствие в нашей стране равновесия между спросом и предложением, поскольку общий спрос значительно превышает предложение, однако он отложен до достижения платежеспособности сельхозтоваропроизводителями [12].

Современная действительность такова, что может возникнуть дефицит по ряду товаров производственного назначения, по которым «господствует» монополизм производителя с отсутствием рыночной реакции потребителя (отложенное предложение на спрос). Примером отечественной практики служит неизвестная зарубежным экономистам парадоксальная ситуация, когда есть спрос и есть предложение, но купли-продажи нет. В этом случае проявляются особенности закона отложенного спроса, которые имеют высокую вероятность появления значимых рисков и непрогнозируемых последствий. Рассматриваемое теоретическое положение в настоящее время является актуальным, так как практическая ситуация на рынках сельскохозяйственной техники корректируется медленно.

Важный параметр при экономическом снашивании – норма отчисления на амортизацию (на реновацию). Сегодня механизм определения размера этих отчислений усовершенствован. Начисление амортизации с помощью метода уменьшаемого остатка, метода суммы чисел лет амортизации и метода пропорционально объему произведенной продукции

показывает реализацию наработок ученых инженерно-экономической научной школы академика РАН Ю.А. Конкина. Отметим, что многие рекомендации в сегодняшней практике не нашли своего применения, поэтому в аграрном секторе экономики наблюдаем снижение эффективности использования бюджетных средств. Данное обстоятельство во многом способствует дискредитации лизингового инструмента как одного из механизмов воспроизводства технического потенциала в сельском хозяйстве.

Выводы

1. В связи с отсутствием конкуренции в воспроизводственном процессе и малочисленностью платежеспособных потребителей аграрному сектору необходимо государственное регулирование на правительственном уровне посредством разработки целевой программы перехода на расширенное воспроизводство техники.

2. Повышение технического оснащения сельского хозяйства определяется уровнем совершенства рынка техники и наличием платежеспособного спроса. Снижение платежеспособного спроса на машины заблокировало развитие предприятий сельхозмашиностроения.

3. Покупателя интересует не только машина, но и услуги производителя по техническому сервису (гарантийные и послегарантийные), поскольку затраты на ремонт и техническое обслуживание в 2-3 раза превышают первоначальную цену новых машин. Отсутствие ремонтно-обслуживающей базы хозяйств, инженерно-технических и рабочих кадров по техническому сервису не способствует повышению эффективности имеющегося технического потенциала.

4. Для восстановления уровня технического оснащения сельского хозяйства и перехода на принципы расширенного воспроизводства необходимо государственное регулирование экономических взаимоотношений с учетом паритета цен и новой технико-экономической политики в отношении производителей машин с потребителями.

5. Следует пересмотреть нормативные правовые акты, связанные с экономическими взаимоотношениями, в целях обеспечения взаимовыгодных условий сельхозтоваропроизводителей, перерабатывающих предприятий, посредников и торговых сетей. Необходимо регулировать ценообразование на продукцию и услуги партнеров аграрной отрасли.

6. Использование технических средств производства должно сопровождаться выполнением всего объема работ планово-предупредительной системы ремонта и технического обслуживания, развитием

материально-технической базы с целью рациональной эксплуатации технических средств сельхозтоваропроизводителями, использованием принципов ресурсосбережения посредством экономии топливно-энергетических ресурсов, рационального хранения техники за счет реализации ускоренных методов создания амортизационных фондов для строго целевого использования, внутрихозяйственного планирования расходов на поддержание работоспособности

Список источников

1. Федотов А.В., Маслова В.В. Развитие рынка сельскохозяйственной техники в условиях политики импортозамещения и экспортоориентированной экономики // АПК: экономика, управление. 2019. № 5. С. 57-65. <https://doi.org/10.33305/195-57>
2. Кузьмин В.Н. Оценка машинно-тракторного парка в сельском хозяйстве Российской Федерации // Экономика сельского хозяйства России. 2024. № 5. С. 8-15. <https://doi.org/10.32651/245-8>
3. Бурак П.И., Голубев И.Г. Обновление парка сельскохозяйственной техники в рамках ведомственного проекта «Техническая модернизация агропромышленного комплекса» // Техника и оборудование для села. 2023. № 7 (313). С. 2-7. EDN: JZCGZX
4. Ерохин М.Н., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. и др. Производство и ремонт отечественных машин для агропромышленного комплекса с позиции принципа 5М // Вестник машиностроения. 2023. Т. 102, № 8. С. 701-704. EDN: BUMPSG
5. Зазуля А.Н., Нагорнов С.А., Голубев И.Г. О состоянии парка сельскохозяйственной техники // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства: Сборник научных докладов XXII Международной научно-практической конференции, Тамбов, 27-29 сентября 2023 г. Тамбов: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», 2023. С. 71-75. EDN: NPJOWI
6. Водяников В.Т., Субаева А.К., Александрова Н.Р. Модернизация технического ресурса аграрного сектора экономики России в условиях санкционных ограничений // Экономика сельского хозяйства России. 2024. № 2. С. 29-36. <https://doi.org/10.32651/242-29>
7. Черноиванов В.И., Денисов В.А., Катаев Ю.В. и др. Новая стратегия технического обслуживания и ремонта машин // Техника и оборудование для села. 2021. № 9 (291). С. 33-36. EDN: DQBNRT
8. Водяников В.Т. Тенденции совершенствования технических средств и сменяемости технологических укладов производства // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 2. С. 76-80. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-2-76-80>
9. Зимин Н.Е. Проблемы экономических отношений при лизинге сельскохозяйственных машин в системе воспроизводства материально-технической базы предприятий АПК // Проблемы и направления развития системы экономической безопасности организаций АПК: Материалы Национальной (общероссийской) научно-практической конференции, посвященной 155-летию РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, 20-22 апреля 2020 г. М.: ООО «Научный консультант», 2020. С. 103-108. EDN: HCFDJU

технических средств на основе дифференцированных нормативов, учитывающих срок эксплуатации техники.

7. Необходимо реализовывать наработки проблемной лаборатории по экономике ремонта и технического обслуживания МИИСП имени В.П. Горячкина, выполненные инженерно-экономической научной школой академика РАН Ю.А. Конкина на базе 3-кратных обследований 150 тыс. тракторов.

References

1. Fedotov A.V., Maslova V.V. Development of the market of agricultural machinery in the conditions of policy of import substitution and export-oriented economy. *AIC: Economics, Management*. 2019;5:57-65. (In Russ.) <https://doi.org/10.33305/195-57>
2. Kuzmin V.N. Evaluation of the machine and tractor fleet in agriculture of the Russian Federation. *Economics of Agriculture of Russia*. 2024;5:8-15. (In Russ.) <https://doi.org/10.32651/245-8>
3. Burak P.I., Golubev I.G. Renewal of the park of agricultural machinery with the framework of the departmental project "Technical modernization of the agro-industrial complex". *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;7:2-7. (In Russ.)
4. Erokhin M.N., Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. et al. Production and repair of domestic machines for agroindustrial complexes from the position of the 5M principle. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2023;102(8):701-704. (In Russ.)
5. Zazulya A.N., Golubev I.G., Nagornov S.N. On the state of the agricultural machinery park. In: *Povyshenie effektivnosti ispolzovaniya resursov pri proizvodstve selskokhozyaystvennoy produkcii – novye tekhnologii i tekhnika novogo pokoleniya dlya rastenievodstva i zhivotnovodstva = Improving the efficiency of resource use in agricultural production – new technologies and equipment of a new generation for crop production and animal husbandry*: Proceedings of XXII International Scientific and Practical Conference, Tambov, September 27-29, 2023. Tambov: Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Scientific Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture". 2023:71-75. (In Russ.)
6. Vodyannikov V.T., Subaeva A.K., Alexandrova N.R. Modernization of the technical resource of the agricultural sector Russian economy under sanctions restrictions. *Economics of Agriculture of Russia*. 2024;2:29-36. (In Russ.) <https://doi.org/10.32651/242-29>
7. Chernouvanov V.I., Denisov V.A., Kataev Yu.V. A new strategy for machine maintenance and repair. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021;9:33-36. (In Russ.)
8. Vodyannikov V.T. Trends in the improvement of technical means and the replaceability of technological modes of production. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(2):76-80. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-2-76-80>
9. Zimin N.E. Problems of economic relations in the leasing of agricultural machinery in the system of reproduction of the material and technical base of agricultural enterprises. *Problemy i napravleniya razvitiya sistemy ekonomicheskoy bezopasnosti organizatsiy APK = Problems and development trends in the economic security system of agricultural organizations*: Proceedings of the National (all-Russian) scientific and practical Conference dedicated to the 155th anniversary of the Russian Timiryazev State Agricultural Academy, Moscow, April 20-22, 2020. Moscow: ООО "Nauchniy consultant". 2020:103-108. (In Russ.)

10. Сергеева Н.В., Пантеева А.И. Тенденции развития рынка отечественных запчастей в АПК // Наука и образование. 2024. Т. 7, № 2. EDN: BRCDHU

11. Малыха Е.Ф. Особенности современного рынка сельскохозяйственной техники // Техника и оборудование для села. 2024. № 10. С. 44-48. EDN: WFNYVY

12. Веселовский М.Я., Федотов А.В., Фатдаков Р.В. и др. Проблемы развития регионального машиностроения в контексте необходимости импортозамещения // Вестник Московского государственного областного университета. Серия «Экономика». 2023. № 2. С. 59-70. <https://doi.org/10.18384/2310-6646-2023-2-59-70>

Информация об авторах

¹ Водяников Владимир Тимофеевич, д-р экон. наук, профессор; vtvodyannikov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7111-9437>; SPIN-код: 3882-0347

² Малыха Екатерина Федоровна, канд. экон. наук, доцент; efmalykha@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7143-7574>; SPIN-код: 1195-0581

³ Сергеева Наталья Викторовна, канд. экон. наук, доцент; nvsergeewa@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6757-1666>; SPIN-код: 7168-2448

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

Вклад авторов

В.Т. Водяников – концептуализация, методология, руководство исследованием;

Е.Ф. Малыха – верификация данных, формальный анализ;

Н.В. Сергеева – администрирование данных, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование, визуализация.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 20.06.2025, после рецензирования и доработки 09.11.2025; принята к публикации 10.11.2025

10. Sergeeva N.V., Pantheeva A.I. Trends in the development of the domestic market spare parts in the agro-industrial complex. *Science and Education*. 2024;7(2):195. (In Russ.)

11. Malykha E.F. Features of the modern agricultural machinery market. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2024;10:44-48. (In Russ.)

12. Veselovsky M.Ya., Fedotov A.V., Fatdakov R.V. Problems of regional mechanical engineering development in the context of the need for import substitution. *Bulletin of the State University of Education. Series: Economics*. 2023;2:59-70. (In Russ.) <https://doi.org/10.18384/2310-6646-2023-2-59-70>

Author Information

Vladimir T. Vodyannikov¹, DSc (Econ), Professor; vtvodyannikov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7111-9437>

Ekaterina F. Malykha², CSc (Econ), Associate Professor; efmalykha@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7143-7574>; Scopus Author ID: 57220742685

Natalia V. Sergeeva³, CSc (Eng), Associate Professor; nvsergeewa@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6757-1666>; ResearcherID: AAD-7436-2022; Scopus Author ID: 57216448954

^{1,2,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Author Contribution

V.T. Vodyannikov – conceptualization, methodology, research supervision;

E.F. Malykha – data verification, formal analysis;

N.V. Sergeeva – data curation, writing – original draft, review and editing of the manuscript, visualization.

Conflict of interests

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

Received 20.06.2025; Revised 09.11.2025; Accepted 10.11.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.333:631.171

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-60-66>

Разработка агрегата штангового типа с пневмотранспортной системой для дифференцированного внесения тукосмесей в ресурсосберегающих геоинформационных агротехнологиях точного земледелия

*С.Д. Ридный¹, Е.В. Кулаев², Д.И. Грицай³, Н.А. Баганов⁴,
А.А. Димитров⁵, М.А. Мастепаненко⁶, А.Г. Арженовский⁷*

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Ставропольский государственный аграрный университет; г. Ставрополь, Россия

⁷ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

¹ ridnyy@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-5187-029X>

² bratinsa@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4152-6239>

³ gritcay_kirill@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3277-9461>

⁴ baganov75@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8094-2975>

⁵ diagryp12@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0001-8321-4180>

⁶ mma_26@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8684-118X>

⁷ argenowski@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3569-8934>

Аннотация. Ресурсосберегающие геоинформационные агротехнологии позволяют достигнуть устойчивого производства сельскохозяйственной продукции с минимальными затратами. Дифференцированное внесение твердых минеральных удобрений (ТМУ) позволяет значительно экономить их расход. Смешивание однокомпонентных удобрений с получением тукосмесей непосредственно в поле предотвращает сегрегацию удобрений. Наибольшей степенью равномерности распределения удобрений отличаются машины штангового типа с пневмотранспортной системой. Цель исследований – разработка агрегата для одновременного смешивания однокомпонентных удобрений и точечного дифференцированного внесения полученных тукосмесей в зависимости от потребности почвы в питательных элементах. Исследования провели в учебно-опытном хозяйстве Ставропольского ГАУ. Методикой исследований предусматривалось создание электронной карты поля, на которой проложены треки движения мобильного комплекса с точками отбора проб почвы. Для отбора проб почвы с глубины 30 см использовали мобильный комплекс Mitsubichi L-200 с установленным на нем пробоотборником Nietfeld Duorprob 60. Результаты лабораторного агрохимического исследования проб почвы прикрепляли к треку движения мобильного комплекса и вносили в электронную программу, с помощью которой создавалась картограмма содержания и распределения питательных элементов на поле. Дифференцированное внесение удобрений осуществляли на основе картограммы. В разработанной конструкции агрегата штангового типа с пневмотранспортной системой установлен бункер, разделенный на три отсека, под каждым из которых размещено дозирующее устройство (для каждого типа минеральных удобрений). После смешивания удобрений полученная тукосмесь распределяется по элементарному участку согласно заданию. Предложенная конструкция агрегата устраняет сегрегацию минеральных удобрений, обеспечивает точное соответствие вносимого соотношения N:P:K реальной потребности каждого участка поля, равномерно распределяет тукосмесь.

Ключевые слова: геоинформационные агротехнологии; картограмма; тукосмеси; дифференцированное внесение удобрений; дозирующее устройство; агрегат штангового типа с пневмотранспортной системой

Финансирование. 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: Ридный С.Д., Кулаев Е.В., Грицай Д.И., Баганов Н.А., Димитров А.А., Мастепаненко М.А., Арженовский А.Г. Разработка агрегата штангового типа с пневмотранспортной системой для дифференцированного внесения тукосмесей в ресурсосберегающих геоинформационных агротехнологиях точного земледелия // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 6. С. 60-66. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-60-66>

ORIGINAL ARTICLE

Design of a pneumatic boom unit for variable-rate fertilizer application in resource-saving geoinformation agrotechnologies of precision farming

S.D. Ridnyi¹✉, E.V. Kulaev², D.I. Gritsai³, N.A. Baganov⁴,
A.A. Dimitrov⁵, M.A. Mastepanenko⁶, A.G. Arzhenovskiy⁷

^{1,2,3,4,5,6} Stavropol State Agrarian University; Stavropol, Russia

⁷ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

¹ ridnyi@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-5187-029X>

² bratinsa@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4152-6239>

³ gritcay_kirill@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3277-9461>

⁴ baganov75@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8094-2975>

⁵ diagryp12@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0001-8321-4180>

⁶ mma_26@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8684-118X>

⁷ argenowski@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3569-8934>

Abstract. Precision farming, leveraging geoinformation technologies, enables sustainable and cost-effective agricultural production. Variable-rate application (VRA) of solid mineral fertilizers (SMF) is key to reducing consumption, while the on-field mixing of single-component fertilizers prevents segregation and ensures optimal nutrient mixes. Boom-type units with pneumatic transport systems further enhance fertilizer distribution uniformity. This research aimed to develop a novel boom-type implement for the simultaneous on-field mixing of single-component fertilizers and their targeted, variable-rate application based on real-time soil nutrient requirements. The study was conducted at the educational and experimental farm of Stavropol State Agrarian University. The methodology involved creating a digital field map, defining mobile complex paths and soil sampling points. A Mitsubishi L-200 complex with a Nietfeld Duoprob 60 sampler collected soil samples at 30 cm depth. Agrochemical analysis results were linked to these paths and processed by software to generate a nutrient content cartogram, which then served as the basis for VRA. The developed boom-type implement design features a pneumatic transport system and a three-compartment hopper, each with a dedicated dosing device for individual mineral fertilizers. After mixing, the customized fertilizer mix is distributed across the field according to the application map. This proposed design effectively eliminates mineral fertilizer segregation, ensures precise N:P:K ratios tailored to specific field zones, and guarantees uniform distribution of the fertilizer mix.

Keywords: geoinformation-based agricultural technologies; fertilizer mixtures; variable-rate fertilizer application; pneumatic conveying system; dosing device; boom-type units with a pneumatic transport system

Funding: This article was written 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 program for the development of the world-class scientific center “Agroengineering of the Future” at Stavropol State Agrarian University, approved by the Presidium of the Commission for Scientific and Technological Development of the Russian Federation dated May 29, 2025, Minutes No. 3.

For citation: Ridnyi S.D., Kulaev E.V., Gritsai D.I., Baganov N.A., Mastepanenko M.A., Arzhenovskiy A.G. Design of a pneumatic boom unit for variable-rate fertilizer application in resource-saving geoinformation agrotechnologies of precision farming. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(6):60-66 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-60-66>

Введение

Для достижения устойчивого производства сельскохозяйственной продукции с минимальными затратами в последние годы все активнее внедряются ресурсосберегающие геoinформационные агротехнологии (технологии «точного земледелия» с использованием спутниковых навигационных систем) [1]. Ресурсосберегающие геoinформационные агротехнологии точного земледелия предполагают использование новейших технологий и технических средств – таких, как дистанционное

зондирование земли (ДЗЗ), системы контроля и автоматизации, управления питанием растений, контроля за состоянием почвы, сенсорных устройств, искусственного интеллекта и другие направления. За рубежом повсеместно внедряются геoinформационные агротехнологии точного земледелия, однако в России такие технологии пока не получили широкого развития.

Геoinформационные технологии подразумевают после электронного картирования местности обследование сельскохозяйственных угодий

с использованием мобильного пробоотборника с последующими лабораторными исследованиями образцов почвы на содержание макро- и микроэлементов, pH, органического вещества и проведение непосредственно в поле агрохимического анализа почв с использованием различных датчиков, сенсоров и другого оборудования [2]. По результатам агрохимического обследования почвы разрабатываются карты-задания для последующего дифференцированного внесения твердых минеральных удобрений (ТМУ) [3]. Дифференцированное внесение ТМУ позволяет значительно экономить их расход, снижая затраты на производство продукции и улучшая экологическое состояние окружающей среды. Однако дозы применяемых комплексных сложных минеральных удобрений не всегда могут удовлетворить необходимыми питательными элементами (N:P:K) все участки поля [4]. Для обеспечения потребности участков поля в каждом питательном элементе необходимо производить поэлементное дифференцированное внесение минеральных удобрений, что усложняет операцию и приводит к увеличению затрат. Одним из решений данной проблемы является внесение тукосмеси, дозирование каждого элемента которой производится непосредственно в поле в зависимости от потребности в них каждого участка поля. Однако в нашей стране такие агрегаты не распространены, а их разработка с обоснованием параметров и режимов работы является актуальной задачей.

Цель исследований: разработка агрегата для одновременного смешивания однокомпонентных удобрений и точечного дифференцированного внесения полученных тукосмесей в зависимости от потребности почвы в питательных элементах.

Материалы и методы

Геоинформационными агротехнологиями точно земледелия предусматривается проведение отбора проб почвы механизированным способом с помощью мобильного комплекса по заранее определенному

маршруту в соответствии с методикой отбора проб. Методикой исследований предусматривалось создание электронной карты поля, на которой проложены треки движения мобильного комплекса с точками отбора проб почвы. Треки движения разработаны в научно-испытательном центре сельскохозяйственной техники НЦМУ «Агроинженерия будущего» Ставропольского ГАУ. Исследования провели в учебно-опытном хозяйстве Ставропольского ГАУ. Для отбора проб почвы с глубины 30 см использовали мобильный комплекс в составе автомобиля повышенной проходимости Mitsubishi L-200 с установленным на нем пробоотборником Niefeld Duoprob 60.

В основном исследовали зоны с пониженной урожайностью, которую определяли путем картирования урожайности (с помощью оборудованных на зерноуборочных комбайнах датчиков и приборов), использования технологии дистанционного зондирования земли и определения индексов NDVI развития растительной массы [5]. Анализ проб проводили в агрохимической лаборатории университета. Результаты лабораторного агрохимического обследования проб почвы прикрепляли к треку движения мобильного комплекса и вносили в электронную программу, с помощью которой создавалась картограмма содержания и распределения питательных элементов на поле. Эти данные также являлись основой для разработки карты-задания для дифференцированного внесения удобрений. Например, результаты агрохимического обследования поля, представленного на рисунке 1, показывают, что содержание питательных элементов (фосфора, азота и калия) носят значительную вариабельность внутри участка и не соответствуют однотипному распределению [5].

Полученные результаты послужили основанием для разработки технологии поэлементного внесения питательных элементов (тукосмеси) непосредственно в полевых условиях. Такое решение обосновано значительной сегрегацией различных однокомпонентных минеральных удобрений при смешивании

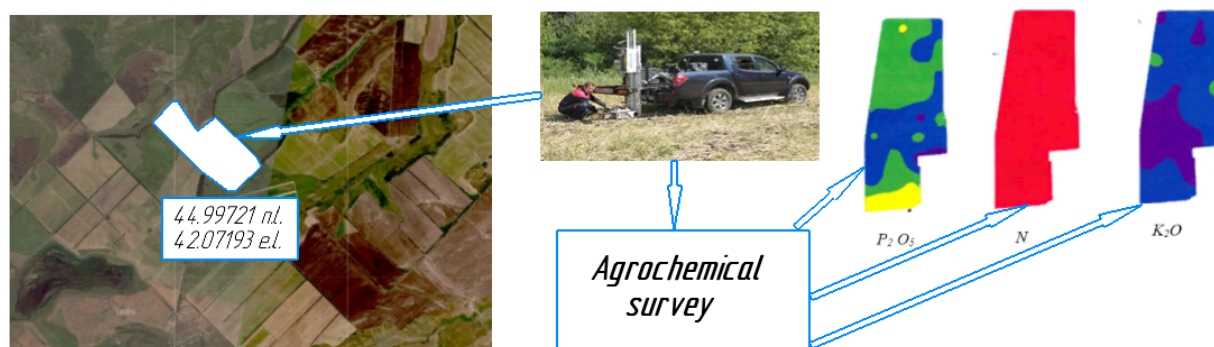


Рис. 1. Процесс получения картограмм распределения питательных элементов на поле

Fig. 1. Producing nutrient distribution maps of a field

их в стационарных условиях и потерей в процессе доставки тукосмеси к месту внесения своих полезных свойств. Для осуществления процесса дифференцированного внесения тукосмеси в полевых условиях необходим агрегат, соответствующий этим требованиям.

Результаты и их обсуждение

В основном внесение ТМУ производится разбросным поверхностным способом машинами с центробежными дисковыми устройствами. Неравномерность внесения ТМУ при таком способе может составлять 10...65%, что в конечном счете может привести к недобору урожая до 20% [6]. Добиться большей равномерности внесения ТМУ позволяют разбрасыватели штангового типа. Наибольшей производительностью и равномерностью распределения ТМУ, а также возможностью проведения дифференциации рассева обладают штанговые распределители с пневмотранспортирующей системой рассева ТМУ.

В современных разбрасывателях штангового типа с пневмотранспортирующей системой рассева ТМУ, предназначенных для внесения комплексных минеральных удобрений, не предусмотрено использование трехсекционных бункеров [7]. В разработанной нами конструкции агрегата штангового типа

с пневмотранспортной системой предусматривается установка бункера, разделенного на 3 отсека (для каждого удобрения с преобладающим содержанием одного из элементов питания – N, P или K), под каждым из которых устанавливается дозирующее устройство для порционного рассеивания удобрений по индивидуальной программе. Пневмотукопровод соединен с управляющими разделителями пневмотукопотока и пневмопроводами n-го количества ступеней, которые оканчиваются распределительными соплами (рис. 2) [8].

Агрегат штангового типа с пневмотранспортной системой для дифференцированного внесения тукосмесей в ресурсосберегающих геоинформационных агротехнологиях точного земледелия работает следующим образом. Определенное количество питательных элементов из трех отсеков бункера 1 при помощи дозатора 2 направляется в основной пневмопровод 4, где пневмопоток, создаваемый вентилятором 3, транспортируется к управляемому разделителю 5 пневмотукопотока первой ступени, который поворотом заслонки 6 производит регулировку объема и перенаправление пневмотукопотока по разделяющимся пневмопроводам 7 первой ступени, после чего процесс продолжается, и заслонкой 8 управляющего разделителя пневмотукопотока второй ступени материал

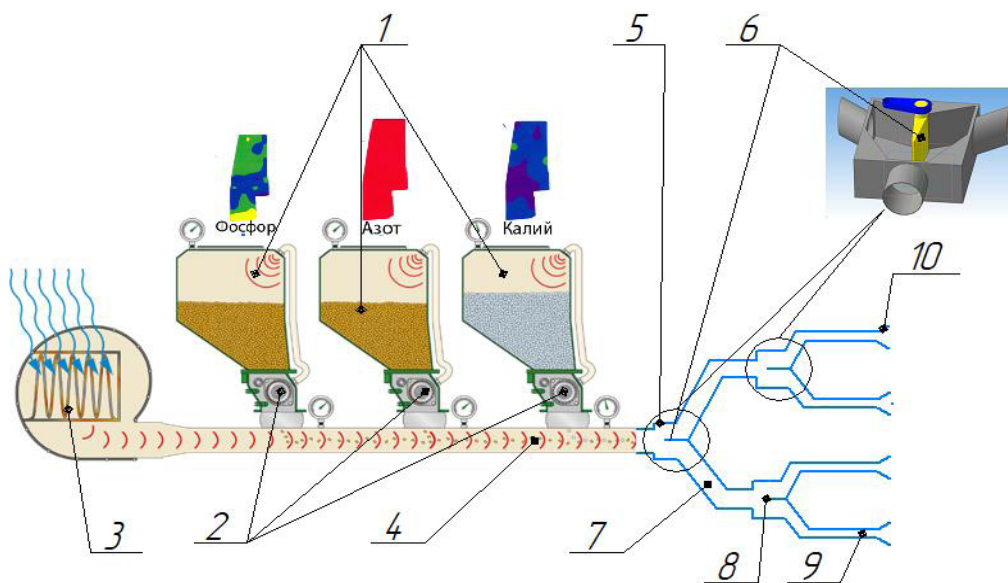


Рис. 2. Схема агрегата штангового типа с пневмотранспортной системой для дифференцированного внесения тукосмесей:

- 1 – отсеки бункера; 2 – дозаторы; 3 – вентилятор; 4 – основной пневмопровод;
5 – управляемый разделитель пневмотукопотока первой ступени; 6 – заслонка;
7 – пневмопровод первой ступени; 8 – управляемый разделитель пневмотукопотока второй ступени;
9 – пневмопровод второй ступени; 10 – распределительные сопла

Fig. 2. Diagram of a boom-type unit with a pneumatic transport system for variable-rate application of fertilizer mixtures:

- 1 – hopper compartments; 2 – dispensers; 3 – fan; 4 – main pneumatic line;
5 – first-stage controlled flow divider of the pneumatic fertilizer; 6 – damper; 7 – first-stage pneumatic line;
8 – second-stage controlled flow divider of the pneumatic fertilizer; 9 – second-stage pneumatic line;
10 – third-stage controlled flow divider of the pneumatic fertilizer; 11 – third-stage pneumatic line; 12 – distribution nozzles

направляется по пневмопроводам 9 второй ступени, где через распределительные сопла 10 тукосмесь разбрасывается по полю (рис. 2).

Несмотря на различия геометрических и аэродинамических параметров однокомпонентных удобрений, происходит их смешивание друг с другом в необходимом количестве и разбрасывание по поверхности поля. Схема принципа работы агрегата при различных вариантах установки заслонки управляемого разделителя пневмотукопотока приведена на рисунке 3.

Вентилятор 3 должен обеспечивать необходимый напор H_6 и производительность Q_6 для надежного транспортирования и распределения материала из дозаторов 2 в основной пневмопровод 4, и далее – через управляемые разделители 6, 8 пневмотукопотока к распределительным соплам 10.

Подача материала в основной пневмопровод через дозаторы, расположенные в бункере, позволяет регулировать норму внесения удобрений и соотношение компонентов в смеси.

Если при выполнении технологической операции рабочая ширина захвата машины изменяется, то при использовании объемного дозатора подача каждого компонента определится выражением:

$$Q_i = f(B_p; q_i; V_m; \rho_i), \quad (1)$$

где B_p – рабочая ширина захвата машины, м; q_i – доза вносимого удобрения, кг/га; V_m – скорость движения машины, м/с; ρ_i – плотность частиц компонента, кг/м³.

При этом

$$\begin{aligned} B_p &= f_1(x; y); \\ q_N &= f_2(x; y); \\ q_P &= f_3(x; y); \\ q_K &= f_4(x; y); \\ V_m &= f_5(t); \\ \rho_i &= f_6(BV; W_y; W_g), \end{aligned} \quad (2)$$

где x, y – координаты учетной площадки (в технологиях off-line) или координаты поля (в технологиях on-line); t – текущее время, с; ВУ – вид удобрений; W_y и W_g – влажность удобрения и воздуха.

Подача материала за единицу времени в основной пневмопровод равна сумме подач компонентов:

$$Q = Q_{iF(N)} + Q_{iF(P)} + Q_{iF(K)}, \quad (3)$$

где $Q_{iF(N)}$, $Q_{iF(P)}$, $Q_{iF(K)}$ – подача азотных, фосфорных, калийных удобрений соответственно, кг/с.

Общий расход материала через распределительные сопла определим по формуле:

$$Q_x = \sum_{i=1}^k q_i, \quad (4)$$

где q_i – производительность i -го распределительного сопла; k – число распределительных сопел.

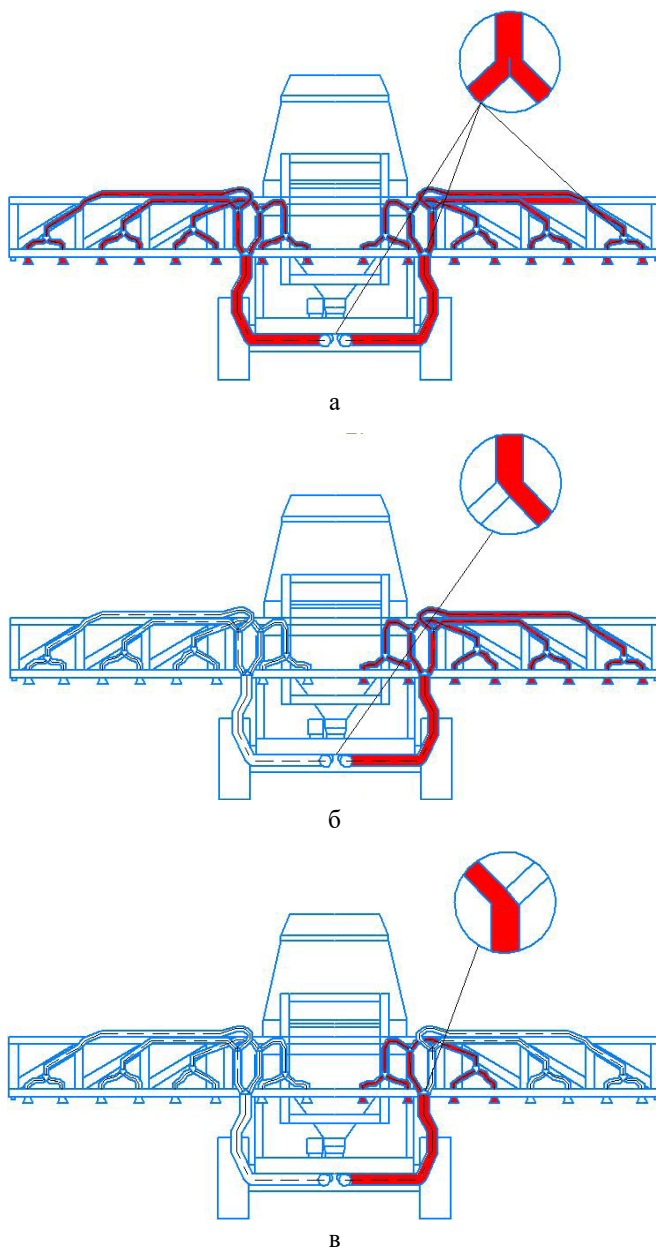


Рис. 3. Схема принципа работы агрегата штангового типа с пневмотранспортной системой для дифференцированного внесения тукосмесей:
а – при установке заслонок управляемых разделителей пневмотукопотоков всех ступеней в среднем положении;
б – при установке заслонки управляемого разделителя пневмотукопотока 1-й ступени в крайнее левое положение;
с – при установке заслонки управляемого разделителя пневмотукопотока 2-й ступени в крайнее правое положение

Fig. 3. Schematic diagram of the operating principle of a boom-type unit with a pneumatic transport system for variable-rate application of fertilizer mixtures:

a – when the dampers of the controlled pneumatic granular flow dividers of all stages are set to the middle position;
b – when the damper of the controlled pneumatic granular flow divider of stage 1 is set to the extreme left position;
c – when the damper of the controlled pneumatic granular flow divider of stage 2 is set to the extreme right position

С другой стороны, подача материала за единицу времени (Q , м³/с), поступающего в основной пневмопровод, должна быть равна:

$$Q = \frac{q_F \cdot V_{\text{маш}} \cdot B_p}{10^4 \cdot \gamma}, \quad (5)$$

где q_F – доза удобрений, вносимая на единицу площади, кг/га; $V_{\text{маш}}$ – скорость движения машины, м/с; B_p – рабочая ширина захвата, м; γ – объемный вес удобрений, кг/м³.

Входящая в выражение (5) доза q_F зависит от вида вносимых удобрений или известковых материалов, способа внесения, природно-климатической зоны и ряда других факторов¹.

Зависимость (5) является исходной для определения геометрических и кинематических параметров смесителя. Из нее следует, что максимальный объем материала нужно находить для нескольких видов удобрений, различающихся не только максимально заданными дозами $q_{F(\max)}$, но и их объемным весом γ [9, 10].

Необходимым условием выполнения технологического процесса дифференцированного внесения минеральных удобрений является обеспечение равенства:

$$Q_x = Q. \quad (6)$$

Подставив в (6) значения входящих величин и решив относительно q_F , получим

¹ Забродин В.П. Механизация процессов адаптивного внесения минеральных удобрений: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Зерноград, 2004. 40 с.

Список источников

1. Shafi U., Mumtaz R., García-Nieto J. et al. Precision agriculture techniques and practices: from considerations to applications. *Sensors*. 2019;19(17):3796. <https://doi.org/10.3390/s19173796>
2. Dhoubhadel S.P. Precision agriculture technologies and farm profitability. *Journal of Agricultural and Resource Economics*. 2021;46(2):256-268. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.303598>
3. Monteiro A., Santos S., Gonçalves P. Precision agriculture for crop and livestock farming – Brief review. *Animals*. 2021;11(8):2345. <https://doi.org/10.3390/ANI11082345>
4. Nowak B. Precision agriculture: Where do we stand? A review of the adoption of precision agriculture technologies on field crops farms in developed countries. *Agricultural Research*. 2021;10:515-522. <https://doi.org/10.1007/s40003-021-00539-x>
5. Ридный С.Д., Кустарников И.А. Тукоsmешивание минеральных удобрений в технологиях точного земледелия // Сборник научных докладов ВИМ. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, 2012. Т. 2. С. 456-463. EDN: PWJNJB
6. Батурин В.А., Личман Г.И. Обоснование параметров пневмосистемы машины для дифференцированного внесения минеральных удобрений // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2011. № 6. С. 26-30. EDN: OUXGZV
7. Кулешов М.С., Макаров В.А. Параметры делителя пневматической машины для внесения твердых минеральных удобрений // Проблемы механизации агрохимического

максимальный расход (q_{\max} , м³/с) распределительного сопла:

$$q_{\max} = \frac{q_{F(\max)} \cdot V_{\text{маш}} \cdot B_p}{10^4 \cdot \gamma \cdot k}, \quad (7)$$

где k – число распределительных сопел, расположенных на штанге.

Выводы

1. Существующие технологии внесения удобрений не позволяют всесторонне реализовать принципы точного земледелия. Разработка агрегата для одновременного дозирования и внесения однокомпонентных минеральных удобрений (тукоsmесей) дифференцированным способом является научно и практически значимой задачей.

2. Предложенная конструкция агрегата штангового типа с пневмотранспортной системой для дифференцированного внесения тукоsmесей с отдельными бункерами и системой индивидуального дозирования позволит ликвидировать проблему сегрегации тукоsmесей при их транспортировке к полю, обеспечит точное соответствие вносимого соотношения N: P: K реальной потребности каждого участка поля, повысит равномерность распределения удобрений по сравнению с центробежными машинами.

3. Разработка агрегата штангового типа с пневмотранспортной системой позволит существенно экономить удобрение и минимизировать негативное воздействие их на окружающую среду.

References

1. Shafi U., Mumtaz R., García-Nieto J. et al. Precision agriculture techniques and practices: from considerations to applications. *Sensors*. 2019;19(17):3796. <https://doi.org/10.3390/s19173796>
2. Dhoubhadel S.P. Precision agriculture technologies and farm profitability. *Journal of Agricultural and Resource Economics*. 2021;46(2):256-268. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.303598>
3. Monteiro A., Santos S., Gonçalves P. Precision agriculture for crop and livestock farming – Brief review. *Animals*. 2021;11(8):2345. <https://doi.org/10.3390/ANI11082345>
4. Nowak B. Precision agriculture: Where do we stand? A review of the adoption of precision agriculture technologies on field crops farms in developed countries. *Agricultural Research*. 2021;10:515-522. <https://doi.org/10.1007/s40003-021-00539-x>
5. Ridny S.D., Kustarnikov I.A. Application of mineral fertilizers in precision farming technologies. *Sbornik nauchnykh dokladov VIM*. Moscow, 2012;2:456-463. (In Russ.)
6. Baturin V.A., Lichman G.I. Rationale for the pneumatic system parameters of a machine for variable-rate application of mineral fertilizers. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2011;6:26-30. (In Russ.)
7. Kuleshov M.S., Makarov V.A. Divider parameters of pneumatic machine for solid mineral fertilizers. *Problemy mekhanizatsii agrokhimicheskogo obsluzhivaniya selskogo khozyaystva*. 2013;5:224-227. (In Russ.)
8. Ridny S.D., Kustarnikov I.A. Unit for variable-rate application of mixtures of solid granular fertilizers. In: *Aktualnye*

обслуживания сельского хозяйства. 2013. № 5. С. 224-227. EDN: HEYRRZ

8. Ридный С.Д., Кустарников И.А. Агрегат для дифференцированного внесения твердых гранулированных тукоосмесей // Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК: Сборник научных статей VII Международной научно-практической конференции в рамках XIX Международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал-2012». Ставрополь: Издательство «Агрус», 2012. С. 257-262. EDN: RAHYER

9. Сиднева И.Е., Курдюмов В.И., Павлушин А.А. Теоретическое обоснование параметров рабочего органа разбрасывателя минеральных удобрений // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 3 (59). С. 6-11. EDN: AIJUQW

10. Богус А.Э. Анализ процесса работы распределительных устройств зерновых пневматических сеялок // Итоги научной исследовательской работы за 2017 год: Сборник статей по материалам 73-й научно-практической конференции преподавателей. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2018. С. 267-268. EDN: YWHOFI

Информация об авторах

¹Ридный Сергей Дмитриевич, канд. техн. наук, доцент; ridnyy@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0009-0004-5187-029X>; SPIN-код: 7235-3952

²Кулаев Егор Владимирович, канд. техн. наук, доцент; bratinsa@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4152-6239>; SPIN-код: 5026-7319

³Грицай Дмитрий Иванович, канд. техн. наук, доцент; gritcay_kirill@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3277-9461>; SPIN-код: 4267-4394

⁴Баганов Николай Анатольевич, канд. техн. наук, доцент; baganov75@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8094-2975>; SPIN-код: 1123-5165

⁵Димитров Анатолий Анатольевич, ассистент; diagryp12@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0001-8321-4180>; SPIN-код: 9721-5036

⁶Мастепаненко Максим Алексеевич, канд. техн. наук, доцент; mma_26@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8684-118X>; SPIN-код: 1676-2740

⁷Арженовский Алексей Григорьевич, д-р техн. наук, профессор; argenowski@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3569-8934>; SPIN-код: 5549-4841

^{1,2,3,4,5,6}Ставропольский государственный аграрный университет; 355017, Российская Федерация, Ставропольский край, г. Ставрополь, Зоотехнический пер., 12

⁷Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

С.Д. Ридный – концептуализация, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
Е.В. Кулаев – формальный анализ;
Д.И. Грицай – создание черновика рукописи;
Н.А. Баганов – методология;
А.А. Димитров – проведение исследований;
М.А. Мастепаненко – руководство исследованиями;
А.Г. Аржановский – администрирование проекта.

Конфликт интересов

Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанного с проведенными исследованиями и публикацией настоящей статьи. Статья поступила 10.10.2025, после рецензирования и доработки 14.11.2025; принята к публикации 18.11.2025

problemy nauchno-tekhnologicheskogo progressa v APK. Proceedings of the VII International scientific and practical conference within the framework of the XIX International agro-industrial exhibition “Agrouniversal – 2012”. 2012:257-262. (In Russ.)

9. Sidneva I.E., Kurdyumov V.I., Pavlushin A.A. Theoretical substantiation of the working body parameters of a mineral fertilizer distributor. *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2022;3:6-11. (In Russ.)

10. Bogus A.E. Analysis of the process of operation of switchgears of grain pneumatic seeders. *Itogi nauchno-issledovatel'skoy raboty za 2017 god: Proceedings of the 73rd Scientific and practical conference of teachers*. Krasnodar, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin. 2018:267-268. (In Russ.)

Authors Information

Sergey D. Ridny¹, CSc (Eng), Associate Professor; ridnyy@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0009-0004-5187-029X>

Egor V. Kulaev², CSc (Eng), Associate Professor; bratinsa@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4152-6239>

Dmitriy I. Gritsay³, CSc (Eng), Associate Professor; gritcay_kirill@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3277-9461>

Nikolay A. Baganov⁴, CSc (Eng), Associate Professor; baganov75@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8094-2975>

Anatoly A. Dimitrov⁵, Assistant Professor; diagryp12@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0001-8321-4180>

Maxim A. Mastepanenko⁶, CSc (Eng), Associate Professor; mma_26@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8684-118X>

Alexey G. Arzhenovskiy⁷, DSc (Eng), Professor; argenowski@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3569-8934>
^{1,2,3,4,5,6}Stavropol State Agrarian University; Zootehnicheskyy Lane 12, Stavropol, Stavropol Krai, Russian Federation

⁷Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Author Contributions

S.D. Ridny – conceptualization, writing – review and editing of the manuscript;
E.V. Kulaev – formal analysis;
D.I. Gritsay – writing – original draft;
N.A. Baganov – methodology;
A.A. Dimitrov – investigation;
M.A. Mastepanenko – research supervision;
A.G. Arzhanovskiy – project administration.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests related to the conducted research and the publication of this article.

Received 10.10.2025; Revised 14.11.2025; Accepted 18.11.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.17:631.147:669-1

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-67-74>

Технология изготовления серебросодержащих мембранных фильтров с бактериостатическими свойствами

И.Б. Опарина¹, А.Ю. Иванников², М.А. Каплан³, М.А. Севостьянов⁴, А.Г. Колмаков⁵^{1,2,3,4,5} Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН; Москва, Россия¹ ibo@imet.ac.ru; <https://orcid.org/0009-0009-6304-5963>² ivannikov-a@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1113-391X>³ i@mkaplan.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8635-0719>⁴ cmakp@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2652-8711>⁵ imetranlab10@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4907-951X>

Аннотация. Серебро (Ag) применяют в сельском хозяйстве при обеззараживании воды, защите растений и животных, при обработке органических отходов. Для изготовления мембранных фильтров с серебром необходимо разработать технологию, обеспечивающую стабильность процесса получения порошка узкого гранулометрического состава. Исследования проведены с целью разработки и апробации технологической цепочки производства мембранных фильтров с включением Ag. Разработана автоматизированная система управления процессом плазменной атомизации, обеспечивающая контроль давления, скорости подачи проволоки, температуры, расхода газа и воды. Представлена функциональная схема управления плазматроном. Из коррозионной стали 316L с 0,2% Ag методом порошковой металлургии при температуре 1000...1200°C получен антибактериальный порошок с размером фракций 160...200 мкм, из которого изготовлен пористый мембранный фильтр. Проведенные испытания «методом дисков» выявили четко выраженную зону ингибирования роста *Pseudomonas spp.* диаметром 10...13 мм, что подтверждает контактный механизм бактериостаза, реализованный за счет введения 0,2% серебра в матрицу стали 316L. В результате исследований созданы фильтры со стабильной и воспроизводимой проницаемостью (в среднем 25,3 мкм²), сочетающие функции механической фильтрации и антимикробной защиты. Разработанная технология открывает перспективу их применения в системах водоочистки для нужд сельского хозяйства и других отраслей. Дальнейшие исследования будут направлены на оценку долговечности бактерицидного действия в реальных эксплуатационных условиях и расширение номенклатуры микроорганизмов.

Ключевые слова: технология изготовления серебросодержащих мембранных фильтров; фильтр; серебро; сталь 316L; система управления процессом плазменной атомизации; схема управления плазматроном; бактериостаз

Финансирование: Госзадание № 075-00319-25-00

Для цитирования: Опарина И.Б., Иванников А.Ю., Каплан М.А., Севостьянов М.А., Колмаков А.Г. Технология изготовления серебросодержащих мембранных фильтров с бактериостатическими свойствами // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 6. С. 67-74. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-67-74>

ORIGINAL ARTICLE

Technology for the production of silver-containing membrane filters with bacteriostatic properties

I.B. Oparina¹, A.Yu. Ivannikov², M.A. Kaplan³, M.A. Sevostyanov⁴, A.G. Kolmakov⁵^{1,2,3,4,5} A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science at the Russian Academy of Sciences; Moscow, Russia

Abstract. Silver (Ag) is used in agriculture for water disinfection, plant and animal protection, and the treatment of organic waste. Producing membrane filters containing silver requires a technology that ensures the stability of obtaining powder with a narrow particle size distribution. The authors conducted the study to develop and test a technological chain for the production of silver-containing membrane filters. The authors have designed an automated control system for the plasma atomization process, ensuring control over pressure, wire feed rate, temperature, gas, and water flow. The article presents a functional diagram for controlling the plasma torch.

An antibacterial powder with a fraction size of 160 to 200 μm was obtained from corrosion-resistant steel 316L with 0.2% Ag using powder metallurgy at a temperature of 1000 to 1200°C, from which a porous membrane filter was fabricated. Tests conducted using the “disk method” revealed a clearly defined zone of inhibition of *Pseudomonas spp.* growth with a diameter of 10 to 13 mm, confirming the contact mechanism of bacteriostasis achieved by introducing 0.2% Ag into the 316L steel matrix. The key research outcome is the production of filters with stable and reproducible permeability (averaging 25.3 μm^2), combining the functions of mechanical filtration and antimicrobial protection. The developed technology opens up prospects for their application in water treatment systems for the needs of agriculture and other industries. Further research will focus on evaluating the durability of the bactericidal action under real operating conditions and expanding the range of tested microorganisms.

Keywords: technology for the production of silver-containing membrane filters; filter; silver; 316L steel; plasma atomization process control system; plasma torch control diagram; bacteriostasis

Funding: State Assignment No. 075-00319-25-00

For citation: Oparina I.B., Ivannikov A.Yu., Kaplan M.A., Sevostyanov M.A., Kolmakov A.G. Technology for the production of silver-containing membrane filters with bacteriostatic properties. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(6):67-74 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-67-74>

Введение

Приоритетным направлением повышения сельскохозяйственных ресурсов в современных условиях становится создание новых материалов, влияющих на показатели урожайности сельскохозяйственных культур, защиты растений, продуктивности животноводства. И вместе с тем обращают на себя внимание материалы, прошедшие многолетние испытания с подтвержденной эффективностью, но представленные в новых формах, полученных с применением инновационных технологий. К таким материалам относится серебро – естественный антисептик с уникальными свойствами.

В растениеводстве серебро (Ag) применяют в качестве естественного антисептика, способного вызывать гибель более 650 видов бактерий [1]. Установлено, что ионная форма серебра подавляет жизнедеятельность различных микробов [2] путем воздействия на белки и ферменты бактерий. Это приводит к сбоям в трансмембранном транспорте, вызывает окислительный стресс и препятствует нормальному метаболизму.

Анализ фитотоксичности, накопления и транспорта различных форм серебра (ионные, наночастицы и объемные) в сое (*Glycine max*) и пшенице (*Triticum aestivum*) [3], показал, что разные формы Ag демонстрируют дифференциальную токсичность. Восходящий транспорт AgNP (20...50 нм) был более существенным по сравнению с объемным Ag (1...3 мкм). Исследователями [4] обнаружено, что композиты с серебром подавляют кольцевую гниль картофеля и оказывают стимулирующее воздействие на картофель *in vitro*.

Подтверждена целесообразность применения в ветеринарии препаратов, содержащих серебро, в профилактических и лечебных целях [4, 5].

Установлено, что выпойка цыплят-бройлеров коллоидным серебром в дозе 1 мл/1 л воды позволила получить высокие зоотехнические показатели. Зарубежные исследователи [6], изучая микроорганизмы в условиях *in vivo* и *in vitro*, выявили снижение инфекционных болезней животных, вызванных золотистым стафилококком и кишечной палочкой. Авторами [7] выявлена способность кластерного серебра концентрацией 50 мкг/мл и выше ингибировать рост тест-культур (*Salmonella typhimurium* ATCC1353, *Salmonella pullorum* ATCC19945, *Staphylococcus aureus* ATCC25923, *Escherichia coli* Б-5, *Proteus vulgaris* ATCC13315, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC27853) в 1,5...2 раза сильнее антибиотиков (амоксациллин, тетрациклин, стрептомицин, левомицетин). Выявлена способность кластерного серебра подавлять развитие бактерий в искусственно контаминированных субстратах на примере куриного помета.

Анализ городских и промышленных сточных вод показал пригодность большинства из них для орошения сельскохозяйственных культур [8]. Для предотвращения отрицательного воздействия на природную среду предлагается ретехнологизация очистных сооружений канализации в соответствии с требованиями орошения кормовых культур и древесных насаждений путем доочистки сточных вод серебросодержащими фильтрами [8].

Серебро можно применять и в мембранных фильтрах. При добавлении серебра в нержавеющую сталь AISI 304 проявляются антибактериальные свойства в отношении кишечной палочки. Антибактериальные испытания проводились в соответствии со спецификацией JIS Z2801:2000 [9].

Исследование микроструктуры и антибактериальных свойств аустенитной стали 316L с добавлением

модифицирующих элементов Ag и Nb (0,06 мас.% Ag и 0,1 мас.% Nb) показало, что ниобий приводит к измельчению зерна 316L и улучшает распределение Ag в матрице [10]. Сталь 316L с серебром обладает высокой антибактериальной активностью, повышает устойчивость к золотистому стафилококку, в то время как избыток серебра склонен к образованию сегрегаций и снижению коррозионной стойкости.

Результаты исследований нержавеющей стали 2205 DSS, легированной серебром, обнаружили бактерицидное действие в отношении *Escherichia coli* (100%) и золотистого стафилококка (99,5%) [11]. Взаимная растворимость серебра и железа незначительна как в твердом, так и в жидком состоянии. После 12-часовой гомогенизационной обработки при температуре 1200°C растворимость серебра в γ -аустенитной и α -ферритной фазах увеличена на 0,10 и 0,09% соответственно.

Установлено, что мембраны, содержащие на своей поверхности нерастворимые соли серебра в количестве 5,11...9,06 масс.% и размером частиц 0,1...5 мкм, полностью обеззараживают воду в динамических условиях [12] без значительного снижения удельной производительности мембран. Наиболее равномерное распределение серебра по всей поверхности мембраны и максимальное содержание достигаются при обработке мембраны раствором AgNO_3 .

Таким образом, анализ литературы подтверждает стратегическую значимость серебра для решения ключевых задач АПК, связанных с обеззараживанием воды, защитой растений и животных, а также обработкой органических отходов. Для развития этого направления требуется разработка технологической цепочки получения антибактериальных фильтров.

Цель исследований: разработка автоматизированной системы управления установки плазменной атомизации для получения порошка коррозионностойкой стали с серебром со стабильными физико-механическими характеристиками и создание мембранного фильтра из полученного порошка для очистки воды в АПК.

Материалы и методы

На основе анализа данных литературы выбрана коррозионностойкая сталь 316L (03X17H10M2), легированная 0,2% Ag. Выплавленные слитки (316L + 0,2% Ag) подвергли прокатке, ротационной ковке и волочению, термообработке и полировке. Поэтапная обработка и характеристики полученной проволоки описаны в работе [13].

Исследования проведены в ИМЕТ РАН на установке плазменной атомизации [14]. Подаваемая в плазменную струю проволока нагревалась

до температуры плавления материала. Распыление проволоки проводили в газоплотной камере, состоящей из корпуса, системы подачи плазмообразующего газа, охлаждающей системы и катода с катододержателем.

Перед началом работы выполняли проверку положения газовых клапанов, регулирующих подачу и отвод рабочих газов из камеры. Клапаны должны находиться в закрытом положении. Для предотвращения вероятности окисления получаемого порошка производилась откачка атмосферных газов из камеры вакуумным насосом. При достижении в камере остаточного давления 10 Па подается дискретный сигнал от регулятора 2TRM1 на отключение насоса. Измерение остаточного и избыточного давления обеспечивает датчик ПД100И.

Для создания защитной атмосферы через регулируемый клапан происходит заполнение рабочей камеры инертным газом – аргоном. При достижении в камере давления 90 кПа с датчика ПД100И подается дискретный сигнал на закрытие клапана и замыкание контактора источника питания Incut200HA плазмотрона. Расход газа определяется цифровыми индикаторами расхода (PFMC7102).

Протекающие газоразрядные процессы в камере способствуют сильному разогреву пространства до температур 100...150°C. Для предотвращения перегрева камеры применяется система охлаждения. Вода поступает в рубашку охлаждения через регулируемый клапан. На патрубке подачи и отвода воды расходомер фиксирует ее расход и температуру (датчик ДТС3044). Эти параметры необходимы для оценки рассеиваемой в камере энергии, а также для определения засорения рубашки охлаждения. Засорение начинает проявляться при снижении расхода отводимой воды.

Для поджига дежурной дуги подается питание (40 А, 100 В) на гафниевый катод и промежуточную вставку. Газ разогревается дугой и ионизируется. Одновременно включается двигатель, который подает проволоку под срез плазмотрона. Промежуточная вставка отключается из цепи, и анодный потенциал переключается на проволоку. Анодная привязка электрической дуги к концу проволоки интенсифицирует процесс плавления материала.

В зависимости от материала и диаметра проволоки устанавливается скорость ее движения. Скорость подачи проволоки контролирует тахометр ТХ01-RS. Для управления электродвигателем (мощностью до 1,5 кВт) установлен преобразователь частоты ПЧВ3. Для предотвращения аварии при возникновении нештатной ситуации – например, при прекращении подачи проволоки по какой-либо

причине (обрыве, заломе), срабатывает светосигнальная колонна МТ45, которая подключена ко второму выходу ТХ01-RS.

Электрическая дуга приводит к перегреву свободного конца проволоки и его оплавлению. Газовый поток уносит образующийся жидкий металл, дробит его. Под действием поверхностного натяжения капли приобретают сферическую форму. Интенсивный теплообмен перегретого расплава с инертной атмосферой приводит к затвердеванию частиц, которые попадают в циклон и скапливаются в бункере-накопителе. Выгрузка порошка из бункера осуществляется в ручном режиме для его рассева и отбора целевой фракции.

Для стабильной работы установки заменили систему управления на основе релейной логики на современную систему с возможностью контроля процесса и оперативного редактирования уставок для корректировки технологического процесса.

Для аттестации сферического порошка использовали стандартные приборы и методы. Исследование морфологии порошка коррозионной стали, легированной серебром, анализ микроструктуры выполняли на сканирующем растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM-IT500, оснащенном системой энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY. Исследования проводили в режиме вторичных электронов. При выполнении электро-микроскопических исследований образцы фиксировались на подложке с использованием токопроводящего углеродного клея (чтобы порошок в процессе откачки вакуума не разлетался).

Гранулометрический анализ проводили на приборе Analysette 22 NanoТес с использованием метода лазерной дифракции.

Мембранные фильтры с заданной пористостью изготовили методом порошковой металлургии [15]. При этом использовали свободную засыпку с последующим спеканием при температуре 1000...1200°C. Для получения достаточной проницаемости использовали полученные сферические порошки крупной фракции (160...200 мкм). Проницаемость полученных образцов исследовалась путем пропускания через них воды.

Антибактериальную активность фильтра оценивали стандартным методом диффузии в агар (метод дисков). На поверхность питательного агара в чашках Петри наносили суспензию тест-культуры *Pseudomonas spp.* плотностью 1×10^9 КОЕ/мл, равномерно распределяя ее для получения сплошного газона. Избыток суспензии удаляли аспирацией. Чашки выдерживали при комнатной температуре в течение 30-40 мин для подсыхания поверхности агара.

Испытуемый кусочек фильтра накладывали на засеянную поверхность агара в центре чашки, обеспечивая плотный контакт по всей площади. Инкубацию проводили при температуре 37°C в течение 18-24 ч.

Результаты и их обсуждение

Разработанная автоматизированная система обеспечивает управление основными функциями: включение/выключение насоса; управление клапаном подачи газа; подача проволоки и сигнализация обрыва или прекращения подачи; управление водяным клапаном, запуск расходомера.

Управление процессом плазменного распыления обеспечивает система, включающая в себя средства автоматизации ОВЕН: регулятор ТХ01-RS; два регулятора 2ТРМ1; преобразователь частоты ПЧВ3; датчик температуры ДТС3044; датчик давления ПД100И; светосигнальная колонна.

Функциональная схема установки с автоматизированной системой управления показана на рисунке 1.

Для измерения, регистрации и автоматического регулирования температуры и давления (воды и газа) в системе установлены два двухканальных цифровых регулятора 2ТРМ1 (рис. 2). Регулятор осуществляет как независимое управление по двум каналам, так и совместную работу каналов. В задачах регулирования и сигнализации второй вход обеспечивает регулировку по двум величинам с вычислением среднего значения. Поскольку регулятор работает с разными типами датчиков, то на одном приборе можно контролировать две физические величины (в нашем случае это температура и давление). Измеряемые и настраиваемые параметры могут передаваться по интерфейсу RS-485 на ПК.

Тахометр с ПЧВ (рис. 3) выполняет регулировку скорости подачи проволоки. При нештатной ситуации (например, при обрыве проволоки) срабатывает звуковая сигнализация. Выходным элементом служит электромагнитное реле (4...20 мА, 0...10 В). При необходимости прибор соединяется с ПК по интерфейсу RS-485 (Modbus RTU/ASCII).

Разработанная система управления процессом плазменной атомизации в автоматическом режиме обеспечивает высокую точность управления. Это позволяет получать однородный порошок со стабильными характеристиками требуемого размера, формы и распределения, что является критически важным для применения в аддитивных технологиях. В случае нештатной ситуации, например, прекращения подачи проволоки вследствие ее обрыва или замятия, перегрева оборудования и т.п., система автоматически активирует звуковой сигнал и отключает подачу питания.

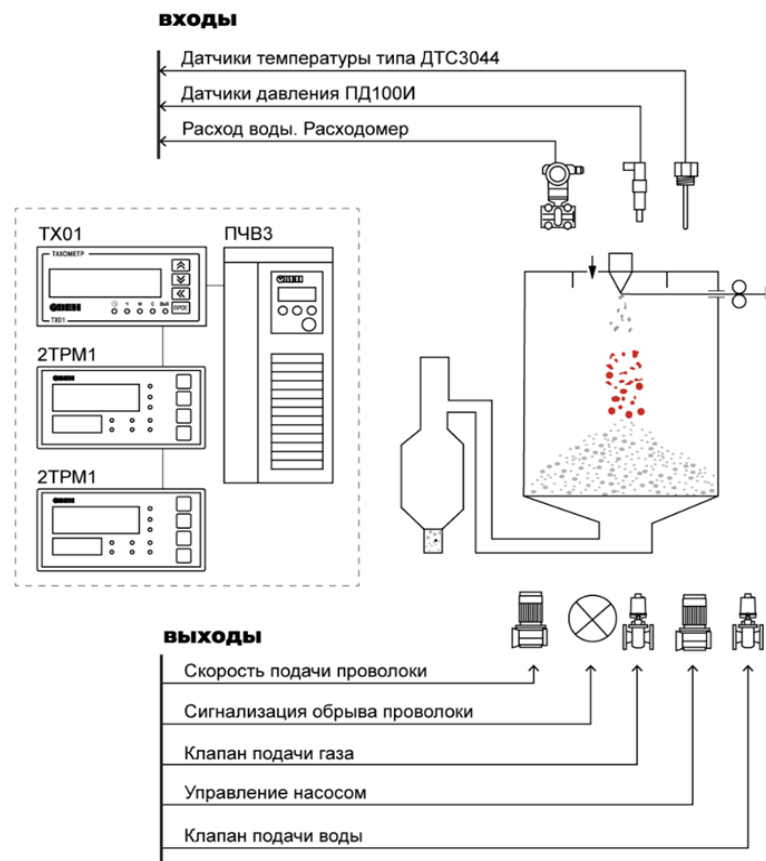


Рис. 1. Функциональная схема управления плазмотроном

Fig. 1. Functional diagram of plasma torch control

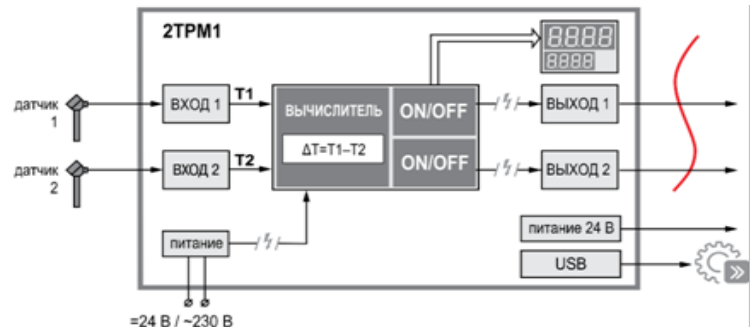


Рис. 2. Функционал регулятора 2TRM1

Fig. 2. Functional diagram of the 2TRM1 controller

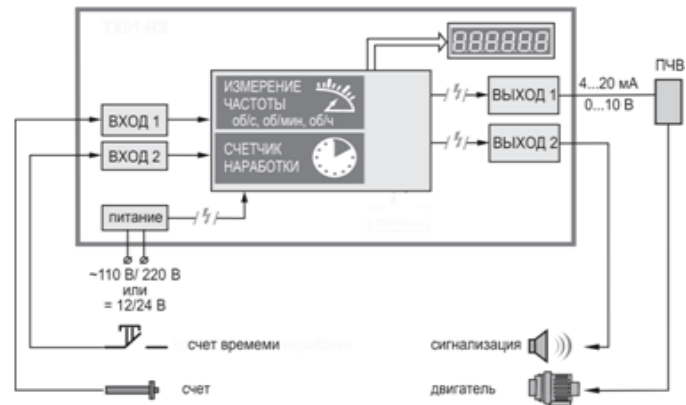


Рис. 3. Функционал тахометра TX01-RS с ПЧВ

Fig. 3. Functionality of the TH01-RS tachometer with PMV

Морфологию поверхности порошков изучали с помощью растрового электронного микроскопа с высоким разрешением (рис. 4). Анализ полученных порошков показал, что частицы стали 316L, легированной серебром, обладают высокой степенью сферичности и однородности. Обнаружено, что поверхность порошка в отдельных случаях имеет дендритную структуру, но в целом не было выявлено каких-либо значимых видимых поверхностных дефектов – кратеров и сателлитов.

Согласно представленным данным (табл.), полученным в результате фракционного анализа, медианный размер частиц (D50) составил 115,86 мкм, при этом 80% частиц имеют размер менее 157,46 мкм, а 90% – менее 179,25 мкм. Преобладание частиц размером около 160 мкм делает данный порошок перспективным для получения высокоэффективных мембранных фильтров.

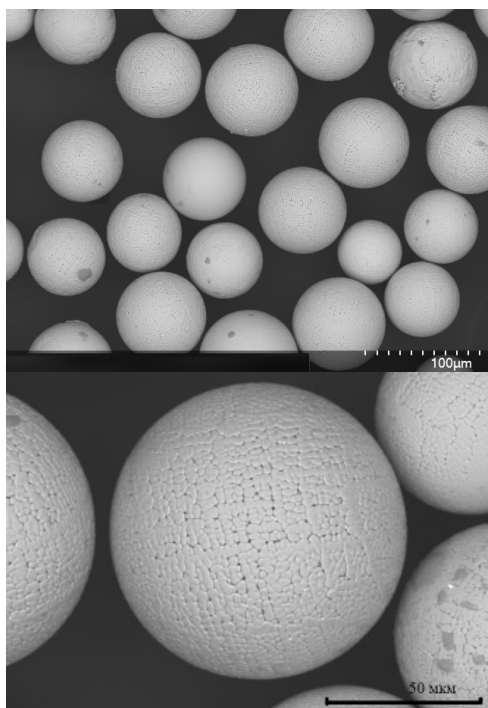


Рис. 4. Фото частиц порошка коррозионной стали 316L с 0,2% Ag, полученное с помощью микроскопа JEOL JSM-IT500

Fig. 4. Photo image of powder particles of 316L corrosive steel with 0.2% Ag obtained using a JEOL JSM-IT500 microscope

Фильтры с заданной пористостью изготовили методом порошковой металлургии (рис. 5). Измеренная проницаемость 9 образцов составила 25,1...25,5 мкм². Практически одинаковое значение проницаемости в исследуемых образцах позволяет сделать вывод о сопоставимых размерах как частиц порошка, так и диаметров пор.

Результаты исследования фильтра подтвердили выраженную антибактериальную активность в отношении тест-штамма *Pseudomonas spp.* Ввиду возможной неравномерности роста бактериальной культуры после инкубации измеряли диаметр зоны задержки роста (зону ингибирования) в разных направлениях. Оценка антибактериальной активности методом диффузии в агар показала, что вокруг фильтра сформировалась четкая стерильная зона ингибирования роста бактерий. Средний диаметр зоны составил 10...13 мм. Полученный мембранный фильтр продемонстрировал совокупность функций механического улавливания частиц и антибактериального действия.

Таким образом, проведенная работа вносит значимый вклад в развитие ресурсосберегающих и экологически безопасных технологий для АПК. Полученные результаты подтверждают целесообразность масштабирования процесса и разработки промышленных прототипов фильтров для водообеспечения животноводства, рециркуляции оросительных вод и защиты от фитопатогенов. Дальнейшие исследования будут направлены на оценку долговечности бактерицидного действия в реальных эксплуатационных условиях и расширение номенклатуры микроорганизмов.

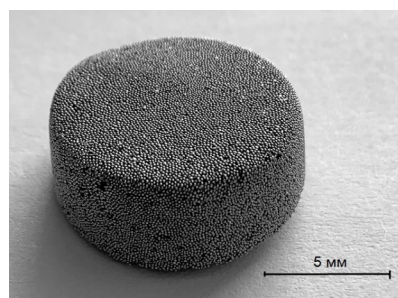


Рис. 5. Мембранный фильтр из сферических порошков
Fig. 5. Membrane filter made of spherical powders

Распределение частиц порошка стали 316L с 0,2% Ag по размерам

Таблица

Particle size distribution of 316L steel powder with 0.2% Ag

Table

Параметр	Содержание фракции, %								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Размер частиц, мкм	54,63	74,14	89,62	103,21	115,86	128,35	141,73	157,46	179,25

Выводы

1. Созданная система управления плазмотроном, обеспечившая замену устаревшей системы управления на основе релейной логики на современную систему с возможностью управления процессом в автоматическом режиме и оперативного редактирования уставок, гарантирует стабильность процесса (контроль давления, скорости подачи проволоки, температуры, расхода газа/воды,) и получение однородного порошка узкого гранулометрического состава.

2. Проведенные исследования подтвердили повышение стабильности процесса получения методом плазменной атомизации сферических порошков коррозионностойкой стали 316L с 0,2 мас.% Ag с воспроизводимыми морфологическими характеристиками и выраженной антибактериальной активностью.

3. Пористые мембранные фильтры с однородной поровой структурой и проницаемостью, изготовленные

методом свободной засыпки и спекания (1000...1200°C) порошков крупной фракции (160...200 мкм), пригодны для микрофильтрационных процессов. Независимо от температуры спекания все образцы продемонстрировали одинаковую проницаемость (в среднем 25,3 мкм²), что указывает на воспроизводимость структуры фильтрующего материала.

4. Испытания «методом дисков» показали четко выраженную зону ингибирования роста *Pseudomonas spp.* диаметром 10...13 мм, подтверждая контактный механизм бактериостаза, реализованный за счет серебра в матрице фильтра.

5. Разработанные серебросодержащие мембранные фильтры сочетают механическую фильтрацию и антимикробную защиту. Их применение в сельском хозяйстве направлено на повышение продуктивности, снижение зависимости от антибиотиков и улучшение экологической безопасности.

Список источников

1. Фастовец И.А., Верховцева Н.В., Пашкевич Е.Б. и др. Наночастицы серебра: токсическое действие на микроорганизмы и взаимодействие с высшими растениями // Проблемы агрохимии и экологии. 2017. № 1. С. 51-62. EDN: YUIBX
2. Yamanaka M., Hara K., Kudo J. Bactericidal actions of a silver ion solution on *Escherichia coli*, studied by energy-filtering transmission electron microscopy and proteomic analysis. *Applied and environmental microbiology*. 2005;71(11):7589-7593. <https://doi.org/10.1128/AEM.71.11.7589-7593.2005>
3. Quah B., Musante C., White J.C. et al. Phytotoxicity, uptake, and accumulation of silver with different particle sizes and chemical forms. *Journal of Nanoparticle Research*. 2015;17:1-13. <https://doi.org/10.1007/s11051-015-3079-1>
4. Перфильева А.И., Граскова И.А., Ножкина О.А. и др. Актуальные аспекты применения химически синтезированных соединений наночастиц серебра в животноводстве и агрохимии // Российские нанотехнологии. 2019. Т. 14, № 9-10. С. 85-93. <https://doi.org/10.21517/1992-7223-2019-9-10-85-93>
5. Егоров И.А., Егорова Т.В., Жеухин И.А. и др. Коллоидное серебро при выращивании цыплят-бройлеров // Птицеводство. 2013. № 4. С. 17-20. EDN: QAXDZR
6. Jung W.K., Koo H.C., Kim K.W. et al. Antibacterial activity and mechanism of action of the silver ion in *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. *Applied and environmental microbiology*. 2008;74(7):2171-2178. <https://doi.org/10.1128/AEM.02001-07>
7. Пискаева А.И., Дышлюк Л.С., Сидорин Ю.Ю. Влияние кластерного серебра на патогенную микрофлору органических отходов агропромышленного комплекса // Техника и технология пищевых производств. 2016. Т. 41, № 2. С. 132-140. EDN: WCLBTT
8. Умбетова Ш., Утегулов Н., Олжабаева А. и др. Актуальность доочистки сточных вод для орошения кормовых культур и древесных насаждений // *Izdenister Natigeler*. 2024. Т. 1, № 101. С. 166-182. <https://doi.org/10.37884/1-2024/17>
9. Liao K.H., Ou K.L., Cheng H.C. et al. Effect of silver on antibacterial properties of stainless steel. *Applied surface science*. 2010;256(11):3642-3646 <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.01.001>
10. Junping Y., Wei L. Antibacterial 316L stainless steel containing silver and niobium. *Rare Metal*

References

1. Fastovets I.A., Verkhovtseva N.V., Pashkevich E.B. et al. Silver nanoparticles: toxic effect on exposure and interaction with higher plants. *Agrochemistry and Ecology Problems*. 2017;1:51-62. (In Russ.)
2. Yamanaka M., Hara K., Kudo J. Bactericidal actions of a silver ion solution on *Escherichia coli*, studied by energy-filtering transmission electron microscopy and proteomic analysis. *Applied and Environmental Microbiology*. 2005;71(11):7589-7593. <https://doi.org/10.1128/AEM.71.11.7589-7593.2005>
3. Quah B., Musante C., White J.C. et al. Phytotoxicity, uptake, and accumulation of silver with different particle sizes and chemical forms. *Journal of Nanoparticle Research*. 2015;17:1-13. <https://doi.org/10.1007/s11051-015-3079-1>
4. Perfilieva A.I., Graskova I.A., Nozhkina O.A. et al. Current aspects of the use of chemically synthesized compounds of silver nanoparticles in animal husbandry and agrochemistry. *Russian Nanotechnologies*. 2019;14(9-10):85-93. (In Russ.) <https://doi.org/10.21517/1992-7223-2019-9-10-85-93>
5. Egorov I.A., Egorova T.V., Zheukhin I.A. et al. Colloidal silver in growing broiler chickens. *Ptitsevodstvo*. 2013;4:17-20. (In Russ.)
6. Jung W.K., Koo H.C., Kim K.W. et al. Antibacterial activity and mechanism of action of the silver ion in *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. *Applied and Environmental Microbiology*. 2008;74(7):2171-2178. <https://doi.org/10.1128/AEM.02001-07>
7. Piskaeva A.I., Dyshlyuk L.S., Sidorin Yu.Yu. Cluster silver influence on pathogenic microflora of agro-industrial organic waste. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2016;41(2):132-140. (In Russ.)
8. Umbetova S., Utegulov N., Olzhabayeva A. et al. Relevance of wastewater termination for irrigation of forage crops and wood plantings. *Izdenister Natigeler*. 2024;1(101):166-182. (In Russ.) <https://doi.org/10.37884/1-2024/17>
9. Liao K.H., Ou K.L., Cheng H.C. et al. Effect of silver on antibacterial properties of stainless steel. *Applied Surface Science*. 2010;256(11):3642-3646. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.01.001>
10. Junping Y., Wei L. Antibacterial 316L stainless steel containing silver and niobium. *Rare Metal*

Materials and Engineering. 2013;42(10):2004-2008. [https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(14\)60015-1](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(14)60015-1)

11. Yang S.M., Chen Y.C., Pan Y.T. et al. Effect of silver on microstructure and antibacterial property of 2205 duplex stainless steel. *Materials Science and Engineering: C*. 2016;63:376-383. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.03.014>

12. Фазуллин Д.Д., Маврин Г.В. Антибактериальные свойства микрофильтрационных мембран, модифицированных нитратом серебра // Мембраны и мембранные технологии. 2019. Т. 9, № 1. С. 47-53. <https://doi.org/10.1134/S2218117218060056>

13. Горбенко А.Д., Каплан М.А., Конушкин С.В. и др. Влияние серебра и термической обработки на свойства проволоки из аустенитной стали 03Х17Н10М2 // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2023. Т. 66, № 5. С. 544-553. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-544-553>

14. Устройство для получения металлического порошка: Патент RU2749403 C1 / М.А. Севостьянов К.В. Сергиенко, А.С. Баикин и др.; заявка № 2020126240 от 06.08.2020; Опубл. 06.09.2021. EDN: CAXVBO

15. Зеленский В.А., Трегубова И.В., Анкудинов А.Б. и др. Получение пористого материала из порошков серебра // Ученые записки Забайкальского государственного университета. Серия «Физика, математика, техника, технология». 2013. № 3 (50). С. 35-42. EDN: QATXYI

Информация об авторах

¹ Опарина Ирина Борисовна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; ibo@imet.ac.ru; <https://orcid.org/0009-0009-6304-5963>; SPIN-код: 8934-8040; AuthorID: 5882; Scopus ID: 6603910409

² Иванников Александр Юрьевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; ivannikov-a@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1113-391X>; SPIN-код: 1922-6821; AuthorID: 603094

³ Каплан Михаил Александрович, канд. техн. наук, научный сотрудник; i@mkaplan.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8635-0719>; SPIN-код: 3258-5844, AuthorID: 914777

⁴ Севостьянов Михаил Анатольевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; cmakp@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2652-8711>; SPIN код: 3786-0419; AuthorID: 151400

⁵ Колмаков Алексей Георгиевич, чл.- корр. РАН, д-р техн. наук; imetranlab10@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4907-951X>; SPIN код: 5869-3830; AuthorID: 16564

^{1,2,3,4,5} Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН; 119334, г. Москва, Ленинский проспект, 49

Вклад авторов

И.Б. Опарина – разработка системы автоматизации, подготовка черновика статьи: план, описание, доработка материала; А.Ю. Иванников – разработка установки плазменной атомизации, отработка технологии получения порошков; М.А. Каплан – анализ полученных порошков, проведение испытаний на бактериостатичность мембранного фильтра; М.А. Севостьянов – формальный анализ; А.Г. Колмаков – концептуализация.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 01.08.2025, после рецензирования и доработки 15.12.2025; принята к публикации 17.12.2025

Materials and Engineering. 2013;42(10):2004-2008. [https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(14\)60015-1](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(14)60015-1)

11. Yang S.M., Chen Y.C., Pan Y.T., et al. Effect of silver on microstructure and antibacterial property of 2205 duplex stainless steel. *Materials Science and Engineering: C*. 2016;63:376-383. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.03.014>

12. Fazullin D.D., Mavrin G.V. Antibacterial properties of microfiltration membranes modified by silver nitrate. *Membrany i membrannye tehnologii*. 2019;9(1):47-53. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S2218117218060056>

13. Gorbenko A.D., Kaplan M.A., Konushkin S.V., et al. Effect of silver and heat treatment on properties of 03Kh17N10M2 austenitic steel wire. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(5):544-553. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-544-553>

14. Sevostyanov M.A., Sergienko K.V., Baikin A.S., et al. Device for producing metal powder: Patent of the Russian Federation, No. 2749403;2021.

15. Zelensky V.A., Tregubova I.V., Ankudinov A.B., et al. Production of porous material from silver powders. *Scholarly Notes of Transbaikal State University. Series: Physics, Mathematics, Engineering, Technology*. 2013;3(50):35-42. (In Russ.)

Author Information

Irina B. Oparina¹, CSc (Eng), Senior Researcher; ibo@imet.ac.ru; <https://orcid.org/0009-0009-6304-5963>; Scopus ID: 6603910409

Aleksandr Yu. Ivannikov², CSc (Eng), Senior Researcher; ivannikov-a@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1113-391X>

Mikhail A. Kaplan³, CSc (Eng), Research Engineer; i@mkaplan.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8635-0719>

Mikhail A. Sevostyanov⁴, CSc (Eng), Lead Research Engineer; cmakp@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2652-8711>

Aleksei G. Kolmakov⁵, RAS Corresponding Member, DSc (Eng), imetranlab10@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4907-951X>

^{1,2,3,4,5} A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science at the Russian Academy of Sciences; 119334, Moscow, Leninskiy Prospekt, 49

Author Contributions

I.B. Oparina – investigation, writing – original draft, review and editing of the manuscript;

A.Y. Ivannikov – investigation, formal analysis, data curation; validation;

M.A. Kaplan – formal analysis, investigation; validation;

M.A. Sevostyanov – formal analysis;

A.G. Kolmakov – conceptualization.

Conflict of interests

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

Received 01.08.2025; Revised 15.12.2025; Accepted 17.12.2025

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.815

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-75-81>

Оценка качества процесса обработки опорных шеек распредвалов под ремонтный размер с помощью статистических инструментов контроля

О.А. Леонов¹, Г.Н. Темасова², П.В. Голиницкий³, И.Н. Кравченко⁴, А.Н. Самордин⁵^{1, 2, 3, 4, 5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ oaleonov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>² temasova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0555-2758>³ gpv@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7303-1658>⁴ kravchenko-in71@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>⁵ asamordin@rgau-msha.ru

Аннотация. Качественный ремонт и регулярное обслуживание распределительного вала обеспечивают надежную и эффективную работу двигателя. Качество восстановленных деталей зависит от прецизионной механической обработки. Исследования проведены с целью оценки качества настройки оборудования при выполнении операции обработки под ремонтный размер опорных шеек распределительного вала двигателя ЯМЗ-236. Для оценки качества процесса восстановления распредвала применены контрольные листки, контрольные карты Шухарта и гистограмма. Диаметры 20 опорных шеек распредвалов до ремонта и после него в двух сечениях и в двух взаимно перпендикулярных плоскостях определяли рычажной скобой СР-75. Контрольные листки позволили собрать и обработать первичную информацию для статистического анализа процесса ремонта распределительных валов двигателей ЯМЗ-236. Анализ контрольных карт показал, что вариации размахов внутри валов и между ними обусловлены случайными причинами. Это указывает на стабильность и управляемость технологического процесса. Гистограмма позволила оценить вероятность возникновения исправимого брака менее 0,5%, а неисправимого брака – 0%. Рассчитанный индекс воспроизводимости 1,66 свидетельствует о соответствии технологического процесса требованиям. Качество настройки станка для обработки опорных шеек соответствует требованиям. Гипотеза о поддержании качества процесса обработки регулярным применением статистических методов контроля подтверждена.

Ключевые слова: ремонт; распределительный вал; опорные шейки; качество; брак; контрольный листок; контрольная карта; гистограмма

Для цитирования: Леонов О.А., Темасова Г.Н., Голиницкий П.В., Кравченко И.Н., Самордин А.Н. Оценка качества процесса обработки опорных шеек распредвалов под ремонтный размер с помощью статистических инструментов контроля // *Агроинженерия*. 2025. Т. 27, № 6. С. 75-81. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-75-81>

ORIGINAL ARTICLE

Quality assessment of machining the main bearings journals of camshafts to oversize dimensions using statistical process control tools

O.A. Leonov¹, G.N. Temasova², P.V. Golinitzkiy³, I.N. Kravchenko⁴, A.N. Samordin⁵^{1,2,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ oaleonov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>² temasova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0555-2758>³ gpv@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7303-1658>⁴ kravchenko-in71@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>⁵ asamordin@rgau-msha.ru

Abstract. High-quality repair and regular maintenance of the camshaft ensure reliable and efficient engine operation. The quality of restored parts depends on precision machining. The research aimed to evaluate the quality of equipment settings to machine the main bearing journals of the YaMZ-236 engine camshaft to oversize dimensions. To assess

the quality of the camshaft restoration process, the authors applied control sheets, Shewhart control charts, and a histogram. The diameters of 20 camshaft bearing journals, both before and after repair, were determined in two cross-sections and in two mutually perpendicular planes using an SR-75 lever gauge. The check sheets allowed for the collection and processing of primary data for the statistical analysis of the repair of the YaMZ-236 engine camshaft. Analysis of the control charts showed that the variations in ranges (spreads) within and between the shafts are due to random causes. This indicates the stability and controllability of the technological process. The histogram allowed for the estimation of the probability of repairable defects at less than 0.5%, and irreparable defects (scrap) at 0%. The calculated reproducibility index of 1.66 shows that the technological process complies with the requirements. The quality of the machine settings for machining the bearing journals complies with the requirements. The study has confirmed a hypothesis regarding maintaining the machining quality through the regular application of statistical control methods.

Keywords: agricultural machinery repair; camshaft; main bearing journals; process quality; defects; checklist; control chart; histogram

For citation: Leonov O.A., Temasova G.N., Golinitzkiy P.V., Kravchenko I.N., Samordin A.N. Quality assessment of machining the main bearings journals of camshafts to oversize dimensions using statistical process control tools. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(6):75-81 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-75-81>

Введение

Обеспечение высокого качества выпускаемой продукции и оказываемых услуг невозможно без использования различных статистических методов. Статистическое регулирование качества процесса ремонта сельскохозяйственной техники обеспечивает повышение эффективности ремонтных работ и снижение количества возникающих дефектов [1-4]. Данный метод основан на применении статистических подходов для анализа вариаций параметров, влияющих на качество ремонтируемых узлов и агрегатов, позволяя своевременно обнаруживать и устранять причины отклонений [5-7].

Статистическое регулирование технологических процессов не должно рассматриваться как изолированная задача или отдельный элемент управления производством [8]. Это лишь один из элементов системы менеджмента качества предприятия, направленный на поддержание и улучшение производственных процессов посредством систематического сбора, анализа и интерпретации данных.

Представление данных в виде графиков, таблиц и отчетов делает информацию доступной и понятной руководителям всех уровней. Однако визуализация сама по себе недостаточна – необходимы механизмы обратной связи и реакция на выявленные проблемы.

Статистическое регулирование не может существовать отдельно от остальных функций управления предприятием. Его успех зависит от интеграции с общей стратегией улучшения качества, правильной постановки целей, эффективного взаимодействия подразделений и постоянного обучения персонала. Только комплексный подход позволит эффективно решать задачи обеспечения высокого качества продукции и минимизировать затраты на устранение дефектов.

Распределительный вал играет ключевую роль в работе двигателя внутреннего сгорания [9]: управляя открытием и закрытием клапанов цилиндров, он обеспечивает своевременную подачу топливно-воздушной смеси и удаление отработавших газов. Правильная работа распределительного вала напрямую влияет на мощность, экономичность и долговечность двигателя. Повреждения или неисправности распределительного вала приводят к сбоям в работе двигателя, потере мощности, увеличенному расходу топлива и даже к выходу двигателя из строя. Следовательно, качественный ремонт и регулярное обслуживание распределительного вала являются обязательными условиями надежной и эффективной работы любого двигателя. Можно ожидать, что регулярное применение статистических методов контроля позволит оценить качество процесса обработки деталей и соответствие технологического процесса и оборудования требованиям точности.

Цель исследований: оценка качества настройки оборудования для восстановления опорных шеек распределительного вала до ремонтных размеров.

Материалы и методы

Объект исследований – процесс обработки опорных шеек распредвала двигателя ЯМЗ-236 при ремонте.

Предмет исследований – классические инструменты контроля качества применительно к анализу процесса обработки опорных шеек распредвала.

Во время работы двигателя на распределительный вал действуют силы трения, вибрация, знакопеременные скручивающие и изгибающие моменты, среда. В результате опорные шейки изнашиваются, и возникают отказы газораспределительного механизма (рис. 1) [10].

Износ опорных шеек устраняют обработкой под ремонтные размеры.

В процессе исследований измеряли диаметры опорных шеек распределительных валов двигателей ЯМЗ-236. Измерения каждой шейки производили в сечениях I-I и II-II и в двух взаимно перпендикулярных плоскостях А-А и Б-Б (рис. 2).

В большинстве случаев морально и физически устаревшее металлорежущее технологическое оборудование ремонтных предприятий имеет пониженную точность, что отражается на качестве обработки поверхностей [11].

Ввод в производственный процесс ремонтных предприятий операций контроля и грамотная обработка полученных статистических данных позволяют существенно повысить качество отремонтированных сборочных единиц [12, 13, 14]. Такой контроль подразумевает регулярные проверки и калибровку оборудования для обеспечения высокой точности и качества выполнения ремонтных работ. Правильная настройка и контроль за процессами восстановления распределительного вала могут существенно повысить его эксплуатационные характеристики и срок службы.

Статистическое управление технологическим процессом восстановления распределительного вала позволяет своевременно обнаружить вариабельность и вмешаться в систему.

Для проведения статистического анализа качества процесса ремонта распределительного вала замеры диаметры опорных шеек до ремонта и после него; объем выборки составил 20 шт. Номинальный размер опорных шеек распределительного вала двигателя ЯМЗ-236 – $54_{-0,105}^{+0,065}$ мм. Предельно допустимый

размер без ремонта – 53,88 мм. При превышении значения предельного размера опорные шейки обрабатывают под категорийный ремонтный размер. Ремонтные размеры опорных шеек распределительного вала должны соответствовать ремонтным размерам отверстий втулок, запрессованных в блок цилиндров.

Ремонтные размеры:

1-й ремонтный размер – $53,7_{-0,105}^{+0,065}$ мм;

2-й ремонтный размер – $53,4_{-0,105}^{+0,065}$ мм.

В ходе контроля диаметров опорных шеек распределительного вала двигателя ЯМЗ-236 применяли рычажную скобу СР-75 с точностью 0,001 мм и погрешностью измерений $\pm 0,001$ мм.

Выбор инструмента статистического анализа качества процесса зависит от специфики конкретного процесса, целей анализа и имеющихся ресурсов. Комбинация нескольких методов позволяет достичь наилучших результатов в повышении качества и эффективности производства.

Для оценки качества технологического процесса и статистического анализа полученных данных применили комплекс инструментов:

1. Контрольный листок – для сбора статистических данных, оценки брака по величине размера и отклонений формы поверхности.

2. Контрольные карты Шухарта – для оценки стабильности и качества технологического процесса обработки шеек под ремонтный размер.

3. Гистограмма – для оценки зоны рассеяния действительных размеров при обработке и смещения центра распределения по отношению к допуску с целью установления величин и причин исправимого и неисправимого брака.

Собранные данные обработали с помощью методов теории вероятностей и математической статистики [15]. Это позволило провести количественный анализ, определить среднее значение, стандартное отклонение и другие статистические характеристики, необходимые для оценки точности и стабильности технологического процесса. Использование комбинации инструментальных и статистических методов обеспечило всесторонний контроль размеров диаметров деталей.

Результаты и их обсуждение

Контрольный листок целесообразно использовать как инструмент анализа появления брака и как статистическую форму отчетности рабочего при выполнении операции обработки вала под ремонтный размер.

При дефектации заполнили контрольный листок и рассчитали значения отклонения от цилиндричности опорных шеек (табл. 1).

Данная форма контрольного листка заполняется по каждому проконтролированному



Рис. 1. Износ опорных шеек

Fig. 1. Wear of main bearing journals

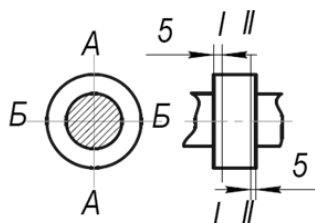


Рис. 2. Схема измерений опорных шеек распределительного вала двигателя ЯМЗ-236

Fig. 2. Measurement diagram for camshaft bearing journals of the YaMZ-236 engine

Контролируемые параметры опорных шеек распределительного вала двигателя ЯМЗ-236

Таблица 1

Checklist for monitoring the main bearing journals of the YaMZ-236 engine camshaft

Table 1

Контролируемый параметр	Сечение/Плоскость		Номера шеек			
			I	II	III	IV
Диаметр шейки, мм	Сечение I-I	Плоскость А-А	53,713	53,711	53,719	53,726
		Плоскость Б-Б	53,715	53,713	53,722	53,727
	Сечение II-II	Плоскость А-А	53,714	53,714	53,720	53,727
		Плоскость Б-Б	53,716	53,715	53,721	53,728
Конусность, мм	Плоскость А-А		0,0005	0,0015	0,0005	0,0005
	Плоскость Б-Б		0,0005	0,001	0,0005	0,0005
Овальность, мм	Сечение I-I		0,001	0,001	0,0015	0,0005
	Сечение II-II		0,001	0,0005	0,0005	0,0005
Износ			0,182	0,184	0,176	0,169
Итоговое заключение по валу			Обработка под 1-й ремонтный размер			

распределительному валу. На основании контрольного листка осуществляется механическая обработка опорных шеек распределительного вала двигателя ЯМЗ-236 под 1-й или 2-й ремонтные размеры. После обработки опорных шеек проводится контроль их диаметров и строится контрольная карта средних значений и размахов для проведения анализа самого процесса обработки опорных шеек под ремонтный размер.

Данные для построения контрольных карт средних арифметических значений и размахов диаметров опорных шеек распределительного вала двигателя ЯМЗ-236 после ремонта представлены в таблице 2.

С использованием данных таблицы 2 были построены контрольные карты (рис. 3).

На контрольной карте средних значений границы (X-карта) поля допуска значительно шире контрольных границ карты. Контрольная карта средних значений предназначена для проверки стабильности среднего значения процесса относительно случайных колебаний, вызванных внутренними факторами процесса. Границы поля допуска же задаются техническими требованиями изделия и отражают приемлемые пределы отклонений размеров деталей или параметров продукции. Несмотря на то, что фактические размеры редко выходят за пределы поля допуска, контрольные карты средних значений играют важную роль в поддержании стабильного качества и надежности процесса. Их использование служит эффективным средством предупреждения возможных нарушений и поддержания высокого уровня управляемости технологического процесса.

На основании карты средних арифметических значений и размахов можно отметить, что не наблюдается выхода значения параметра за пределы

контрольных границ, также интервал допуска шире границ регулирования карты средних значений, соответственно в данный момент брак при обработке опорных шеек распределительного вала под первый ремонтный размер не обнаружен. Но на карте размахов (R-карта) имеются убывающая последовательность точек (7-12) и последовательность из 9 точек, лежащих по одну сторону от центральной

Таблица 2

Данные для построения контрольных карт при анализе качества обработки шеек распределительного вала двигателя ЯМЗ-236

Table 2

Data for constructing control maps of arithmetic averages and diameter ranges of the camshaft bearing journals of the YaMZ-236 engine

Параметр контрольной карты	Значение, мм
Наибольший предельный размер	53,635
Значение середины допуска	53,615
Наименьший предельный размер	53,595
Среднеквадратичное отклонение	0,0036
Верхняя контрольная граница \bar{X} -карты	53,631
Двухсигмовая граница от среднего значения вверх	53,628
Односигмовая граница от среднего значения вверх	53,624
Средняя линия \bar{X} -карты	53,620
Односигмовая граница от среднего значения вниз	53,617
Двухсигмовая граница от среднего значения вниз	53,613
Нижняя контрольная граница \bar{X} -карты	53,609
Верхняя контрольная граница R-карты	0,034
Средняя линия R-карты	0,015
Нижняя контрольная граница R-карты	0

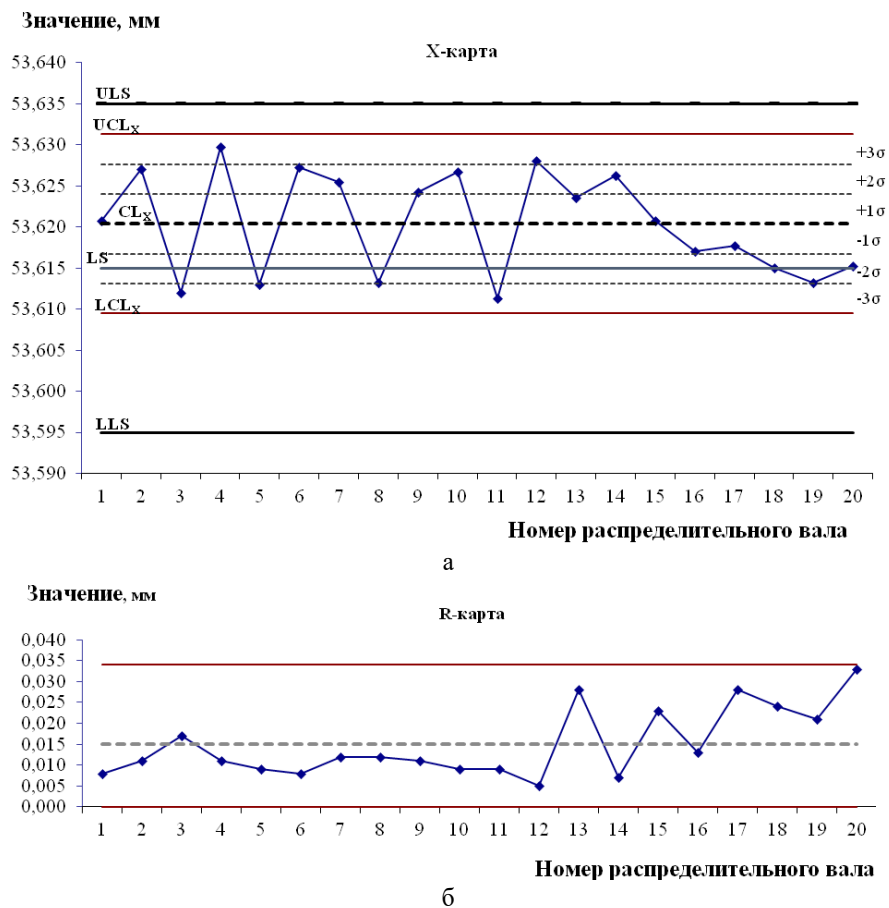


Рис. 3. Карты средних арифметических значений (а) и размахов (б) диаметров опорных шеек распределительных валов двигателя ЯМЗ-236

Fig. 3. Maps of arithmetic averages and diameter ranges of the camshaft bearing journals of the YaMZ-236 engine

линии (4-12). Данное расположение точек указывает на то, что в течение определенного времени на процесс воздействуют неслучайные причины изменчивости, выводящие процесс из управляемого состояния.

Статистическую стабильность и управляемость процесса можно определить, используя индекс воспроизводимости:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma_x}.$$

Индекс воспроизводимости процесса C_p составил 1,66. Соответственно можно считать, что процесс управляем при контроле.

При обнаружении брака в контрольном листке требуется строить гистограмму. Гистограмма, как важнейший инструмент анализа исправного и неисправного брака при допусковом контроле, может быть построена по полученным статистическим данным (табл. 3).

Критерий согласия χ -квадрат показал, что с вероятностью 85% исследуемое распределение можно считать нормальным.

Рассчитанный коэффициент настроенности процесса обработки шеек под ремонтный размер равен 0,125.

Это говорит о том, что центр распределения смещен в сторону исправимого брака.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что процессом управляет опытный рабочий, исключаящий появление неисправимого брака.

Гипотеза о поддержании качества процесса обработки регулярным применением статистических методов контроля подтверждена.

Таблица 3
Данные для построения гистограммы по оценке качества обработки опорных шеек распределительных валов

Table 3
Data for constructing a histogram to evaluate the machining quality of camshaft bearing journals

Границы интервала, мм		Относительная частота	Теоретическая частота
нижняя	верхняя		
53,609	53,613	0,100	0,131
53,613	53,617	0,250	0,227
53,617	53,620	0,100	0,257
53,620	53,624	0,150	0,206
53,624	53,627	0,300	0,131
53,627	53,631	0,100	0,049

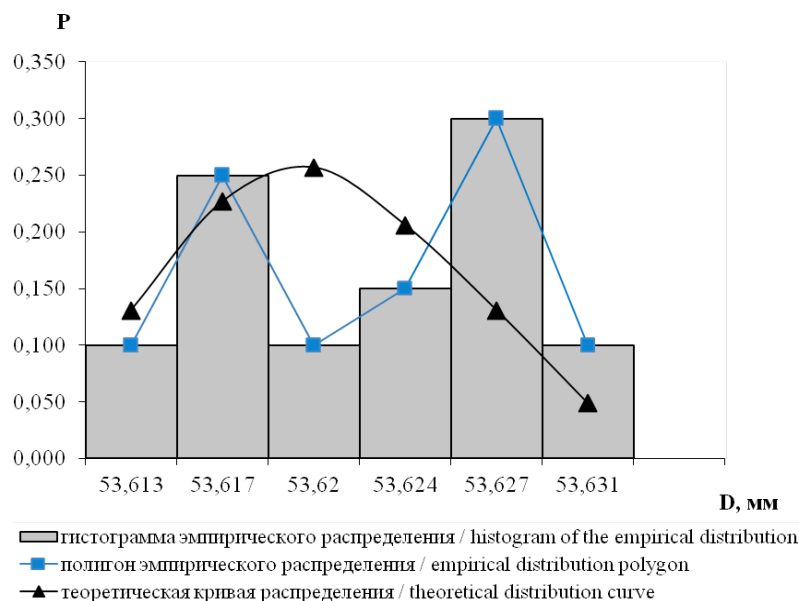


Рис. 4. Рассеяние диаметров опорных шеек распределительных валов двигателей ЯМЗ-236 при ремонте

Fig. 4. Dispersion of the diameters of the camshaft bearing journals of the YaMZ-236 engines during repair

Выводы

Оценка качества процесса обработки опорных шеек распределительного вала двигателя ЯМЗ-236 под ремонтный размер, выполненная с помощью контрольных листов, контрольных карт и гистограммы, показала следующее:

- целесообразно раз в квартал строить контрольные карты Шухарта для определения уровня настроенности процесса;
- рассчитанный индекс воспроизводимости 1,66 свидетельствует о соответствии технологического

процесса требованиям, технологический процесс обработки шеек под ремонтный размер можно считать стабильным и управляемым, оборудование отвечает предъявляемым требованиям по точности;

– вероятность возникновения исправимого брака составляет менее 0,5%, а неисправимого брака – 0%, центр распределения смещен в сторону исправимого брака, процессом управляет опытный рабочий, исключая появление неисправимого брака, а в случае появления исправимого (шейки по диаметру больше положенного) доводит размер до требуемого значения по технической документации.

Список источников

1. Дальский Н. Восстановление сельхозтехники – новая жизнь агрегатов! // Наше сельское хозяйство. 2023. № 13 (309). С. 64-67. EDN: JPPVBR
2. Силина М.И., Костомахин М.Н. Спрос на модернизацию сельскохозяйственной техники на ремонтно-технических предприятиях // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2024. № 5. С. 3-9. EDN: CKUJNH
3. Ерохин М.Н., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. и др. Производство и ремонт отечественных машин для агропромышленного комплекса с позиций принципа 5М // Вестник машиностроения. 2023. Т. 102. № 8. С. 701-704. EDN: BUMPSG
4. Кушнарев Л.И. Обеспечение работоспособности техники в гарантийный период эксплуатации // Сельский механизатор. 2020. № 4. С. 2-3. EDN: WVFDGT
5. Абдрашитов В.В., Калугин В.Е. Исследование, анализ и разработка статистических методов контроля качества // Техника и технологии строительства. 2024. № 1 (37). С. 56-61. EDN: ZPBVZE
6. Голубкова И.В., Прокофьев О.В. Реализация алгоритмов статистического управления качеством на основе контрольных карт // Современные информационные технологии. 2019. № 29. С. 112-116. EDN: RXNTXD
7. Аксенова Ж.А. Контрольные карты Шухарта как инструмент управления качеством готовой продукции

References

1. Dalskiy N. Farm machinery repair: reliable new life for units. *Nashe selskoe khozyaystvo*. 2023;13(309):64-67. (In Russ.)
2. Silina M.I., Kostomakhin M.N. Demand for the modernization of agricultural machinery in repair and technical enterprises. *Selskohozyajstvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont*. 2024;5:3-9. (In Russ.) <https://doi.org/10.33920/sel-10-2405-01>
3. Erokhin M.N., Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. et al. Production and repair of domestic machines for agroindustrial complexes from the position of the 5m principle. *Vestnik mashinostroeniya*. 2023;8:701-704. (In Russ.) <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-8-701-704>
4. Kushnarev L.I. Ensuring the operability of equipment during the warranty period of operation. *Selskiy mekhanizator*. 2020;4:2-3. (In Russ.)
5. Abdrashitov V.V., Kalugin V.E. Research, analysis and development of statistical methods of quality control. *Tekhnika i tekhnologii stroitelstva*. 2024;1(37):56-61. (In Russ.)
6. Golubkova I.V., Prokofiev O.V. Implementation of statistical quality management algorithms based on control charts. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii*. 2019;29:112-116. (In Russ.)
7. Aksenova Zh.A. Shekhart control charts as a tool for managing the quality of finished products. *Ekonomika i predprinimatelstvo*. 2019;7(108):1184-1188. (In Russ.)

// Экономика и предпринимательство. 2019. № 7 (108). С. 1184-1188. EDN: BWZMSI

8. Горovenko В.А. Теоретические основы и методы управления качеством продукции // Вести Автомобильно-дорожного института. 2020. № 1 (32). С. 104-110. EDN: UADVK

9. Тойгамбаев С.К., Шамуратов Д.Д. Организация участка по восстановлению распределительных валов машин // International Journal of Professional Science. 2024. № 7-2. С. 32-39. EDN: RTTSSU

10. Слинко Д.Б., Мурзаев В.П., Варламова Л.Д. Восстановление распределительных валов ДВС // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2021. № 8. С. 49-53. EDN: EPCSGP

11. Буряева Г.М. Оценка внешних и внутренних факторов организации технического сервиса машин в АПК // Технический сервис машин. 2022. № 4 (149). С. 13-20. EDN: OXUHEG

12. Кокиева Г.Е. Технологические основы эффективности обслуживания машин ремонтно-обслуживающих предприятий // Столыпинский вестник. 2023. Т. 5. № 6. EDN: PNKWHN

13. 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>

14. Шистеев А.В., Бебиков Д.В. Техническое обслуживание и ремонт тракторов Zoomlion RS в условиях Иркутской области // Актуальные вопросы аграрной науки. 2023. № 46. С. 35-44. EDN: DLONRG

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

Информация об авторах

¹ **Леонов Олег Альбертович**, д-р техн. наук, профессор; oleonov@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>; SPIN-код: 9399-5650

² **Темасова Галина Николаевна**, д-р техн. наук, доцент; temasova@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0555-2758>; SPIN-код: 8805-3016

³ **Голитинский Павел Вячеславович**, канд. техн. наук, доцент; gpv@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7303-1658>; SPIN-код: 2323-0797

⁴ **Кравченко Игорь Николаевич**, д-р техн. наук, профессор; kravchenko-in71@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>; SPIN-код: 8272-6031

⁵ **Самордин Андрей Николаевич**, инженер; asamordin@rgau-msha.ru; SPIN-код: 4839-2231

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

Вклад авторов

О.А. Леонов – научное руководство исследованиями; Г.Н. Темасова – концептуализация, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование; П.В. Голитинский – методология, проведение исследований; И.Н. Кравченко – администрирование проекта, проверка результатов обработки статистической информации; А.Н. Самордин – проведение исследований, сбор и обработка статистической информации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 02.06.2025, после рецензирования и доработки 29.10.2025; принята к публикации 03.11.2025

8. Gorovenko V.A. Theory and management techniques of the product quality. *Bulletin of the Automobile and Road Institute*. 2020;1(32):104-110. (In Russ.)

9. Toygambaev S.K., Shamuratov D.D. Organization of a site for the restoration of camshafts of machines. *International Journal of Professional Science*. 2024;7-2:32-39. (In Russ.)

10. Slinko D.B., Murzaev V.P., Varlamova L.D. Restoration of internal combustion engine camshafts. *Selskohozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont*. 2021;8:49-53. (In Russ.)

11. Buraeva G.M. External and internal organization of technical service in the agro-industrial complex. *Machinery Technical Service*. 2022;4(149):13-20. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2022-60-4-13-20>

12. Kokieva G.E. Technological foundations of the efficiency of maintenance of machines of repair and maintenance enterprises. *Stolypin Annals*. 2023;5(6). (In Russ.)

13. 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>

14. Shisteev A.V., Bebikov D.V. Maintenance and repair of tractors Zoomlion RS in the conditions of the Irkutsk region. *Actual Issues of Agrarian Science*. 2023;46:35-44. (In Russ.)

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

Author Information

Oleg A. Leonov¹, DSc (Eng), Professor; oleonov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>; Scopus Author ID: 57209748174; ResearcherID: ABC-5873-2020

Galina N. Temasova², DSc (Eng), Associate Professor; temasova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0555-2758>; ResearcherID: AAD-6551-2022

Pavel V. Golitskiy³, CSc (Eng), Associate Professor; gpv@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7303-1658>; Scopus Author ID: 57216809753

Igor N. Kravchenko⁴, DSc (Eng), Professor; kravchenko-in71@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>; Scopus Author ID: 7004969160; ResearcherID: B-9463-2018

Andrey N. Samordin⁵, engineer; asamordin@rgau-msha.ru
^{1,2,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Author Contributions

O.A. Leonov – research supervision; G.N. Temasova – conceptualization, writing – review and editing of the manuscript; P.V. Golitskiy – methodology, investigation; I.N. Kravchenko – project administration, writing – original draft; A.N. Samordin – investigation.

Conflict of interests

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

Received 02.06.2025; Revised 29.10.2025; Accepted 03.11.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.171:004.4

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-82-91>

Устройство для мониторинга системы подачи воздуха и диагностических параметров работы ДВС сельскохозяйственной техники

Ю.В. Катаев^{1✉}, А.С. Саяпин², Е.В. Пестряков³, М.Н. Костомахин⁴, Н.А. Петрищев⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия

¹ ykataev@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-0832-3608>

² comaconcrsas@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6527-780X>

³ unlimited-007@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7399-9906>

⁴ redizdat@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1126-7520>

⁵ gosniti14@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3608-5408>

Аннотация. Загрязненность воздушного фильтра дизельного двигателя приводит к снижению его мощности и топливной экономичности, ухудшению условий труда оператора и экологической безопасности техники. Исследования проведены с целью разработки устройства для мониторинга технического состояния системы воздухоочистки и диагностических параметров работы ДВС. Разработанное экспериментальное устройство на базе микроконтроллера ATmega2560 включает в себя датчик разряжения XGZP6847A в впускном коллекторе ДВС, датчик давления картерных газов QDW90A, датчик скорости вращения коленчатого вала TENSTAR ROBOT E18-D80NK, датчик температуры отработавших газов TZT MAX6675, датчик температуры охлаждающей жидкости ДВС, датчик температуры воздуха окружающей среды DS18B20. Для обработки считываемых с датчиков данных о состоянии воздушной системы с последующим отображением результатов измерения и анализа на дисплее устройства разработано программное обеспечение. Быстродействие программного алгоритма на микроконтроллере – не более 0,05 с. Разработанный экспериментальный образец устройства позволяет в процессе эксплуатации оперативно оценивать текущее состояние системы воздухоочистки и определять общее состояние эксплуатационных характеристик дизельных двигателей. При мониторинге состояния ДВС возможны следующие варианты индикации на дисплее устройства: чистый фильтр; допускаемая загрязненность; предельная загрязненность; аварийное состояние; разгерметизация системы воздухоочистки; низкая мощность ДВС. Разработанное устройство позволит собирать исходную информацию для системы интеллектуальной оценки технического состояния с применением нейронных сетей в целях корректировки типа работы и времени технического обслуживания.

Ключевые слова: сельскохозяйственная техника; ДВС; воздушный фильтр; техническое состояние; мониторинг; устройство для мониторинга; датчик; система воздухоочистки

Для цитирования: Катаев Ю.В., Саяпин А.С., Пестряков Е.В., Костомахин М.Н., Петрищев Н.А. Устройство для мониторинга системы подачи воздуха и диагностических параметров работы ДВС сельскохозяйственной техники // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 6. С. 82-91. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-82-91>

ORIGINAL ARTICLE

Device for monitoring the air intake system and diagnostic parameters of agricultural machinery engines

Yu.V. Kataev¹, A.S. Sayapin², E.V. Pestryakov³, M.N. Kostomakhin⁴, N.A. Petrishchev⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia

¹ ykataev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0832-3608>

² comaconcrsas@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6527-780X>

³ unlimeted-007@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7399-9906>

⁴ redizdat@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1126-7520>

⁵ gosniti14@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3608-5408>

Abstract. Contamination of an air filter used in the diesel engine critically compromises its power and fuel efficiency, simultaneously degrading operator working conditions and environmental safety. This research aimed to develop a device for real-time monitoring of the technical condition of air filtration systems and the diagnostic parameters of the internal combustion engine (ICE). Built upon an ATmega2560 microcontroller, the experimental device integrates an XGZP6847A vacuum sensor in the ICE intake manifold, a QDW90A crankcase gas pressure sensor, a TENSTAR ROBOT E18-D80NK crankshaft speed sensor, a TZT MAX6675 exhaust gas temperature sensor, an ICE coolant temperature sensor, and a DS18B20 ambient air temperature sensor. The authors developed a software product to process data acquired from these sensors, related to the air system's status, and display the processed and analyzed results on the device screen. The microcontroller-based software algorithm boasts an execution speed of no more than 0.05 seconds. The developed prototype facilitates immediate operational assessment of the current state of the air filtration system and enables comprehensive evaluation of the overall operational performance of the diesel engine. The device display provides clear indications during ICE monitoring, including: clean filter; permissible contamination; critical contamination; emergency condition; air filtration system depressurization; and low ICE power. Crucially, this device will serve as a foundational data source for an intelligent system of assessing technical condition by leveraging neural networks, thereby enabling optimized operation and maintenance scheduling.

Keywords: agricultural machinery; internal combustion engine (ICE); air filter; technical condition; monitoring; monitoring device; sensor; air cleaning system

For citation: Kataev Yu.V., Sayapin A.S., Pestryakov E.V., Kostomakhin M.N., Petrishchev N.A. Device for monitoring the air intake system and diagnostic parameters of agricultural machinery engines. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(6):82-91 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-82-91>

Введение

Сельскохозяйственная техника эксплуатируется в условиях повышенной аэрозольной загрязненности окружающего воздуха, что приводит к загрязнению воздушного фильтра дизельных двигателей [1, 2]. Отсутствие систем контроля текущего технического состояния двигателя (за исключением аварийного) сказывается на его аэродинамическом сопротивлении: снижаются расход воздуха [3], мощность и топливная экономичность ДВС, ухудшаются условия труда оператора и снижается экологическая безопасность техники¹.

Эффективность использования и эксплуатационная надежность сельскохозяйственной техники

обуславливают своевременное выполнение агро-сроков и максимизацию запланированной прибыли [4, 5]. Причинами ускоренного износа и отказа отечественной сельскохозяйственной техники являются отсутствие опциональной возможности встраивания бортового диагностического оборудования для оценки динамики изменения технического состояния диагностических параметров и отсутствие нормативов, характеризующих номинальное, допускаемое и предельное техническое состояние ресурсопределяющих узлов и агрегатов, определяемое с применением бортовых диагностических средств для минимизации человеческого фактора при их контроле.

Своевременная очистка воздушного фильтра ДВС является рекомендованной производителем операцией, которую обычно проводят при срабатывании аварийного сигнализатора [1]. Однако при наличии источников аэрозольного загрязнения в окружающем воздухе, например, при эксплуатации с другой

¹ГОСТ 17.2.2.02-98. Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы определения дымности отработавших газов дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации метрологии и сертификации, 1998. 119 с.

техникой или при движении техники в колонне, происходит интенсивное накопление загрязнений в воздушном фильтре. Таким образом, при работе в поле при номинальных мощностных характеристиках может оказаться, что воздушный фильтр уже значительно загрязнен (более 2/3 от предельного состояния) и двигатель эксплуатируется в неоптимальных режимах (не обеспечивается необходимый расход воздуха), при этом аварийный индикатор на панели оператора еще не показывает предельного состояния загрязненности фильтра.

Температура охлаждающей жидкости и температура отработавших газов на выходе из цилиндров являются одними из важнейших диагностических параметров дизеля. Их значение в каждый момент обусловлено действием целого ряда разнообразных факторов, связанных как с техническим состоянием основных агрегатов двигателя, так и с режимом его работы [6]. При этом диагностирование ДВС производят при номинальной рабочей температуре для повышения достоверности результатов [7].

Измеряя угловую скорость и ускорение коленчатого вала ДВС при тестовом циклическом воздействии, можно построить скоростную динамическую характеристику, аналогичную получаемой при стендовых испытаниях. По ее параметрам определяют динамические свойства и мощность ДВС [7, 8].

Таким образом, считаем, что мониторинг мощностных характеристик и технического состояния фильтра воздухоочистителя двигателя сельскохозяйственной техники с учетом температуры отработавших газов и температуры охлаждающей жидкости является необходимым элементом внедряемой методологии надежно-ориентированной системы технического обслуживания², а применение устройства для мониторинга системы подачи воздуха будет способствовать сохранению технико-экономических потребительских качеств [4, 9] и соблюдению требований норм дымности отработавших газов. Эффективность и надежность работы фильтра влияют на ресурс систем дизельного двигателя сельскохозяйственной техники, поэтому разработка устройства для оценки технического состояния воздушного фильтра является актуальным направлением.

Цель исследований: разработать устройство и алгоритм для оперативного мониторинга технического состояния системы воздухоочистки и диагностических параметров работы ДВС в процессе эксплуатации отечественной сельскохозяйственной техники.

²Ефремов Л.В. Проблемы управления надежно-ориентированной технической эксплуатацией машин: Учебное пособие. Санкт-Петербург: Art-Xpress, 2015. 206 с. EDN: UKEEGZ.

Материалы и методы

В ходе исследований изучили существующие способы и средства оценки воздушных фильтров и определили параметры для оценки их состояния. Изучили способы измерения перепада давления во впускном тракте, температуры в системе выпуска отработавших газов, избыточного давления картерных газов, скорости и ускорения коленчатого вала. Рассмотрели возможность разработки и установки дополнительного информирующего устройства предупреждения случаев эксплуатации на аварийных режимах для недопущения появления отказов II и III групп сложности. Подготовили лабораторную установку для моделирования работы дизельного двигателя и датчиков при создании тестовых воздействий. С целью контроля изменения технического состояния фильтра в процессе эксплуатации разработали программное обеспечение для мониторинга и отображения на дисплее устройства в режиме реального времени данных с датчиков, подключенных к микроконтроллеру устройства.

Результаты и их обсуждение

В связи с отсутствием оперативного контроля текущего состояния воздушного фильтра двигателя ухудшается техническое состояние большинства его узлов и систем по причине повышенной нагрузки и ускоренного износа³ [10]. В результате наблюдаются следующие явления:

- снижение компрессии по причине абразивного износа зеркала цилиндра и закоксовывания компрессионных колец;
- увеличение нагрузки на трансмиссию и повышенный износ фрикционных дисков сцепления, гидropоджимных муфт, распределителя механизма переключения передач;
- износ качающих шестерен масляного насоса системы смазки;
- снижение пропускной способности всасывающего фильтра;
- снижение оптимальных пропорций топливно-воздушной смеси в камере сгорания;
- увеличение расхода топлива за счет компенсации уменьшения мощности двигателя;
- снижение мощности и запаса крутящего момента;
- усложнение запуска двигателя и перерасход заряда аккумулятора;
- перегрев, изменение геометрии выпускных клапанов газораспределительного механизма;

³Кряжков В.М. Надежность и качество сельскохозяйственной техники. М.: Агропромиздат, 1989. 335 с.

- образование трещин и прогорание прокладки головки блока цилиндров;
- образование нагара и лаковых отложений на внутренних поверхностях головки блока цилиндров и цилиндропоршневой группы;
- ухудшение свойств охлаждающей жидкости с образованием нерастворимых окислов;
- снижение эффективности турбокомпрессора и перегрев интеркулера;
- повышение уровня дымности отработавших газов;
- засорение каталитического нейтрализатора;
- снижение срока службы моторного масла;
- снижение пропускной способности сетки сапуна;
- снижение качества распыла форсунками;
- повышение давления в полости картера и утечка моторного масла.

Анализ экспертных оценок и производственный опыт показали снижение надежности техники и возникновение отказов II и III групп сложности при эксплуатации воздухоочистительных фильтров в предельном техническом состоянии и в условиях напряженных работ. Устранение последствий этих отказов требует значительных материальных издержек и временных затрат. Внедрение устройства, оценивающего состояние воздушного фильтра без внесения существенных изменений в конструкцию ДВС, позволит проводить своевременное сервисное обслуживание с целью снижения риска отказов и эксплуатировать технику в соответствии с требованиями производителя.

Для контроля технического состояния системы воздухоочистки компания Donaldson Filtration Solutions, например, предлагает ряд решений:

градуированные или однопозиционные индикаторы, информирующие о состоянии фильтра и необходимости его замены (рис. 1а); переключатели, позволяющие визуально контролировать состояние и передавать электрический сигнал на индикатор, располагаемый в кабине (рис. 1б); устройства с дисплеями для электронного контроля уровня засорения фильтров с непрерывной подачей сигнала, а также беспроводные датчики Filter Minder⁴, предназначенные для телематических систем (рис. 1с).

Установлено, что в зависимости от уровня запыленности окружающего воздуха и исходной пылеемкости воздушный фильтр дизеля может находиться в номинальном техническом состоянии до ТО-1 или же в предельном техническом состоянии уже через три смены работы сельскохозяйственной техники.

Производители тракторных двигателей отечественного производства (ЯМЗ, ТМЗ, МТЗ и др.) устанавливают только датчики-сигнализаторы предельного состояния воздушного фильтра типа ДСФ (ОАО «Экран» РБ)⁵ (рис. 2), которые в случае предельного перепада давлений (при превышении значения разрежения более 6,4...6,9 кПа) осуществляют световую индикацию в кабину оператора.

Отметим, что производители в инструкции по эксплуатации сельскохозяйственной техники не всегда указывают номинальное и предельное сопротивление воздушного фильтра, а также рекомендации с указанием максимального возможного количества чисток (сухим и мокрым способами) в процессе эксплуатации. Например, воздушные фильтры для трактора К-744Р1СТ...К-744Р4СТ (производитель «Промтрактор») могут выдерживать до 6 чисток, из которых 3 – мокрые. Производителем

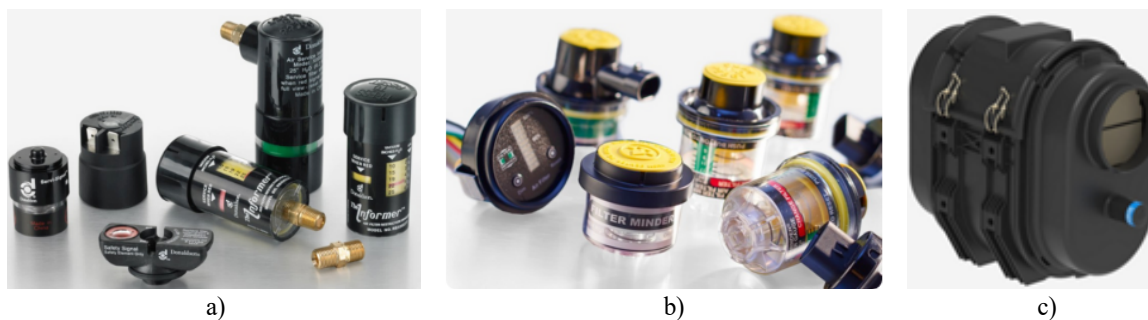


Рис. 1. Средства компании Donaldson Filtration Solutions для контроля состояния воздушных фильтров:

a – индикаторы; b – переключатели; c – беспроводные датчики

Fig. 1. Donaldson Filtration Solutions tools for monitoring the condition of air filters:

a – indicators; b – switches; c – wireless sensors

⁴ Индикаторы обслуживания воздушного фильтра. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.donaldson.com/en-be/engine/filters/products/air-intake/accessories/filter-service-indicators/> (дата обращения: 07.04.2025).

⁵ Датчик сигнализатора засоренности воздушного фильтра ДСФ. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ekranbel.com/ru/catalog/46/423/516/527/> (дата обращения: 07.04.2025).

«Ремиз» (РБ) допускается до 6 чисток, и при этом не рекомендуется использование фильтров при наличии сажи или механических повреждений.

Анализируя уровень разрежения во впускном тракте эксплуатируемых тракторов (в ФНАЦ ВИМ), выявили, что предельное значение перепада давления воздуха загрязненных



Рис. 2. Датчик ДСФ
для индикации предельной загрязненности

Fig. 2. DSF sensor
for indicating maximum contamination

фильтров (аэродинамическое сопротивление) превышает номинальное (новых фильтров) в среднем в 2,0...2,3 раза, и в большинстве случаев (до 75%) работа техники осуществляется в зонах допускаемого и предельного уровня разрежения. Причиной такого положения является отсутствие контроля за состоянием фильтра и всей системы воздухоочистки. Таким образом, разрабатываемое устройство должно осуществлять оперативный контроль состояний и, оценивая динамику, изменять уровень разрежения, а также контролировать качество проведенного обслуживания (рис. 3).

Согласно ГОСТ⁶ при использовании воздухоочистителей с сухой фильтрующей перегородкой на транспортных средствах категории N и тракторах необходимо устанавливать индикаторы засоренности. На самоходных сельскохозяйственных машинах индикаторы засоренности устанавливают по согласованию с потребителем.

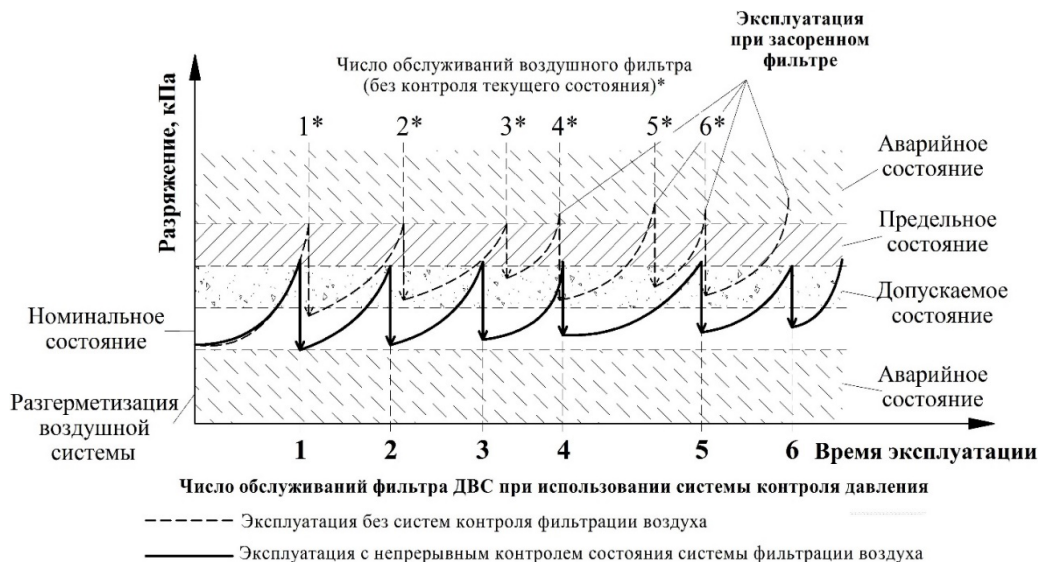


Рис. 3. Варианты контроля технического состояния фильтра по традиционному и предлагаемым вариантам контроля

Fig. 3. Options for monitoring the technical condition of the filter according to the conventional and proposed control options

Сопротивление воздухоочистителя при номинальном расходе воздуха, кПа

Таблица 1

Table 1

Air cleaner resistance, at nominal air flow, kPa

Тип воздухоочистителя	Дизель без турбонаддува, бензиновые двигатели транспортных средств категории N	Дизель с турбонаддувом	Дизель без турбонаддува и бензиновые двигатели транспортных средств категории M
С масляной ванной или смазываемым элементом	3,5	3,5	3,0
С сухой фильтрующей перегородкой	3,5	4,0	2,5

Примечание. Предельное сопротивление устанавливается в конструкторской документации на конкретный воздухоочиститель.

⁶ГОСТ Р 53837-2010. Двигатели автомобильные. Воздухоочистители. Технические требования. ФГУП «Стандартинформ», 2010. 8 с. <https://docs.cntd.ru/document/1200081351>

В таблице 1 приведены требования к основным параметрам воздухоочистителей (фильтров и фильтрующих элементов очистки воздуха), которые приняты в исследованиях за номинальные.

На основании представленных номинальных и предельных значений сопротивлений нами принят допускаемый параметр аэродинамического сопротивления, который составляет 75...80% от предельного значения разрежения в впускном тракте. Мы считаем, что контроль динамики изменения его аэродинамического сопротивления поможет оператору заблаговременно провести очистку или замену воздушного фильтра и не допустить эксплуатацию двигателя в аварийном режиме работы системы воздухоочистки.

Помимо контроля уровня сопротивления воздушного фильтра, при номинальных значениях потребления воздуха разрабатываемое устройство должно обеспечивать мониторинг нижнего порога сопротивления фильтра и в случае его достижения сигнализировать оператору о возможном подсосе неочищенного воздуха в впускной тракт, что позволит минимизировать потенциальные риски, оказывающие влияние на надежность ресурсопределяющих узлов и систем.

Схема экспериментального цифрового устройства для мониторинга состояния воздушных фильтров

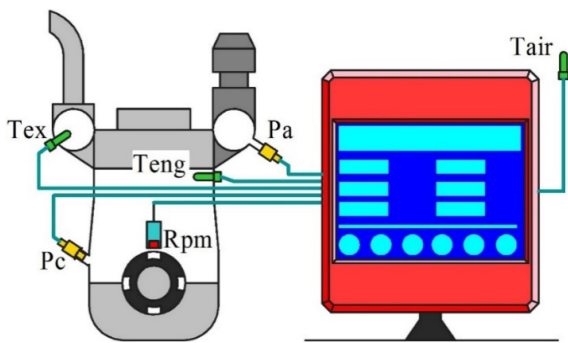


Рис. 4. Схема устройства для мониторинга состояния воздушных фильтров ДВС:

- Pa – датчик разрежения в впускном коллекторе ДВС;
- Pc – датчик давления картерных газов;
- Rpm – датчик скорости вращения коленчатого вала;
- Tex – датчик температуры отработавших газов;
- Teng – датчик температуры охлаждающей жидкости ДВС;
- Tair – датчик температуры воздуха окружающей среды

Fig. 4. Schematic diagram of a device for monitoring the condition of ICE air filters:

- Pa – discharge sensor in the intake manifold of the internal combustion engine;
- Pc – crankcase gas pressure sensor;
- Rpm – crankshaft rotation speed sensor;
- Tex – exhaust gas temperature sensor;
- Teng – temperature sensor of the engine coolant;
- Tair – ambient air temperature sensor

двигателей сельскохозяйственной техники представлена на рисунке 4.

Предлагаемое устройство разработано на базе микроконтроллера ATmega2560, к которому подключены датчики лабораторной экспериментальной установки для моделирования состояний (табл. 2).

Для микроконтроллера ATmega2560 разработана программа, позволяющая автоматически определять контролируемые параметры (давление разрежения в системе очистки воздуха ДВС, избыточное давление и температуру картерных газов, уровень загрузки ДВС по температуре отработавших газов в выхлопном коллекторе, скорость вращения и максимальное угловое ускорение коленчатого вала при свободном разгоне, температуру внешней среды, охлаждающей жидкости в системе охлаждения и температуру масла в картере ДВС) для расчета отклонений и сигнализировать о превышении установленных пороговых значений (рис. 5).

Таблица 2
Датчики экспериментального устройства для контроля состояния воздушного фильтра ДВС

Table 2
Sensors of an experimental device for monitoring the condition of an air filter of internal combustion engines

Наименование, внешний вид	Назначение
 XGZP6847A	Аналоговый преобразователь давления разрежения во всасывающем тракте воздушной системы ДВС
 QDW90A 0-5VG1/40-20 kPa	Аналоговый преобразователь давления картерных газов, установленный в крышку маслозаливной горловины ДВС
 TZT MAX6675	Цифровой датчик измерения температуры выхлопных газов, встроенный в переходник выпускного коллектора ДВС
 TENSTAR ROBOT E18-D80NK	Оптический инфракрасный датчик измерения скорости и ускорений коленчатого вала ДВС
 DS18B20	Цифровой датчик для контроля температуры охлаждающей жидкости ДВС и воздуха

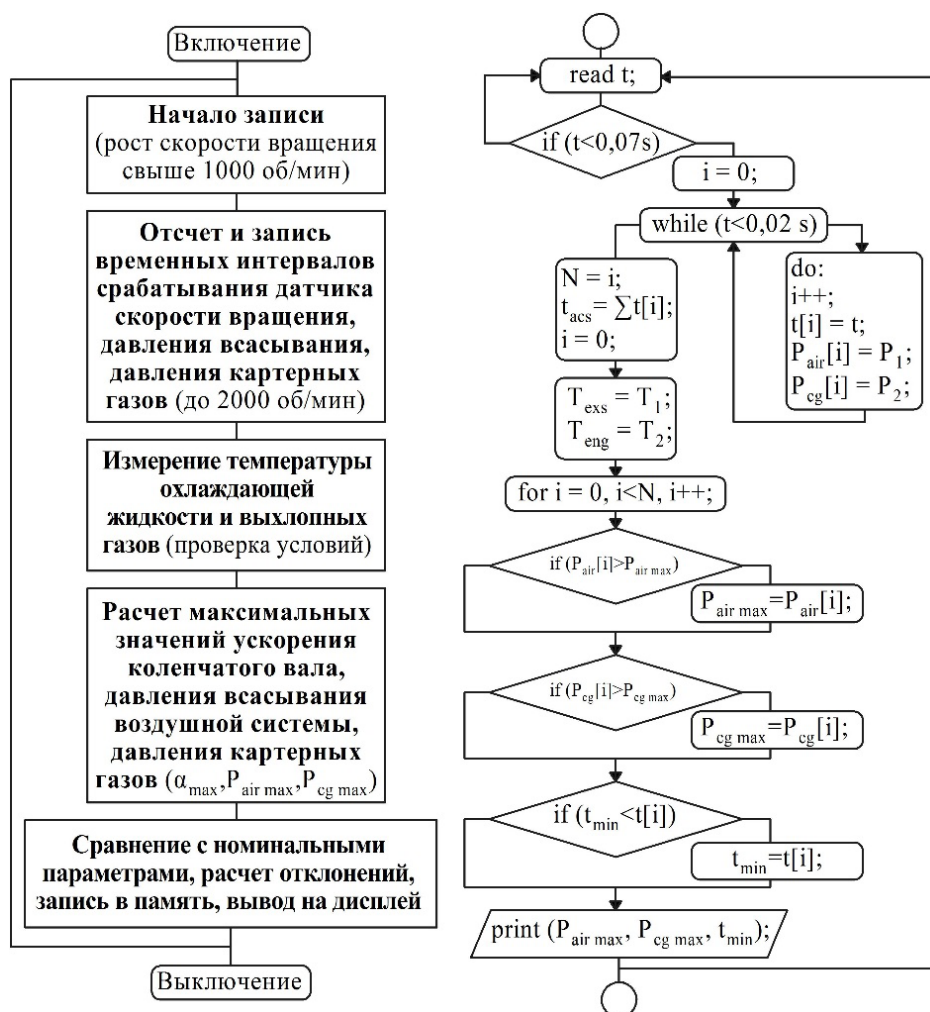


Рис. 5. Алгоритм программы автоматической работы экспериментального цифрового устройства для мониторинга состояния воздушных фильтров

Fig. 5. Algorithm of the automatic operation program of an experimental digital device for monitoring the condition of air filters

При сопоставлении оборотов двигателя, ускорений коленчатого вала, давлений разрежения в системе воздухоочистки, давлений картерных газов, с учетом текущей температуры выхлопных газов и охлаждающей жидкости, представляется возможным определить также общее техническое состояние соответствующих этим параметрам систем ДВС. При записи полученных параметров в память устройства и учета времени наработки можно отслеживать тенденции и динамику их изменения, что позволит при сохранении типа и условий работ прогнозировать время проведения технического обслуживания.

Разработанный прототип устройства оснащен кнопкой перезагрузки, миниатюрным монохромным OLED-дисплеем разрешением 128×64 пикселя для отображения автоматически измеряемых параметров работы ДВС, USB-разъемом для подключения питания и передачи данных на ПК, миниатюрными винтовыми клеммами для подключения сигнальных проводов от датчиков, встроенных в ДВС (рис. 6).

После подключения питания от бортовой сети трактора устройство автоматически диагностирует параметры работы ДВС и состояние системы подачи воздуха и непрерывно получает данные от встроенных в двигатель датчиков.

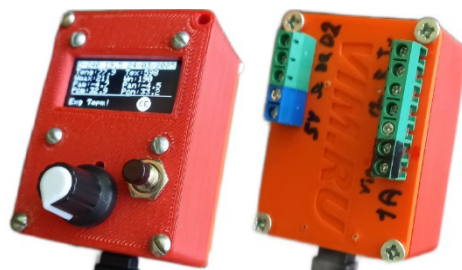


Рис. 6. Прототип экспериментального цифрового устройства для мониторинга состояния системы воздухоочистки и параметров работы ДВС

Fig. 6. Prototype of an experimental digital device for monitoring the condition of the air cleaning system and the operating parameters of the internal combustion engine

Для апробации разработанного алгоритма проведены моделирование и постановочные опыты с использованием установки, включающей в себя персональный компьютер 1 для сбора и визуализацию данных, поступающих от прототипа экспериментального устройства, созданного на базе микроконтроллера 4, датчика давления (разряжения) 2, контрольного манометра 3, электродвигателя 5, магнитных маркерных меток 6 и индуктивного датчика 7, датчиков температуры (на рисунке 7 не показаны). При этом моделировались такие параметры работы ДВС, как температура, скорость вращения и ускорение коленчатого вала, давление разряжения во всасывающем коллекторе системы воздухоочистки и давление картерных газов.

При моделировании работы устройства для мониторинга состояния системы воздухоочистки ДВС особое внимание уделялось быстрдействию программного алгоритма на микроконтроллере (не более 0,05 с), необходимому для дальнейших натурных испытаний.

В прототипе устройства были запрограммированы следующие параметры контроля и пороговые значения, учитывающие состояние фильтра:

– аварийное состояние (разряжение менее 3,5 кПа) – включение визуальной сигнализации *CF* «Проверьте герметичность системы фильтрации»

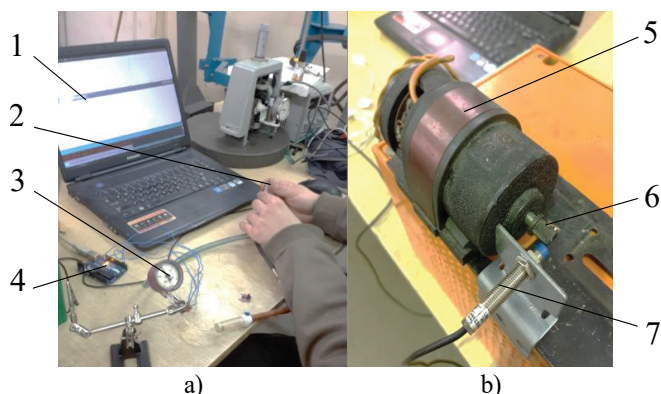


Рис. 7. Установка для проверки алгоритма работы устройства при моделировании давления картерных газов, уровня разряжения в системе воздухоочистки ДВС (а) и частоты вращения и углового ускорения коленчатого вала ДВС (б):

1 – компьютер; 2 – датчик давления (разряжения); 3 – манометр; 4 – микроконтроллер; 5 – электродвигатель; 6 – магнитная маркерная метка; 7 – индуктивный датчик

Fig. 7. Installation for testing the operating algorithm of the device when simulating crankcase gas pressure, vacuum level in the engine air cleaning system (a), and crankshaft speed and angular acceleration (b):

1 – computer; 2 – pressure (vacuum) sensor; 3 – manometer; 4 – microcontroller; 5 – electric motor; 6 – magnetic marker; 7 – inductive sensor

и предупреждающей мигающей надписи «Air flow!» – «Утечка воздуха!»;

– номинальное состояние (разряжение 3,5...5,0 кПа) – включение визуальной сигнализации *N* «Чистый фильтр», соответствующей новому фильтру;

– допускаемое состояние (разряжение 5,0...6,5 кПа) – включение визуальной сигнализации *Ac* «Допускаемая загрязненность»;

– предельное состояние (разряжение 6,5...7,0 кПа) – включение визуальной сигнализации *Lc* «Предельная загрязненность» и *RF* «Замените фильтр»;

– аварийное состояние (разряжение более 7,0 кПа) – включение визуальной сигнализации *Ec* «Аварийная загрязненность» и *RF* «Замените фильтр»;

– низкая мощность ДВС – включение «Low acs!», *CE* – максимальное ускорение коленчатого вала при свободном разгоне менее 180 рад/с².

Измерение ускорения коленчатого вала позволяет быстро оценить общее техническое состояние ДВС. В случае, если ДВС не развивает заявленные мощностные параметры, а система воздухоочистки ДВС работает исправно, появляется возможность обнаружить неисправность, существенно влияющую на его нормальную работу, например, в системе смазки, топливной или выхлопной системах.

Возможные варианты индикации на дисплее устройства моделируемых состояний воздушного фильтра ДВС и диагностических параметров отображены на рисунке 8. Сигнализация на дисплее

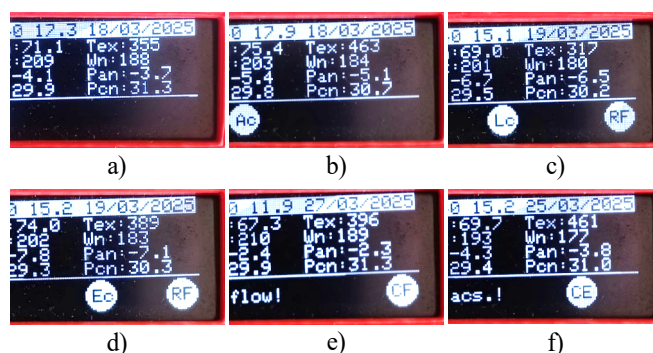


Рис. 8. Возможные варианты индикации на дисплее устройства при мониторинге состояния ДВС:

а) номинальное состояние; б) допустимое состояние; в) предельное состояние; д) аварийное состояние; е) разгерметизация системы воздухоочистки; ф) индикация низкой мощности ДВС

Fig. 8. Possible display options on the device display when monitoring the engine condition:

а) nominal state; б) permissible state; в) limit state; д) emergency condition; е) depressurization of the air cleaning system; ф) low engine power indication

осуществляется латинскими символами ввиду ограничения характеристик используемого микроконтроллера ATmega2560.

Считаем, что разработанное устройство может собирать исходную информацию для системы интеллектуальной оценки технического состояния с применением нейронных сетей в целях корректировки типа работы и времени технического обслуживания [11].

Оценка технического состояния фильтров отечественной сельскохозяйственной техники будет востребована как в условиях эксплуатации, так и при проведении приемо-сдаточных работ при испытании ДВС на обкаточных стендах для более объективной оценки мощностных и топливных характеристик. При этом можно определить исходные показатели технического состояния воздушного фильтра. Уровень давления картерных газов может использоваться для оценки степени приработки ЦПГ и состояния сапунов, а температура в выпускном коллекторе покажет уровень загрузки ДВС.

Сохранение мощностных характеристик ДВС за счет мониторинга параметров позволит снизить

количество переключений передач в процессе эксплуатации, тем самым уменьшить износ (фрикционных дисков, механизма переключения передач энергонасыщенных тракторов, муфт сцепления для механических коробок передач и синхронизаторов передач, системы управления подачей насоса ГСТ) и повысить надежность узлов и агрегатов топливной аппаратуры, ЦПГ, КШМ, ТКР, систем смазки, вентиляции и охлаждения двигателя.

Выводы

1. Устройство контроля технического состояния систем воздухоочистки и диагностических параметров двигателя позволяет оперативно определить его общее техническое состояние, обосновать проведение внепланового технического обслуживания и принять меры по недопущению отказов, тем самым повысить надежность отечественной сельскохозяйственной техники.

2. Апробация алгоритма работы экспериментального устройства подтвердила возможность проведения контроля уровня загрязненности фильтра, давления картерных газов и мощностных характеристик ДВС.

Список источников

1. Катаев Ю.В., Костомахин М.Н., Петрищев Н.А. и др. Экспериментальный образец счетчика индикатора для мониторинга технического состояния воздухоочистителя двигателя трактора // Техника и оборудование для села. 2023. № 7 (313). С. 28-33. EDN: TMXNYJ
2. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П. и др. Приоритетные направления научно-технического развития отечественного тракторостроения // Техника и оборудование для села. 2021. № 2 (284). С. 2-7. EDN: WGULNO
3. Дорохов А.С., Денисов А.В., Соломашкин А.А., Герасимов В.С. Стратегии технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственных машин // Технический сервис машин. 2020. № 3 (140). С. 38-48. EDN: HVXYMF
4. Бурак П.И., Голубев И.Г. Оценка функциональных характеристик сельскохозяйственных тракторов // Чтения академика В.Н. Болтинского: Сборник статей. Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2022. Ч. 1. С. 34-39. EDN: LRLMVK
5. Семейкин В.А., Дорохов А.С. Экономическая эффективность входного контроля качества сельскохозяйственной техники // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2009. № 7 (38). С. 15-17. EDN: KVCLAZ
6. Валиев М.Ш., Косимов Х.Р. О контроле температуры отработавших газов дизеля в эксплуатации // Universum: технические науки. 2020. № 9-1 (78). С. 99-103. EDN: BCMMDA
7. Альт В.В., Савченко О.Ф., Елкин О.В. Цифровая технология оценки мощности тракторного парка сельхозпредприятия // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2019. Т. 13, № 4. С. 25-31. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2019-13-4-25-31>

References

1. Kataev Yu.V., Kostomakhin M.N., Petrishchev N.A. et al. Experimental sample of a counter indicator for monitoring the technical condition tractor engine air cleaner. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;7:28-33. (In Russ.)
2. Lachuga Yu.F., Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya. et al. Priority areas of scientific and technical development of the domestic tractor industry. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021;2:2-7. (In Russ.)
3. Dorokhov A.S., Denisov A.V., Solomashkin A.A., Gerasimov V.S. Strategies of maintenance and repair of agricultural machinery. *Machinery Technical Service*. 2020;3:38-48. (In Russ.)
4. Burak P.I., Golubev I.G. Estimation of farm tractors functional characteristics. *Readings of Academician Vladimir Boltinskiy*. 2022;1:34-39. (In Russ.)
5. Semeykin V.A., Dorokhov A.S. Economic efficiency of entrance quality assurance of agricultural machinery. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2009;7:15-17. (In Russ.)
6. Valiyev M., Qosimov Kh. About monitoring the temperature of diesel exhaust gases in operation. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2020;9-1:99-103. (In Russ.)
7. Alt V.V., Savchenko O.F., Elkin O.V. Digital technology of assessment the power capacity of tractor fleet of an agricultural enterprise. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2019;13(4):25-31. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2019-13-4-25-31>
8. Alt V.V., Olshevskiy S.N., Dobrolyubov I.P. et al. Development of a dynamic model of an internal combustion engine. *Trudy GOSNITI*. 2015;118:8-15. (In Russ.)
9. Ignatov V.I., Dorokhov A.S., Mishina Z.N., Gerasimov V.S. Ways to support the life cycle of agricultural machinery. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2018;10:40-43. (In Russ.)

8. Альт В.В., Ольшевский С.Н., Добролюбов И.П. и др. Разработка динамической модели ДВС // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 118. С. 8-15. EDN: TODEVN

9. Игнатов В.И., Дорохов А.С., Мишина З.Н., Герасимов В.С. Способы поддержки жизненного цикла сельскохозяйственной техники // Техника и оборудование для села. 2018. № 10. С. 40-43. EDN: YOGJLV

10. Катаев Ю.В., Герасимов В.С., Тишанинов И.А., Мордасова М.С. Современные тенденции совершенствования инженерной службы АПК // Технический сервис машин. 2022. № 3 (148). С. 74-82. EDN: AAUYIJ

11. Дорохов А.С., Катаев Ю.В., Костомахин М.Н. и др. Управление техническим состоянием сельскохозяйственной техники с применением цифровых технологий // Российская сельскохозяйственная наука. 2024. № 5. С. 51-56. <https://doi.org/10.31857/S2500262724050102>

Информация об авторах

¹ Катаев Юрий Владимирович, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник; ykataev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0832-3608>; SPIN-код: 3082-3850

² Саяпин Александр Сергеевич, младший научный сотрудник; comaconcsas@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6527-780X>; SPIN-код: 7376-2757

³ Пестряков Ефим Вадимович, младший научный сотрудник; unlimited-007@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7399-9906>; SPIN-код: 7368-0419

⁴ Костомахин Михаил Николаевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; redizdat@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1126-7520>; SPIN-код: 2367-7064

⁵ Петрищев Николай Алексеевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; gosniti14@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3608-5408>; SPIN-код: 5085-8619

^{1, 2, 3, 4, 5} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Вклад авторов

Ю.В. Катаев – формулирование основной концепции исследований;

А.С. Саяпин – описание результатов, подготовка начального варианта рукописи;

Е.В. Пестряков – представление результатов, подготовка графических материалов;

М.Н. Костомахин – создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование, ресурсы;

Н.А. Петрищев – разработка методологии исследований

Конфликт интересов

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

Статья поступила 22.04.2025, после рецензирования и доработки 23.10.2025; принята к публикации 27.10.2025

10. Kataev Yu.V., Gerasimov V.S., Tishaninov I.A., Mordasova M.S. Modern trends in improving the engineering service of agroindustrial complex. *Machinery Technical Service*. 2022;3:74-82. (In Russ.)

11. Dorokhov A.S., Kataev Y.V., Kostomakhin M.N., Petrishchev N.A., Pestryakov E.V., Sayapin A.S. Management of the technical condition of agricultural machinery using digital technologies. *Rossiiskaia selskokhoziaistvennaia nauka*. 2024;5:51-56. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S2500262724050102>

Author Information

Yuri V. Kataev¹, CSc (Eng), Associate Professor, Lead Research Engineer; ykataev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0832-3608>; Scopus Author ID: 57209744442

Aleksandr S. Sayapin², Junior Research Engineer; comaconcsas@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6527-780X>

Efim V. Pestryakov³, Junior Research Engineer; unlimited-007@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7399-9906>; Scopus Author ID: 57536298300

Mikhail N. Kostomakhin⁴, CSc (Eng), Lead Research Engineer; redizdat@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1126-7520>; Scopus Author ID: 57536298400

Nikolai A. Petrishchev⁵, CSc (Eng), Lead Research Engineer; gosniti14@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3608-5408>

^{1, 2, 3, 4, 5} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5, 1st Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, Russian Federation

Author Contributions

Yu.V. Kataev – conceptualization;

A.S. Sayapin – validation, writing – original draft;

E.V. Pestryakov – presentation of results, visualization;

M.N. Kostomakhin – writing – review and editing of the manuscript, resources;

N.A. Petrishchev – methodology.

Conflict of interests

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

Received 22.04.2025; Revised 23.10.2025; Accepted 27.10.2025

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.311

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-92-100>



Влияние параметров нагрузки и линии электропередачи на качество электрической энергии

Т.А. Мамедов¹, В.И. Загинайлов^{2✉}, А.Ю. Шелягина³, О.В. Лештаев⁴, Д.С. Карлаков⁵

¹ ООО «Объединенная электросетевая компания» (ООО «ОЭСК»); г. Москва, Россия

^{2,3,4,5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

¹ mta020593@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4914-0149>

² vzaginajlov@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X>

³ ash4002@mail.ru

⁴ leshtaev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6066-1087>

⁵ karlakov@rgau-msha.ru

Аннотация. Отклонение напряжения от номинального значения негативно влияет на параметры и режимы работы электрооборудования сельскохозяйственных потребителей электрической энергии. Отклонение напряжения определяется приближенно, по продольной составляющей падения напряжения в проводах линии электропередачи (ЛЭП). Целью исследований являлась оценка влияния заданных параметров проводов ЛЭП и изменяемых параметров нагрузки на параметры работы электроэнергетической системы и определение допустимого отклонения напряжения электропитания (допустимой потери напряжения в проводах ЛЭП) через параметры источника электроснабжения, проводов ЛЭП и нагрузки. Исследования проведены с использованием основ расчета линейных электрических цепей переменного тока в электроэнергетической системе, состоящей из источника тока низкого напряжения – силового трансформатора 10/0,4 кВ с симметричной нагрузкой, расположенной в конце трехфазной ЛЭП с глухозаземленной нейтралью. Установлено, что параметры нагрузки и проводов ЛЭП оказывают непосредственное влияние на полное сопротивление системы и обратно пропорциональное – на ток системы, опосредованно через ток системы влияют на параметры ее работы, в том числе на потери напряжения в ЛЭП и отклонение напряжения электропитания. Предложено устанавливать отклонения напряжения электропитания по нормативной потере напряжения в проводах ЛЭП, определяемой по вольтамперной характеристике источника переменного тока низкого напряжения при заданных параметрах проводов ЛЭП (полном сопротивлении и их коэффициенте мощности), полном сопротивлении нагрузки и ее коэффициенте мощности, приравненном коэффициенту мощности проводов ЛЭП ($\cos \varphi_n = \cos \varphi_{\text{л}}$).

Ключевые слова: качество электрической энергии; ЛЭП; отклонение напряжения; потери напряжения; падение напряжения; коэффициент мощности; активное и индуктивное сопротивления; полное сопротивление

Для цитирования: Мамедов Т.А., Загинайлов В.И., Шелягина А.Ю., Лештаев О.В., Карлаков Д.С. Влияние параметров нагрузки и линии электропередачи на качество электрической энергии // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 6. С. 92-100. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-92-100>

ORIGINAL ARTICLE

Impact of load and transmission line parameters on power quality

T.A. Mamedov¹, V.I. Zaginailov^{2✉}, A.Yu. Shelyagina³, O.V. Leshtaev⁴, D.S. Karlaikov⁵¹ United Electric Grid Company LTD, Moscow, Russia^{2,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev agricultural Academy, Moscow, Russia¹ mta020593@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4914-0149>² energo-viz@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X>³ ash4002@mail.ru⁴ leshtaev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6066-1087>⁵ karlaikov@rgau-msha.ru

Abstract. Voltage deviations from nominal values significantly degrade the performance and operational reliability of electrical equipment in agricultural power systems. Current voltage deviation calculations, often relying solely on the approximate longitudinal component of voltage drop, are frequently imprecise. This research aimed to precisely assess the influence of power line wire and variable load parameters on system operation, and to establish a robust method for determining permissible voltage deviation (or voltage loss) by integrating the characteristics of the power source, the transmission line, and the load. The study employed fundamental AC linear circuit calculations on a simulated system: a 10/0.4 kV transformer supplying a symmetrical load via a three-phase line with a solidly grounded neutral. The authors established that load and power line parameters directly influence total system impedance. This impedance, inversely proportional to the system current, subsequently dictates critical operational parameters such as voltage loss and supply voltage deviation. Consequently, they propose a method to determine supply voltage deviation based on the normative voltage loss in the power line wires. This approach utilizes the volt-ampere characteristic of a low-voltage AC source, integrating the total impedance and power factor of both the power line and the load, specifically when the power factor of the load matches that of the power line ($\cos \varphi_{\text{н}} = \cos \varphi_{\text{л}}$).

Keywords: electric power quality; power line; voltage deviation; voltage loss; voltage drop; power factor; active and inductive resistance; total impedance

For citation: Mamedov T.A., Zaginailov V.I., Shelyagina A.Yu., Leshtaev O.V., Karlaikov D.S. Impact of load and transmission line parameters on power quality. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(6):92-100 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-92-100>

Введение

Отклонение показателей качества электрической энергии (ПКЭ) от номинальных негативно влияет на параметры работы электрооборудования сельскохозяйственных потребителей электрической энергии (ЭЭ) [1, 2], на качество и количество производимой сельскохозяйственной продукции [3]. ПКЭ также влияют и на параметры работы электрооборудования систем электроснабжения [4], в том числе с возобновляемыми источниками ЭЭ [5].

Одним из основных ПКЭ в сельских электрических сетях можно считать отклонение напряжения питания на зажимах электроприемников¹. По отношению к нагрузке это алгебраическая разность действующего значения $U_{\text{н}}$ и номинального падения напряжений $U_{\text{ном}}$ на нагрузке:

$$\delta U_{\text{л}} = U_{\text{н}} - U_{\text{ном}}. \quad (1)$$

Оценить нормированное отклонение напряжения в системе электроснабжения можно по нормированной потере напряжения – разности напряжений в начальной и конечной точках линии электропередачи (ЛЭП) в данный момент времени²:

$$\Delta U_{\text{л}} = U_{\text{с}} - U_{\text{н}}, \quad (2)$$

где $U_{\text{с}}$ – напряжение в начальной точке ЛЭП (напряжение источника переменного тока на шинах низкого напряжения трансформатора ТР 10/0,4 кВ); $U_{\text{н}}$ – напряжение в конечной точке ЛЭП, то есть действующее значение падения напряжения на нагрузке.

Определение отклонения напряжения электропитания и потери напряжения в ЛЭП по формулам (1) и (2) не проводится, так как падение напряжения на нагрузке $U_{\text{н}}$ – неизвестная величина.

Согласно ГОСТ Р 50571.5.52-2011³ оценку отклонения напряжения в электропроводах

¹ ГОСТ Р 54130-2010. Качество электрической энергии. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2012. 40 с.

² ГОСТ Р 54130-2010. Качество электрической энергии. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2012. 40 с.

³ ГОСТ Р 50571. 5.52-2011/МЭК 60364-5-52. Электроустановки низковольтные. Часть 5.52. Выбор и монтаж электрооборудования. Электропроводки. М.: Стандартинформ, 2013 72 с.

низковольтных электроустановок предлагается проводить по падению напряжения в ЛЭП:

$$U_{\text{лп}} = b \cdot I_p \cdot (R_{\text{л}} \cos \varphi_{\text{н}} + X_{\text{л}} \sin \varphi_{\text{н}}), \quad (3)$$

где b – соответственно коэффициент, равный 1 для трехфазных и 2 – для однофазных ЛЭП; I_p – расчетный ток в проводнике ЛЭП, А; $R_{\text{л}}, X_{\text{л}}$ – активное и индуктивное сопротивление проводника ЛЭП соответственно, Ом; $\cos \varphi_{\text{н}}$ – коэффициент мощности нагрузки, в отсутствие точных данных коэффициент мощности принимается равным 0,8 ($\sin \varphi_{\text{н}} = 0,6$).

В ГОСТе не указано, как определяется расчетный ток проводника ЛЭП I_p и почему при отсутствии точных данных $\cos \varphi_{\text{н}}$ принимается равным 0,8.

В практических расчетах определение потери напряжения в проводах ЛЭП, в одной из фаз трехфазной симметричной системы с глухозаземленной нейтралью и нагрузкой (рис. 1а), расположенной в конце ЛЭП (в конце участка ЛЭП), осуществляется приближенно, по величине продольной составляющей падения напряжения в проводах ЛЭП, без учета ее поперечной составляющей⁴:

$$\Delta U_{\text{лп}} = I_{\text{н}} \cdot (R_{\text{л}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} + X_{\text{л}} \cdot \sin \varphi_{\text{н}}), \quad (4)$$

где $I_{\text{н}}$ – ток нагрузки, А.

Величина потери напряжения в проводах ЛЭП, определенной по продольной составляющей падения напряжения в проводах ЛЭП $\Delta U_{\text{лп}}$ в соответствии с векторной диаграммой системы (рис. 1б) и выражением (4), равна сумме проекций активной $IR_{\text{л}} \cos \varphi_{\text{н}}$ и реактивной $IX_{\text{л}} \sin \varphi_{\text{н}}$ составляющих падения напряжения в проводах ЛЭП $U_{\text{л}}$ на направление действия падения напряжения на нагрузке $U_{\text{н}}$.

Определение потери напряжения в проводах ЛЭП может проводиться и по видоизмененным выражениям расчета потери напряжения по про-

дольной составляющей падения напряжения (4), например:

$$\Delta U_{\text{лп}} = \frac{S_{\text{н}}}{U_{\text{ном}}} \cdot (R_{\text{л}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} + X_{\text{л}} \cdot \sin \varphi_{\text{н}})$$

$$\text{или } \Delta U_{\text{лп}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot R_{\text{л}} + Q_{\text{н}} \cdot X_{\text{л}}}{U_{\text{ном}}},$$

где $S_{\text{н}}$ – полная мощность нагрузки, $S_{\text{н}} = U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{н}}$; $P_{\text{н}}$ – активная мощность нагрузки $P_{\text{н}} = U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{н}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}}$; $Q_{\text{н}}$ – реактивная мощность нагрузки $Q_{\text{н}} = U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{н}} \cdot \sin \varphi_{\text{н}}$.

Расчет потери напряжения в ЛЭП по продольной составляющей падения напряжения в проводах ЛЭП (4) производится по заданным параметрам проводов ЛЭП ($R_{\text{л}}, X_{\text{л}}$); при отсутствии точных данных – по величине коэффициента мощности нагрузки $\cos \varphi_{\text{н}}$ ($\sin \varphi_{\text{н}}$) и току нагрузки $I_{\text{н}}$, равному номинальному, определенному при номинальном напряжении по заданной или расчетной мощности нагрузки (полной $S_{\text{расч}}$ или активной $P_{\text{расч}}$) соответственно:

$$I_{\text{ном}} = \frac{S_{\text{расч}}}{U_{\text{ном}}} \text{ или } I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{расч}}}{U_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}}}.$$

Следовательно, определение потери напряжения в ЛЭП по продольной составляющей падения напряжения в проводах ЛЭП (4) проводится по величине номинального тока, а не тока электрической сети (системы) [6], при отсутствии точных данных – по величине коэффициента мощности нагрузки.

Цель исследований: оценка влияния заданных параметров проводов ЛЭП и изменяемых параметров нагрузки на параметры работы электроэнергетической системы и определение допустимого отклонения напряжения электропитания (допустимой потери напряжения в проводах ЛЭП) через параметры источника электроснабжения, проводов ЛЭП и нагрузки.

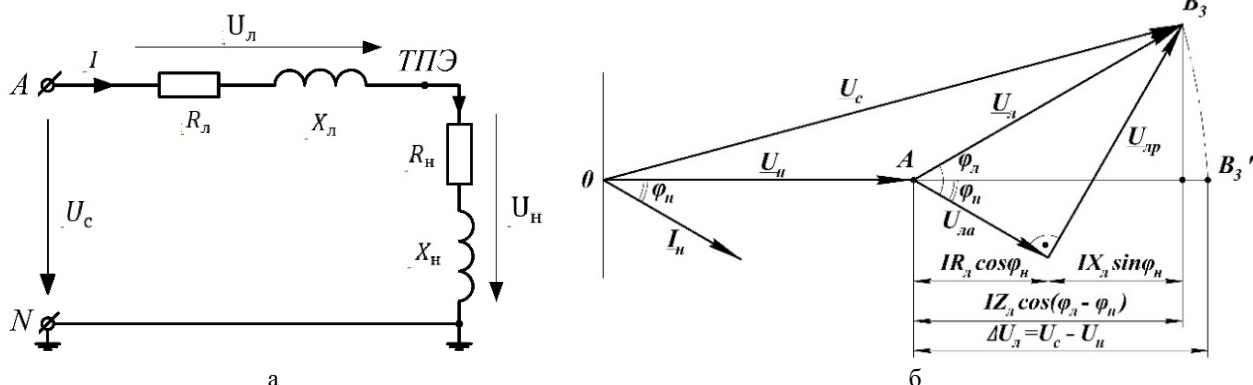


Рис. 1. Схема замещения однофазной ЛЭП (а) и ее векторная диаграмма (б)

Fig. 1. Equivalent diagram of a single-phase power line (a) and its vector diagram (b)

⁴ Лещинская Т.Б., Наумов И.В. Электроснабжение сельского хозяйства. М.: БИБИКОМ-ТРАНСЛОГ, 2015. 656 с.

Материалы и методы

Проведем исследования с использованием основ расчета линейных электрических цепей переменного тока⁵ в электроэнергетической системе, состоящей из источника тока низкого напряжения – силового трансформатора 10/0,4 кВ с симметричной нагрузкой, расположенной в конце трехфазной ЛЭП с глухозаземленной нейтралью.

Электроэнергетическая система состоит из системы электроснабжения (электрической сети) включая источник переменного тока напряжением U_c и однофазную линию электропередачи (ЛЭП) с заданными активным $R_{\text{л}}$ и индуктивным $X_{\text{л}}$ сопротивлениями и изменяемой во времени нагрузкой потребителя ЭЭ, определяемой ее активным $R_{\text{н}}$ и индуктивным $X_{\text{н}}$ сопротивлениями, соединенными последовательно с сопротивлениями ЛЭП.

Воздушные ЛЭП могут быть выполнены проводами различных марок, различного сечения и длины. Параметры проводов ЛЭП (активное и индуктивное сопротивления) определяются на стадии проектирования системы электроснабжения при выборе проводов ЛЭП. Ранее для передачи электроэнергии низкого напряжения в воздушных ЛЭП широко использовались алюминиевые провода А^{6,7}. В настоящее время воздушные ЛЭП рекомендовано выполнять с использованием самонесущих проводов СИП-2⁸. Удельные активное R_0 и индуктивное X_0 сопротивления (Ом/км) проводов определяют в соответствии с ГОСТ и справочниками⁹⁻¹¹ (табл. 1).

С увеличением сечения проводов (увеличением нагрузки) значительно уменьшаются их удельные активные сопротивления, а удельные индуктивные сопротивления проводов практически не изменяются. При расчетах потери напряжения в проводах воздушных ЛЭП можно использовать средние удельные индуктивные сопротивления проводов⁹: для ЛЭП напряжением до 1 кВ $X_0 = 0,31$ Ом/км; при напряжении 6...10 кВ $X_0 = 0,38$ Ом/км. Проведенный анализ изменения сопротивления проводов СИП-2¹⁰ показал, что их среднее удельное индуктивное сопротивление $X_0 = 0,0775$ Ом/км.

В соответствии с величиной удельных сопротивлений проводов и длиной ЛЭП $l_{\text{л}}$, км, определяются активные и индуктивные сопротивления проводов ЛЭП:

$$R_{\text{л}} = R_0 \cdot l_{\text{л}} \text{ и } X_{\text{л}} = X_0 \cdot l_{\text{л}}, \quad (5)$$

а также можно определить полное сопротивление проводов ЛЭП:

$$Z_{\text{л}} = \sqrt{R_{\text{л}}^2 + X_{\text{л}}^2} \quad (6)$$

и коэффициент мощности проводов ЛЭП:

$$\cos \varphi_{\text{л}} = \frac{R_{\text{л}}}{Z_{\text{л}}}. \quad (7)$$

Параметры нагрузки, размещенной в конце ЛЭП (участка ЛЭП), заданы полной мощностью $0 \leq S_i \leq \infty$ и коэффициентом мощности нагрузки $1,0 \geq \cos \varphi_{\text{н}} \geq 0,0$, в соответствии с которыми можно определить полное сопротивление нагрузки:

$$Z_{\text{н}} = \sqrt{R_{\text{н}}^2 + X_{\text{н}}^2}, \quad (8)$$

коэффициент мощности нагрузки:

$$\cos \varphi_{\text{н}} = \frac{R_{\text{н}}}{Z_{\text{н}}}, \quad (9)$$

полное сопротивление системы:

$$Z_{\text{с}} = \sqrt{(R_{\text{л}} + R_{\text{н}})^2 + (X_{\text{л}} + X_{\text{н}})^2}. \quad (10)$$

и коэффициент мощности системы:

$$\cos \varphi_{\text{с}} = \frac{R_{\text{с}}}{Z_{\text{с}}} = \frac{R_{\text{л}} + R_{\text{н}}}{Z_{\text{с}}}, \quad (11)$$

где $R_{\text{с}}$ – активное сопротивление системы, Ом.

Результаты и их обсуждение

Для достижения поставленной цели определим параметры проводов ЛЭП и нагрузки через их полные сопротивления и коэффициенты мощности. Согласно (7) активное сопротивление проводов ЛЭП $R_{\text{л}} = Z_{\text{л}} \cdot \cos \varphi_{\text{л}}$, а индуктивное $X_{\text{л}} = Z_{\text{л}} \cdot \sin \varphi_{\text{л}}$. Согласно (9) активное сопротивление нагрузки $R_{\text{н}} = Z_{\text{н}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}}$, а индуктивное $X_{\text{н}} = Z_{\text{н}} \cdot \sin \varphi_{\text{н}}$. Подставив полученные выражения в (10) и выполнив преобразования, получим зависимость полного сопротивления системы ($Z_{\text{с}}$) как от величины полных сопротивлений нагрузки и их коэффициентов

⁵ Ляпин В.Г., Загинайлов В.И., Нормов Д.А. Теоретические основы электротехники: Учебное пособие. М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2024. 135 с. <https://doi.org/10.26897/978-5-9675-2027-3-2024-135>.

⁶ ГОСТ 839-2019. Межгосударственный стандарт. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 43 с.

⁷ РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2002. 149 с.

⁸ ТУ 16-705.500-2006. Провода самонесущие изолированные и защищенные для воздушных линий электропередачи. Технические условия. Издательство ООО ВНИИИКИП, 2006. 13 с.

⁹ Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов. М.: Издательство «Мастерство», 2002. 320 с.

¹⁰ ТУ 16-705.500-2006. Провода самонесущие изолированные и защищенные для воздушных линий электропередачи. Технические условия. Издательство ООО ВНИИИКИП, 2006. 13 с.

мощности, так и от величины полных сопротивлений проводов ЛЭП и их коэффициентов мощности:

$$Z_c = \sqrt{Z_{\text{л}}^2 + Z_{\text{н}}^2} + \sqrt{2 \cdot Z_{\text{л}} \cdot Z_{\text{н}} \cdot (\cos \varphi_{\text{л}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} + \sin \varphi_{\text{л}} \cdot \sin \varphi_{\text{н}})} \quad (12)$$

Формулу (12) положим в основу алгоритма определения параметров режимов системы включая отклонение напряжения электропитания, где действующее значение тока электроэнергетической системы (проводов ЛЭП, нагрузки) –

$$I = \frac{U_c}{Z_c}, \quad (13)$$

действующее значение падения напряжения на нагрузке –

$$U_{\text{н}} = I \cdot Z_{\text{н}} = \frac{U_c \cdot Z_{\text{н}}}{Z_c}, \quad (14)$$

действующее значение падения напряжения в проводах ЛЭП –

$$U_{\text{л}} = I \cdot Z_{\text{л}} = \frac{U_c \cdot Z_{\text{л}}}{Z_c}. \quad (15)$$

Относительные нормативные потери напряжения в проводах ЛЭП ($\Delta U_{\text{л}}, \%$) с учетом продольной составляющей падения напряжения в проводах $\Delta U_{\text{л1}}$ (4) и падения напряжения в проводах ЛЭП (3,15) определим по выражению:

$$\Delta U_{\text{л}} \% = \frac{\Delta U_{\text{л}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%. \quad (16)$$

Нормативное относительное отклонение напряжения –

$$\delta U_{\text{л}} \% = \frac{\delta U_{\text{л}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%. \quad (17)$$

Ошибка определения потери напряжения в проводах ЛЭП, определяемой по продольной составляющей падения напряжения в проводах ЛЭП, по сравнению с нормативным значением потери напряжения –

$$\Delta U_{\text{л1}} \% = \frac{\Delta U_{\text{л}} - \Delta U_{\text{л1}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%. \quad (18)$$

При заданных на стадии проектирования системы электроснабжения значениях полного сопротивления и коэффициента мощности проводов ЛЭП вначале определим изменение полного сопротивления системы и параметры режимов ее работы при заданном полном сопротивлении нагрузки $Z_{\text{н}} = \text{const}$ и изменении ее коэффициента мощности в диапазоне $0,0 \leq \cos \varphi_{\text{н}} \leq 1,0$.

Для наглядности расчет отклонения напряжения электропитания (потери напряжения в проводах ЛЭП) произведем при согласованном режиме работы нагрузки с ЛЭП, при равенстве полных мощностей,

выделяемых на нагрузке и в проводах ЛЭП и определяемых через равенство полных сопротивлений нагрузки и проводов ЛЭП ($Z_{\text{н}} = Z_{\text{л}} = \text{const}$), при изменении коэффициента мощности нагрузки от $\cos \varphi_{\text{н}} = 0,0$ до $\cos \varphi_{\text{н}} = 1,0$ и постоянном коэффициенте мощности проводов ЛЭП $\cos \varphi_{\text{л}} = \text{const}$.

Количественные параметры работы энергетической системы (рис. 1а) при согласованном режиме работы определим при напряжении на шинах трансформатора $U_c = 230$ В, равных полных сопротивлениях нагрузки и проводов ЛЭП $Z_{\text{н}} = Z_{\text{л}} = 1$ Ом, постоянном коэффициенте мощности провода ЛЭП $\cos \varphi_{\text{л}} = 0,5$ ($\varphi_{\text{л}} = 60^\circ$) и изменении коэффициента мощности нагрузки ($\varphi_{\text{н}}$ – фазового угла полного сопротивления нагрузки) от 90° до 0° , через 30° (рис. 2а).

Определение параметров режимов при согласованной работе системы проведем по предложенному алгоритму (13)-(18). В соответствии с формулой (12) определим величину полного сопротивления системы в четырех точках.

Точка B_1 . При $\varphi_{\text{н}} = 90^\circ$, $\cos \varphi_{\text{н}} = 0$ и с учетом равенства полного и индуктивного сопротивлений нагрузки $Z_{\text{н}} = R_{\text{н}}$ получим полное сопротивление электрической сети (системы), равное геометрической сумме полных сопротивлений проводов ЛЭП и нагрузки (рис. 2а):

$$Z_{\text{с1}} = \sqrt{Z_{\text{л}}^2 + X_{\text{н}}^2 + 2 \cdot Z_{\text{л}} \cdot X_{\text{н}} \cdot \sin \varphi_{\text{л}}}. \quad (19)$$

Получили $Z_{\text{с1}} = 1,93$ Ом (отрезок OB_1).

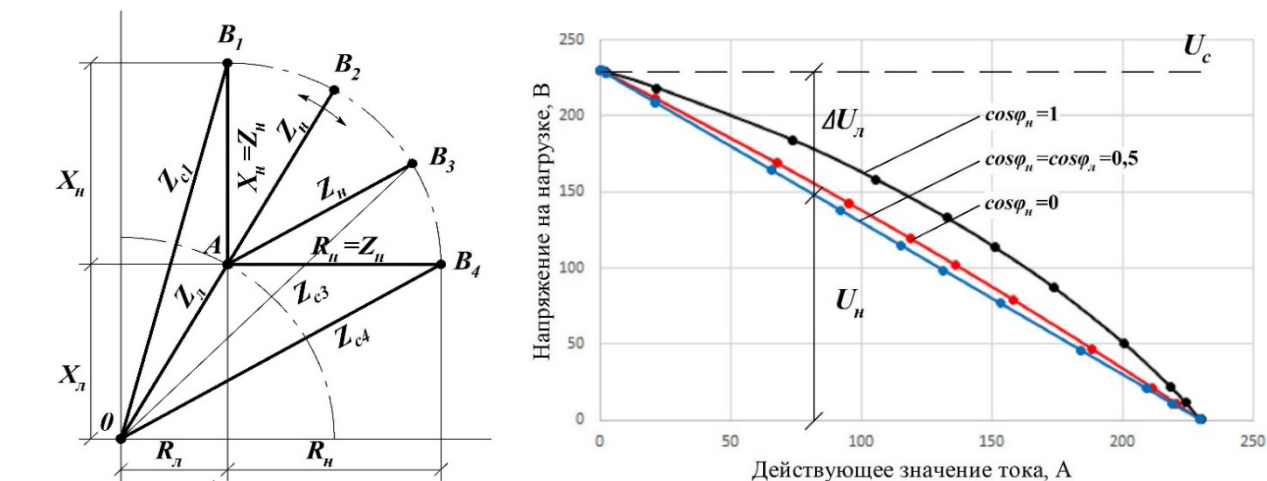
Отрезок OB_1 совместно с отрезком OA (полное сопротивление проводов ЛЭП) и отрезком AB_1 (полное сопротивление нагрузки) образует треугольник полных сопротивлений системы OAB_1 . Потери напряжения в проводах ЛЭП определяются по выражению $\Delta U_{\text{л}} = I \cdot Z_{\text{л}} \cdot \sin \varphi_{\text{л}}$. При этом направление реактивной составляющей падения напряжения в проводах ЛЭП $U_{\text{л}}$ совпадает с направлением падения напряжения на нагрузке $U_{\text{н}}$ (рис. 3а).

Точка B_2 . При $\varphi_{\text{н}} = 60^\circ$, $\cos \varphi_{\text{н}} = \cos \varphi_{\text{л}} = 0,5$ полное сопротивление системы $Z_{\text{с2}}$ максимально и равно алгебраической сумме полных сопротивлений проводов ЛЭП и нагрузки, отрезок OB_2 представляет собой прямую линию (рис. 2а):

$$Z_{\text{с2}} = \sqrt{Z_{\text{л}}^2 + Z_{\text{н}}^2 + 2 \cdot Z_{\text{л}} \cdot Z_{\text{н}} \cdot \cos \varphi_{\text{л}}} = Z_{\text{л}} + Z_{\text{н}}. \quad (20)$$

Получили $Z_{\text{с2}} = 2$ Ом.

Отрезок OB_2 состоит из двух полных сопротивлений проводов ЛЭП (отрезок OA) и нагрузки (отрезок AB_2). Потери напряжения в проводах ЛЭП определяются по выражению $\Delta U_{\text{л}} = I \cdot Z_{\text{л}}$, а направление падения напряжения в проводах ЛЭП совпадает с направлением падения напряжения на нагрузке (рис. 3б).



a

6

Рис. 2. Векторная диаграмма изменения полного сопротивления системы при $Z_{\text{н}} = Z_{\text{л}} = 1$ Ом (а) и ее вольт-амперная характеристика (б)

Fig. 2. Vector diagram of the change in the total resistance of the system, when $Z_{\text{н}} = Z_{\text{л}} = 1$ Ом (а) and its volt-ampere characteristic (б)

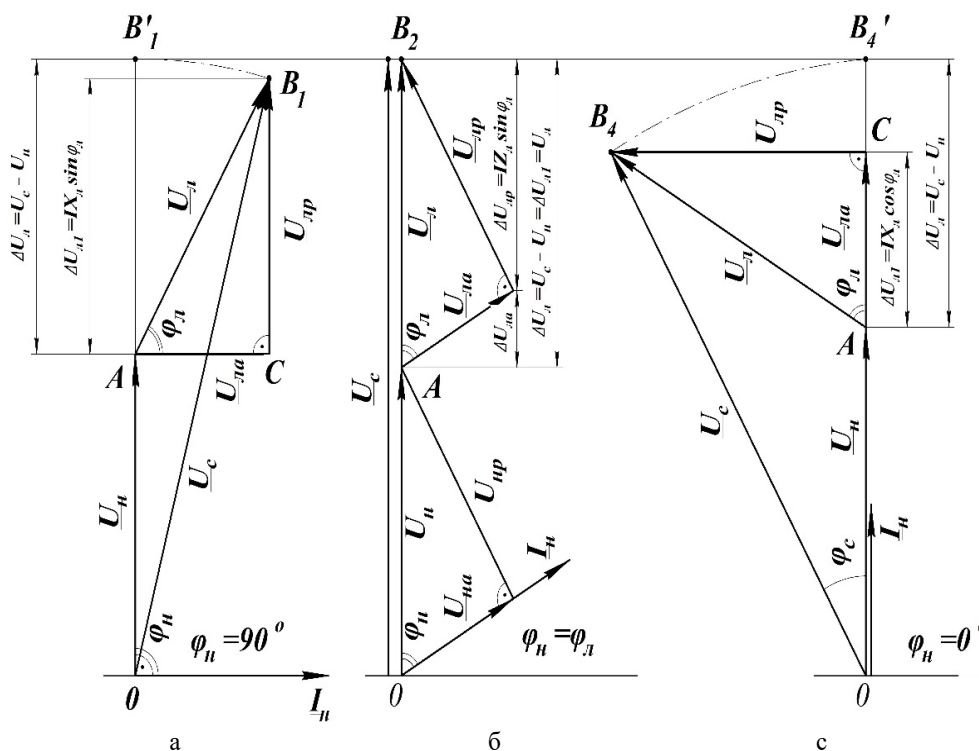


Рис. 3. Векторные диаграммы тока и напряжений системы при $\cos \varphi_{\text{н}} = 0$ (а); $\cos \varphi_{\text{н}} = \cos \varphi_{\text{л}}$ (б); $\cos \varphi_{\text{н}} = 1$ (в)

Fig. 3. Vector diagrams of current and voltage of the system at $\cos \varphi_{\text{н}} = 0$ (а); $\cos \varphi_{\text{н}} = \cos \varphi_{\text{л}}$ (б); $\cos \varphi_{\text{н}} = 1$ (в)

Точка B_3 . При $\varphi_{\text{н}} = 30^\circ$, $\cos \varphi_{\text{н}} = 0,866$ получаем модуль полного сопротивления системы, равный 1,93 Ом (рис. 2а). Отрезок OB_3 совместно с отрезком OA (полное сопротивление проводов ЛЭП) и отрезком AB_3 (полное сопротивление нагрузки) образует треугольник полных сопротивлений системы OAB_3 . Потери напряжения в проводах ЛЭП определяют по выражению (12), а вектор падения напряжения в проводах ЛЭП опережает вектор падения напряжения на нагрузке на угол $\varphi_{\text{л}} - \varphi_{\text{н}}$ (рис. 1б).

Точка B_4 . При $\varphi_{\text{н}} = 0^\circ$, $\cos \varphi_{\text{н}} = 1$ и с учетом равенства полного и активного сопротивлений нагрузки $Z_{\text{н}} = R_{\text{н}}$ (рис. 2а) получаем:

$$Z_{\text{с}4} = \sqrt{Z_{\text{л}}^2 + R_{\text{н}}^2 + 2 \cdot Z_{\text{л}} \cdot R_{\text{н}} \cdot \cos \varphi_{\text{л}}}. \quad (21)$$

$Z_{\text{с}4} = 1,73$ Ом. Отрезок OB_4 совместно с отрезком OA (полное сопротивление проводов) и отрезком AB_4 (полное сопротивление нагрузки) образует треугольник полных сопротивлений системы OAB_4 . Потери напряжения в проводах ЛЭП определяются

по выражению: $\Delta U_{\text{л}} = I \cdot Z_{\text{л}} \cdot \cos \varphi_{\text{л}}$, а направление активной составляющей падения напряжения в проводах ЛЭП $U_{\text{ла}}$ совпадает с направлением падения напряжения на нагрузке (рис. 3в).

Величины параметров согласованного режима работы электроэнергетической системы (рис. 1а), полученных по формулам (12)-(18), представлены в таблице.

С помощью Microsoft Excel определим количественные параметры работы электроэнергетической системы (рис. 1а) при варьировании полной мощности нагрузки ($0 \leq S_{\text{н}} \leq \infty$), ее полного сопротивления ($\infty \geq Z_{\text{н}} \geq 0$) и коэффициента мощности нагрузки ($0 \leq \cos \varphi_{\text{н}} \leq 1$) и постоянных значениях напряжения на шинах трансформатора $U_{\text{с}} = 230$ В, полного сопротивления ($Z_{\text{л}} = 1$ Ом) и коэффициента мощности проводов ЛЭП ($\cos \varphi_{\text{л}} = 0,5$ ($\varphi_{\text{л}} = 60^\circ$)).

Результаты расчетов параметров режимов работы электроэнергетической системы от холостого хода ($I = 0$) до тока короткого замыкания ($I = I_{\text{кз}} = \frac{U_{\text{с}}}{Z_{\text{л}}}$) представлены тремя вольт-амперными характеристиками $U_{\text{н}} = f(I)$ (рис. 2б).

В результате проведенного анализа установлено, что параметры нагрузки и проводов ЛЭП оказывают непосредственное влияние на полное сопротивление системы (12, 19-21) и обратно пропорциональное воздействие на значение тока системы (13), опосредованно через ток системы влияют на параметры режимов ее работы (14-18), в том числе на потери напряжения в ЛЭП (2, 15) и отклонение напряжения электропитания потребителя (1).

Влияние параметров нагрузки и проводов ЛЭП на качество передаваемой ЭЭ может быть оценено по вольт-амперным характеристикам (рис. 2б).

При равных коэффициентах мощности нагрузки и мощности проводов ЛЭП ($\cos \varphi_{\text{н}} = \cos \varphi_{\text{л}}$) получаем максимальное значение полного сопротивления системы (20), равное алгебраической сумме полных сопротивлений проводов ЛЭП и нагрузки: $Z_{\text{с2}} = Z_{\text{л}} + Z_{\text{н}}$ (рис. 2а); ток в системе

минимален (табл. 2); определенные по формуле (4) потери напряжения в проводах ЛЭП максимальны, равны между собой и равны нормативной потере напряжения (2) $\Delta U_{\text{л}} = \Delta U_{\text{л1}}$; падение напряжения, определенное по формулам (3) и/или (15), минимально и равно нормативной потере напряжения в проводах ЛЭП $U_{\text{л}} = \Delta U_{\text{л}}$.

Следовательно, ошибка определения потери напряжения по продольной составляющей падения напряжения в проводах ЛЭП по сравнению с нормативным значением потерей напряжения равна нулю (табл. 1). Это объясняется тем, что при $\cos \varphi_{\text{н}} = \cos \varphi_{\text{л}}$ все расчеты производятся по единому выражению $\Delta U_{\text{л}} = I \cdot Z_{\text{л}}$, а $\Delta U_{\text{л}} = \Delta U_{\text{л1}} = U_{\text{л}}$. В этот момент полное сопротивление системы равно алгебраической сумме полных сопротивлений проводов ЛЭП и нагрузки ($Z_{\text{с2}} = Z_{\text{л}} + Z_{\text{н}}$) и представляет собой прямую линию (рис. 2а), а треугольник падения напряжения на нагрузке подобен треугольнику падения в проводах ЛЭП (рис. 3б) и $U_{\text{с}} = U_{\text{л}} + U_{\text{н}}$. При отклонении $\cos \varphi_{\text{н}}$ от $\cos \varphi_{\text{л}}$ ошибка определения потери напряжения в проводах ЛЭП по продольной составляющей падения напряжения в проводах ЛЭП по сравнению с нормативной увеличивается, достигая наивысшего значения при максимальном отклонении $\cos \varphi_{\text{н}}$ от $\cos \varphi_{\text{л}}$.

При неравных коэффициентах мощности нагрузки и мощности проводов ЛЭП ($\cos \varphi_{\text{н}} \neq \cos \varphi_{\text{л}}$) полные сопротивления системы, определенные по формулам (19) и (21), снижаются по сравнению с полным сопротивлением системы (формула 20) и равны геометрическим суммам полных сопротивлений проводов ЛЭП и нагрузки (рис. 2б); ток в системе повышается (табл. 2). Потери напряжения в проводах ЛЭП относительно потерь напряжения, определенных при $\cos \varphi_{\text{н}} = \cos \varphi_{\text{л}}$, снижаются.

Потери напряжения, определенные по ГОСТ Р 54130-2010 (2), выше, чем определенные по приближенной формуле (4): $\Delta U_{\text{л}} > \Delta U_{\text{л1}}$. Падение напряжения, определенное по формулам (3), (15), при этом увеличивается и не является равным потере напряжения в проводах ЛЭП.

Таблица

Результаты расчета влияния коэффициента мощности нагрузки на параметры электроэнергетической системы

Table

Results of the analysis of the load power factor impact on the power system parameters

Параметры системы и нагрузки	Параметры электроэнергетической системы при согласованном режиме ее работы							
$\cos \varphi_{\text{н}}$	$Z_{\text{с}}$	$I, \text{А}$	$U_{\text{н}}, \text{В}$	$U_{\text{л}}, \text{В}$	$\Delta U_{\text{л}}, \text{В}$	$\Delta U_{\text{л}}, \%$	$\Delta U_{\text{л1}}, \text{В}$	$\Delta U_{\text{л1}}, \%$
0,000	1,93	119,2	119,2	119,2	110,8	50,4	103,2	3,5
$\cos \varphi_{\text{л}}$	2,0	115,0	115,0	115,0	115,0	52,3	115,0	0,0
0,866	1,93	119,2	119,2	119,2	110,8	50,4	103,2	3,5
1,000	1,73	132,90	132,90	132,90	97,1	44,1	66,5	13,9

При изменении $\cos \varphi_n$ от 0 до 1 ($0 \leq \cos \varphi_n \leq 1$) вектор полного сопротивления нагрузки поворачивается на 90° по часовой стрелке (рис. 2а), что приводит к повороту вектора тока нагрузки (системы, проводов ЛЭП) против часовой стрелки на 90° (рис. 3) и повороту треугольника напряжений проводов ЛЭП (АСВ) вокруг точки А против часовой стрелки на 90° (рис. 3).

В соответствии с разработанной методикой влияние параметров нагрузки и проводов ЛЭП на качество передаваемой энергии оценивается по вольт-амперной характеристике (ВАХ) источника переменного тока – силовых трансформаторов ТР 10/0,4 при заданных значениях напряжения источника переменного тока на шинах трансформатора ($U_c = 230$ В), удельных сопротивлений (активного R_0 и индуктивного X_0 , Ом/км), длины (l_n , км) проводов ЛЭП, коэффициентов мощности нагрузки в диапазоне ($0 \leq \cos \varphi_n \leq 1$) и при изменении полной мощности нагрузки в диапазоне $\infty \geq S_n \geq 0$, то есть соответственно сопротивлению нагрузки в диапазоне $\infty \geq Z_n \geq 0$.

Разработанную методику определения потери напряжения в проводах ЛЭП (отклонения напряжения питания) можно использовать для выбора сечения проводов ЛЭП по заданной (расчетной) полной

мощности объекта электроснабжения и/или для оценки влияния параметров нагрузки и проводов ЛЭП на качество электрической энергии.

Пример определения потери напряжения в ЛЭП, выполненной проводом СИП-23 $\times 50+1 \times 50$, в диапазоне нагрузки от тока холостого хода $I = I_{xx} = 0$ до тока короткого замыкания $I = I_{xx} = \frac{U_c}{Z_n} = 356$ А, при заданных коэффициентах мощности нагрузки $\cos \varphi_n = \cos \varphi_n = 0,992$, $\cos \varphi_n = 0,6$ и $\cos \varphi_n = 1,0$ показан на рисунке 4а.

Пример определения допустимого тока нагрузки (допустимой мощности нагрузки) по допустимому отклонению напряжения и/или допустимой потере напряжения в ЛЭП, выполненной проводами СИП-2 различного сечения, представлен на рисунке 4б.

Допустимый ток нагрузки определен при допустимом относительном отклонении напряжения $\delta U_n \% = -10\%$, в точке передачи ЭЭ потребителю¹¹, при номинальном фазном напряжении на шинах низкого напряжения трансформатора ТР 10/0,4 кВ $U_c = 230$ В и номинальном фазном напряжении на нагрузке $U_{ном} = 220$ В¹².

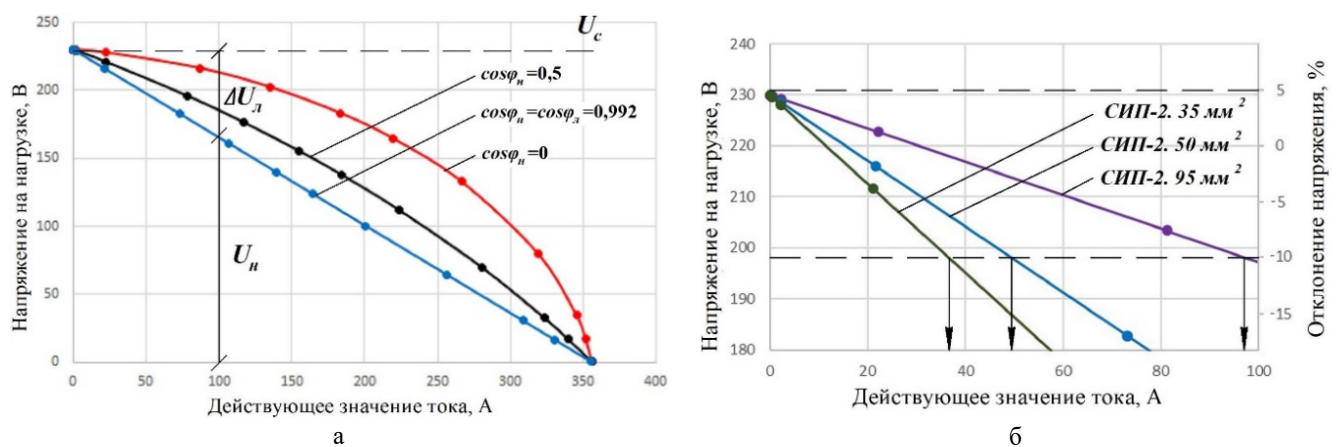


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика проводов СИП 2:

а) $\cos \varphi_n = 0$; $\cos \varphi_n = \cos \varphi_n$ и $\cos \varphi_n = 1,0$; б) $\cos \varphi_n = \cos \varphi_n$

Fig. 4. Volt-ampere characteristic of self-supporting insulated wires SIP 2:

а) $\cos \varphi_n = 0$; $\cos \varphi_n = \cos \varphi_n$ and $\cos \varphi_n = 1,0$; б) $\cos \varphi_n = \cos \varphi_n$

Выводы

1. Оценку влияния параметров нагрузки и линии электропередачи по качеству ЭЭ в однофазной ЛЭП трехфазной симметричной системы с нейтральным проводником и нагрузкой, расположенной в конце ЛЭП, питаемой от силового трансформатора ТР

10/0,4 кВ, предлагается проводить по вольт-амперной характеристике источника переменного тока (силового трансформатора ТР 10/0,4 кВ) при заданных постоянных параметрах полного сопротивления проводов ЛЭП и их коэффициента мощности, при изменении полного сопротивления нагрузки (полной мощности

¹¹ ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 27 с.

¹² ГОСТ 21128-83 Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения до 1000 В. М.: Издательство стандартов, 1995. 5 с

нагрузки) и изменении ее коэффициента мощности от нуля до единицы.

2. Определение отклонения напряжения электропитания предлагается проводить при коэффициенте мощности нагрузки, равном коэффициенту

мощности проводов ЛЭП ($\cos \varphi_n = \cos \varphi_n$), то есть по величине максимальной нормативной потери напряжения в проводах ЛЭП и/или по минимальному падению напряжения в проводах ЛЭП.

Список источников

1. Исаева О.А. Обзор влияния уровня напряжения на работу электрооборудования и электроприемников // Вестник науки. 2025. Т. 4, № 2. С. 662-665. EDN: CVEXQV
2. Турдуев И.Э. Качество электроэнергии и влияние электроэнергии на работу электроприемников // Бюллетень науки и практики. 2024. Т. 10, № 2. С. 359-364. EDN: QPUQZU
3. Ефременко В.М., Савинкина О.А., Наумкин Р.Б. Анализ потерь напряжения в распределительных электрических сетях // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2010. № 3 (79). С. 69-72. EDN: MQHKSU
4. Наумов А.А. Обеспечение требуемого качества электрической энергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22, № 1. С. 85-92. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92>
5. Лештаев О.В., Стушкина Н.А., Загинайлов В.И. Анализ показателей качества электроэнергии в системах электропитания с сетевыми солнечными электростанциями малой мощности // Международный технико-экономический журнал. 2021. № 5. С. 48-53. EDN: ZMGGEV
6. Загинайлов В.И., Мамедов Т.А., Лештаев О.В., Манько В.Э. Определение качества и энергоэффективности передачи электрической энергии низкого напряжения // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 1. С. 80-88. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-80-88>

Информация об авторах

- ¹ Мамедов Тимур Азерович, советник генерального директора; mta020593@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4914-0149>
- ² Загинайлов Владимир Ильич, д-р техн. наук, профессор; vzaginajlov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X>; SPIN-код: 5230-0756
- ³ Шелягина Алена Юрьевна, студент; ash4002@mail.ru
- ⁴ Лештаев Олег Валерьевич, канд. техн. наук, доцент; oleg-leshtae@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6066-1087>; SPIN-код: 1803-2881
- ⁵ Карлаков Дмитрий Сергеевич, аспирант, ассистент; karlakov@rgau-msha.ru; SPIN-код: 4331-3870
- ¹ ООО «Объединенная электросетевая компания» (ООО «ОЭСК»); 115114, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Дербеневский переулок, 5
- ^{2, 3, 4, 5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

Вклад авторов

Т.А. Мамедов – формулирование основной концепции исследований;
В.И. Загинайлов – описание результатов и формирование выводов исследований, подготовка начального варианта текста;
А.Ю. Шелягина – разработка графических зависимостей;
О.В. Лештаев – разработка методологии исследований;
Д.С. Карлаков – представление результатов, подготовка графических материалов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 17.07.2025, после рецензирования и доработки 07.11.2025; принята к публикации 17.11.2025

References

1. Isaeva O.A. Review of the influence of voltage level on the operation of electrical equipment and electrical receivers. *Science Bulletin*. 2025;4(2):662-665. (In Russ.)
2. Turduev I.E. The quality of electricity and the effect of electricity on the operation of electric receivers. *Bulletin of Science and Practice*. 2024;10(2):359-364. (In Russ.)
3. Efremenko V.M., Savinkina O.A., Naumkin R.B. Analysis of voltage losses in power distribution networks. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2010;3:69-72. (In Russ.)
4. Naumov A.A. The required quality of electrical energy provision. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(1):85-92. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92>
5. Lestayev O.V., Stushkina N.A., Zaginaylov V.I. Analysis of power quality indicators in power supply systems with grid-connected solar power plants of small capacity. *International Technical and Economic Journal*. 2021;5:48-53. (In Russ.)
6. Zaginaylov V.I., Mamedov T.A., Lestayev O.V., Manko V.E. Identification of quality and energy efficiency of low-voltage power transmission. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(1):80-88. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-80-88>

Author Information

- Timur A. Mamedov¹, Advisor to General Director; mta020593@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4914-0149>
- Vladimir I. Zaginailov², DSc (Eng), Professor; vzaginajlov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X>
- Alena Yu. Shelyagina³, student; ash4002@mail.ru
- Oleg V. Leshtayev⁴, CSc (Eng), Associate Professor; oleg-leshtayev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6066-1087>
- Dmitry S. Karlakov⁵, postgraduate student, Assistant Professor; karlakov@rgau-msha.ru
- ¹ United Electric Grid Company LTD; 115114, Russian Federation, Moscow, 1st Derbenevsky Lane, 5
- ^{2, 3, 4, 5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Street, 49

Author Contribution

T.A. Mamedov – conceptualization;
V.I. Zaginailov – formal analysis; validation, writing – original draft;
A.Yu. Shelyagina – visualization;
O.V. Leshtayev – methodology;
D.S. Karlakov – validation, visualization.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest regarding the publication of this article and are equally responsible for plagiarism

Received 17. 07.2025; Revised 07.11.2025; Accepted 17.11.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.314

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-101-108>

Способы снижения уровня электромагнитных помех статических преобразователей электроэнергии

О.В. Григораш¹, **Д.А. Нормов²**, **А.В. Савенко³**, **Е.А. Денисенко⁴**, **В.Л. Болотин⁵**

^{1,4} Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина; Краснодар, Россия

^{2,3,5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Москва, Россия

¹ grigorash61@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3894-3616>

² d.normov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3255-4334>

³ a.savenko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0009-0004-6380-453X>

⁴ Denisenko_88@mail.ru

⁵ bvlener@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-0499-8949>

Аннотация. Статические преобразователи электроэнергии (СПЭ) применяются в системах электроснабжения объектов АПК. Нелинейные силовые полупроводниковые приборы СПЭ во время коммутации создают электромагнитные помехи, которые распространяются по силовым цепям и цепям управления. Помехи приводят к нарушению работы систем управления и защиты энергосистем, выполненных на базе микропроцессорной техники, ухудшению характеристики электротехнических устройств, подключенных к СПЭ, и самих статических преобразователей. Ввиду недостаточной систематизации причин возникновения электромагнитных помех и усложненной методики их расчета затруднена разработка энергоэффективных способов снижения уровня помех СПЭ. Цель исследований – предложить способы и структурно-схемные решения статических преобразователей электроэнергии с пониженным уровнем электромагнитных помех с учетом причин их возникновения. В результате анализа выделили три группы причин возникновения электромагнитных помех по воздействию возмущений, создаваемых источниками электроэнергии, силовыми цепями и системами управления преобразователей. Предложили методику упрощенного расчета напряжения уровня электромагнитных помех, основанной на расчете эквивалентных электрических схем источников помех. Из рассмотренных способов снижения уровня помех предложили наиболее эффективные и реализующие их структурно-схемные решения СПЭ. Установили, что применение трансформаторов со средней точкой и вращающимся магнитным полем позволяет уменьшить количество силовых полупроводниковых приборов (основных источников помех). Результаты данных исследований повысят эффективность предпроектных работ по разработке статических преобразователей электроэнергии с пониженным уровнем электромагнитных помех.

Ключевые слова: системы электроснабжения; статические преобразователи электроэнергии; электромагнитные помехи; электромагнитная совместимость; эквивалентные электрические схемы

Для цитирования: Григораш О.В., Нормов Д.А., Савенко А.В., Денисенко Е.А., Болотин В.Л. Способы понижения уровня электромагнитных помех статических преобразователей электроэнергии // *Агроинженерия*. 2025. Т. 27, № 6. С. 101-108. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-101-108>

ORIGINAL ARTICLE

Ways to reduce electromagnetic interference in static electric power converters

O.V. Grigorash¹, **D.A. Normov²**, **A.V. Savenko³**, **E.A. Denisenko⁴**, **V.L. Bolotin⁵**

^{1,4} Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin; Krasnodar, Russia

^{2,3,5} Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

¹ grigorash61@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3894-3616>

² d.normov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3255-4334>

³ mfsav@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-6380-453X>

⁴ Denisenko_88@mail.ru

⁵ bvlener@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-0499-8949>

Abstract. Static electric power converters (SPEs) are widely used in the power supply systems of agricultural facilities. However, their nonlinear semiconductor power devices generate significant electromagnetic

interference (EMI) during switching. This EMI propagates through power and control circuits, potentially disrupting microprocessor-based control and protection systems, degrading connected electrical devices, and even affecting the SPEs themselves. Current understanding of EMI causes is insufficiently systematized, and existing complex calculation methods hinder the design of energy-efficient EMI reduction solutions. The study aimed to analyze the causes of EMI and propose innovative methods and structural-circuit solutions for SPEs with reduced interference levels. The study systematized EMI causes into three groups based on disturbances originating from electric power sources, power circuits, and converter control systems. The authors introduced a simplified method for calculating EMI voltage levels, based on equivalent circuit analysis of interference sources. Furthermore, the research explored various effective EMI reduction techniques and proposed structural-circuit solutions for SPEs that implement them. These solutions include utilizing transformers with a midpoint and a rotating magnetic field, which effectively reduces the number of power semiconductor devices – the primary sources of interference. The findings will enhance the efficiency of preliminary design work for developing SPEs with significantly reduced electromagnetic interference.

Keywords: power supply systems; renewable energy sources; static electric power converters (SPE); electromagnetic interference (EMI); electromagnetic compatibility; equivalent electrical circuits

For citation: Grigorash O.V., Normov D.A., Savenko A.V., Denisenko E.A., Bolotin V.L. Ways to reduce electromagnetic interference in static electric power converters. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(6):101-108 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-101-108>

Введение

Статические преобразователи электроэнергии (СПЭ) широко применяются в системах электроснабжения (СЭС) АПК, в том числе в системах бесперебойного электроснабжения ответственных потребителей (потребителей первой категории) и в автономных системах электроснабжения, выполненных на возобновляемых источниках энергии. СПЭ, как правило, выполняют две функции: преобразование и стабилизацию параметров электроэнергии [1].

Основными функциональными элементами СПЭ являются нелинейные силовые электронные приборы (транзисторы, тиристоры, диоды), во время коммутации которых происходят скачки напряжения и тока, изменяется их форма, увеличивается длительность переходных процессов, создаются электромагнитные помехи (ЭМП) – электромагнитные поля. Эти помехи распространяются по силовым проводам, по которым передается энергия между функциональными элементами СЭС и СПЭ, по цепям управления и в окружающее пространство. Созданные ЭМП могут привести к нарушению работы систем управления и защиты СЭС, выполненных на базе микропроцессорной техники, ухудшению характеристик электротехнических устройств, подключенных с СПЭ к одному источнику, характеристик потребителей электроэнергии, а также самих источников помех – статических преобразователей [2, 3].

Способы снижения уровня электромагнитных помех, создаваемых СПЭ, представлены в работах отечественных и зарубежных ученых [4-7]. Однако в исследованиях не рассмотрены структурно-схемные решения СПЭ с пониженным уровнем помех.

Можно предположить, что при уменьшении количества приборов в структурно-схемных решениях преобразователей электроэнергии будет наблюдаться снижение уровня ЭМП.

Цель исследований: предложить способы и структурно-схемные решения статических преобразователей электроэнергии с пониженным уровнем электромагнитных помех.

Материалы и методы

При проведении исследований применили классические методы статистической обработки, основ теории силовой преобразовательной техники, сравнительный и логический анализ. Объектом исследований являлись статические преобразователи электроэнергии. Задачи исследований: провести анализ причин возникновения электромагнитных помех и систематизировать их по группам; разработать методику упрощенного расчета уровня ЭМП; по результатам анализа известных способов борьбы с ЭМП предложить структурно-схемные решения СПЭ с пониженным уровнем помех.

Результаты и их обсуждение

При работе силовых электронных приборов СПЭ возникают электромагнитные помехи по следующим причинам:

- коммутация больших токов;
- высокочастотные импульсы, генерируемые схемами управления полупроводниковыми приборами;
- нелинейные и реактивные компоненты силовых схем СПЭ;
- быстрые изменения направлений передачи потоков энергии, приводящие к скачкам напряжений и токов.

При оценке ЭМП, создаваемых полупроводниковыми приборами СПЭ, пользуются понятием электромагнитной совместимости основных функциональных элементов и потребителей электроэнергии системы электроснабжения, включающей в себя, кроме СПЭ, источники электроэнергии.

Электромагнитная совместимость (ЭМС) – это способность системы электроснабжения функционировать, обеспечивать необходимое качество электроэнергии в заданной электромагнитной обстановке и не создавать ЭМП другим техническим средствам [8].

При работе СПЭ в разных режимах уровень ЭМП непрерывно изменяется под воздействием возмущений. Для повышения эффективности предпроектных работ по разработке СПЭ с пониженным уровнем помех данные возмущения систематизировали по трем группам.

В первую группу возмущений включили изменения электрических параметров источников электроэнергии (помимо СПЭ, от этих источников питаются и другие потребители). Напряжение источника питания в нормальных режимах работы может изменяться в пределах $\pm 10\%$ от номинальных значений, а при эксплуатации СПЭ в составе автономных СЭС эти отклонения могут быть больше. Несинусоидальные входные токи СПЭ также вносят искажения в параметры электроэнергии источника.

Ко второй группе возмущений отнесли изменение величины нагрузки. Большие изменения нагрузки (отклонение напряжения больше 10% от номинальных значений) бывают очень редко, в основном в случае, когда источник электроэнергии имеет соизмеримую мощность с нагрузкой. Малые изменения

нагрузки (отклонения меньше 10%) наблюдаются постоянно, так как потребители электроэнергии периодически подключаются или отключаются от источника.

В третью группу возмущений включили возмущения, создаваемые системой управления СПЭ. Работа системы управления синхронизирована с напряжением источника электроэнергии. Для стабилизации напряжения информация о параметрах электроэнергии поступает с выхода преобразователя, эти параметры могут быть нестабильными и иметь искаженную форму. Кроме того, периодически изменяются величина и характер нагрузки. Разброс характеристик силовых полупроводниковых приборов приводит к неточности измерения опорных и ведущих сигналов. Все эти причины являются случайными функциями времени и приводят к изменениям углов управления силовыми полупроводниковыми приборами СПЭ и повышению уровня ЭМП.

При разработке методики упрощенного расчета напряжения уровня ЭМП использовали эквивалентные схемы. Анализ работы этих схем дает возможность изучать ЭМС источников и потребителей ЭМП, уменьшать их уровень путем корректировки структурно-схемных и конструктивных решений СПЭ, используя, в том числе, известные способы борьбы с помехами.

Эквивалентные электрические схемы взаимодействия источника E_{Π} с потребителями U_{Π} ЭМП через емкостные и индуктивные связи в СПЭ приведены на рисунке 1.

Отметим, что монтажная емкость C_M (рис. 1а, б) возникает между соединительными проводами и элементами схемы, а также между ними и корпусом СПЭ.

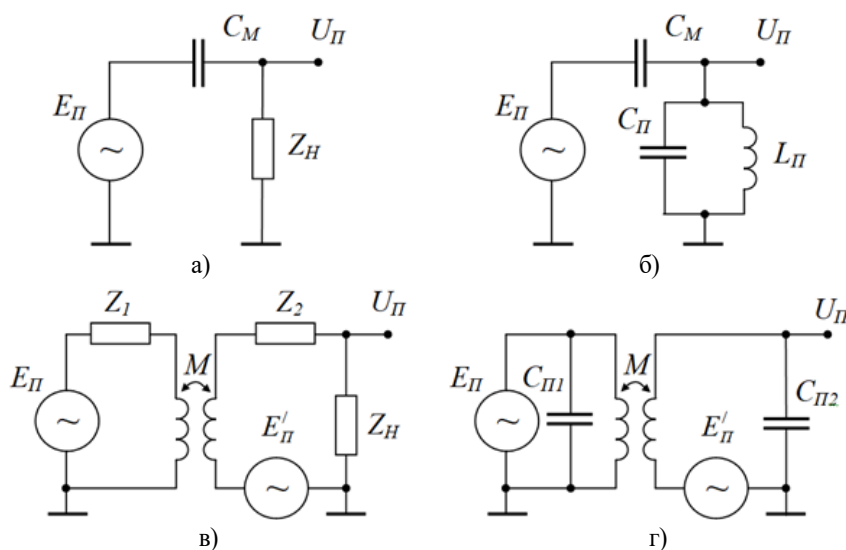


Рис. 1. Эквивалентные электрические схемы емкостного (а, б) и индуктивного (в, г) путей распространения электромагнитных помех

Fig. 1. Equivalent circuits of capacitive (a, b) and inductive (c, d) propagation paths of electromagnetic interference

Полное сопротивление Z_H является нагрузкой для источника электромагнитных помех E_{II} , характеризует параметры схемы СПЭ, на входе которого образуется напряжение помех U_{II} :

$$U_{II} = \frac{E_{II} Z_H}{(Z_H + 1 / j\omega C_M)}, \quad (1)$$

где ω – частота высокочастотного сигнала источника помех E_{II}

Из формулы (1) следует, что величина напряжения помех U_{II} увеличивается с ростом Z_H и C_M .

Если полное сопротивление Z_H имеет емкостной характер (рис. 1б), формула (1) принимает вид:

$$U_{II} = \frac{E_{II} C_M}{C_M + C_{II}}, \quad (2)$$

если выполняется неравенство

$$\frac{1}{\omega C_M} \geq Z_K, \quad (3)$$

где Z_K – сопротивление контура, эквивалентное полному сопротивлению Z_H , определяемое по формуле:

$$Z_K = \frac{1}{\omega C_{II} K_{3K}}, \quad (4)$$

где $K_{3K} = \Delta f_{0,7} / f$ – коэффициент затухания контура; $\Delta f_{0,7}$ – полоса пропускания контура по уровню 0,7 от резонансной частоты f , соответствующей угловой частоте ω .

Тогда величина напряжения помех (рис. 1в) определяется по формуле:

$$U_{II} = \frac{E_{II} Z_H \omega M}{Z_1 Z_2}, \quad (5)$$

где M – взаимная индуктивность.

Таким образом, напряжение помех будет увеличиваться с ростом частоты высокочастотного сигнала источника помех ω , взаимной индуктивности M , входного полного сопротивления источника помех Z_H и будет уменьшаться с увеличением сопротивлений Z_1 и Z_2 .

В случае паразитной (непредвиденной) индуктивной связи двух контуров, имеющих одинаковые частоты (рис. 1з), ток в контуре источника помехи, находящийся под напряжением E_{II} , будет определяться с учетом $Z_K = \omega L_{II}$. Волновое сопротивление напряжения E_{II}' равно последовательному активному сопротивлению контуру $Z_2 = R$. В этом случае $Z_H = Z_K$ и напряжение помех определяются по формуле:

$$U_{II} = \frac{E_{II} K_{CB}}{K_{3K}}, \quad (6)$$

где $K_{CB} = M/L$ – коэффициент вредной связи между индуктивностями контуров; $K_{3K} = R\omega C_{II}$ – коэффициент эквивалентного затухания контуров.

При анализе и расчете эквивалентных схем, приведенных на рисунке 1, вводится коэффициент связи цепей источника и приемника помех $K_{инт}$. Этот коэффициент показывает, какая часть напряжения источника помехи E_{II} содержится в приемнике:

$$K_{инт} = \frac{U_{II}}{E_{II}}. \quad (7)$$

Значение коэффициента связи цепей источника и приемника ЭМП можно получить также, используя формулы (1-4). Значения коэффициента взаимной индуктивности M и монтажной емкости C_M определяются по справочным данным.

Рассмотренная методика может быть использована для всех типов статических преобразователей, применяемых в системах электроснабжения (выпрямителей, инверторов и преобразователей частоты).

При проектировании СПЭ иногда достаточным результатом борьбы с ЭМП является оптимальное расположение функциональных элементов и проводников от источника помех – полупроводниковых приборов.

Большое многообразие вредных связей, трудности их воссоздания в известных технических решениях СПЭ и разные режимы их функционирования не позволяют достаточно точно произвести расчет уровня ЭМП.

Рассмотрим основные способы снижения уровня ЭМП [1, 3, 9], создаваемые полупроводниковыми приборами:

1. Синхронизация работы системы управления полупроводниковыми приборами – коммутация переменных токов – должна осуществляться в момент их минимальных или нулевых значений (при переходе синусоиды через нуль).

2. Применение на входе и выходе статических преобразователей электроэнергии фильтров, способных ослабить помехи на определенных частотах, позволяя «чистым» сигналам проходить далее. Фильтры низких частот изолируют высокочастотные шумы, а фильтры высоких частот уменьшают влияние низкочастотных помех.

3. Встречно-параллельное включение обратных диодов с силовыми полупроводниковыми приборами для снижения уровня перенапряжений, возникающих при их коммутации.

4. Изменение ориентации и разнесение монтажных соединений силовых цепей и цепей управления, исключение пересечения силовых цепей и цепей управления, а также разнесение цепей переменного и постоянного тока.

5. Экранирование – использование проводящих и магнитных материалов, отражающих или

поглощающих электромагнитные волны. Проволочные экраны из медной или алюминиевой проволоки размыкают пути магнитного поля, уменьшая его влияние на электрооборудование. Магнитные экраны поглощают магнитное поле, изолируя устройство от внешних помех.

6. Заземление – защита от статических и индукционных помех.

7. Изоляция компонентов – разделение источников СПЭ и цепей управления ими с целью исключения их взаимовлияния.

Полупроводниковые диоды в неуправляемых схемах выпрямителей создают ЭМП за счет накопления тока в реактивных элементах и практически скачкообразного его уменьшения через диод при его закрытии. Одним из способов снижения мощности высокочастотных колебаний в неуправляемых схемах выпрямителей является уменьшение резонансной частоты и добротности вредного колебательного контура, который получается путем параллельного подключения к диодам последовательной шунтирующей $R_{ш}C_{ш}$ -цепочки. Параметры этого контура определяются по формулам:

$$i(t) \approx I_m e^{-\frac{t}{\tau_3}} \sin \omega t, \quad (8)$$

$$\omega = \sqrt{L_{п}C_{п}}, \quad (9)$$

где τ_3 – постоянная времени затухания; $L_{п}$ и $C_{п}$ – эквивалентные индуктивность и емкость вредного колебательного контура.

Оптимальная емкость шунтирующего конденсатора –

$$C_{ш} \geq \frac{0,16t_{сп}}{R_{ш}}, \quad (10)$$

где $t_{сп}$ – время спада тока во вредном контуре до нуля; $R_{ш}$ – эквивалентное последовательное сопротивление в цепи вредного колебательного контура.

Как правило, в схемах выпрямителей $R_{ш} = 10 \dots 100$ Ом, а $C_{ш}$ имеет значение тысячи пикофард.

Применение рассмотренного способа позволяет в несколько десятков раз снизить уровень ЭМП, возникающих на входных и выходных выводах при работе выпрямителей.

Таким образом, для эффективного снижения уровня ЭМП необходимо учитывать особенности работы СПЭ, исследовать источники помех и выбрать соответствующий способ их снижения.

Определение спектрального состава напряжения и тока на входе и выходе СПЭ позволит обрабатывать вопросы электромагнитной совместимости

функциональных элементов преобразователя на этапе его проектирования и работы в составе системы электроснабжения. С учетом электрических параметров и режимов работы СПЭ можно выбрать рациональный способ снижения уровня ЭМП, в том числе разработать энергоэффективные фильтры, и заложить запасы мощности источников и СПЭ.

Наиболее эффективным способом снижения уровня ЭМП, создаваемого статическими преобразователями электроэнергии, является уменьшение количества основных источников помех – силовых полупроводниковых приборов.

Известным способом уменьшения количества силовых полупроводниковых приборов в составе СПЭ является применение трансформаторов с обмотками, имеющими средние точки. Один из вариантов таких схем приведен на рисунке 2. В данном случае электронный силовой преобразователь ЭСП содержит только два транзистора, преобразующих напряжение постоянного тока в напряжение переменного тока (режим инвертора). СПЭ на трансформаторах со средней точкой имеют повышенные массогабаритные показатели.

Функциональная схема автономного инвертора с промежуточным высокочастотным преобразованием позволяет в несколько раз улучшить массогабаритные показатели СПЭ (рис. 3). Инвертор И посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ) преобразует напряжение источника постоянного тока $U_{ВХ}$ в высокочастотное напряжение (частота преобразования может достигать нескольких десятков кГц), а реверсивный выпрямитель РВ посредством кусочной аппроксимации преобразует его до уровня промышленной частоты [1].

Уровень ЭМП можно понизить применением в составе СПЭ однофазно-трехфазных трансформаторов

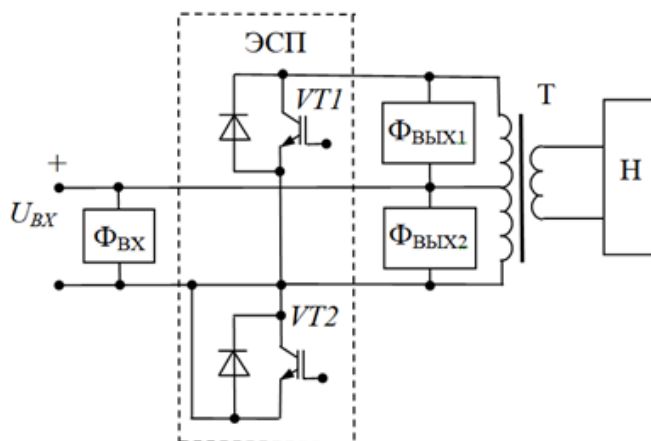


Рис. 2. Функциональная схема автономного инвертора

Fig. 2. Functional diagram of an autonomous inverter

с вращающимся магнитным полем (ТВМП), выполненных на базе электрических машин или тороидальных трансформаторов (рис. 4).

Конструкция трансформатора (ТВМП) позволяет формировать трехфазную симметричную систему напряжений из однофазного напряжения переменного тока, для преобразования напряжения постоянного

тока применяется однофазный инвертор. Рассмотренный СПЭ имеет меньшее количество силовых полупроводниковых приборов и, соответственно, уменьшенный уровень ЭМП.

Гипотеза подтверждена: принимая во внимание особенности работы СПЭ, источники ЭМП и способы их снижения, можно понизить уровень помех.

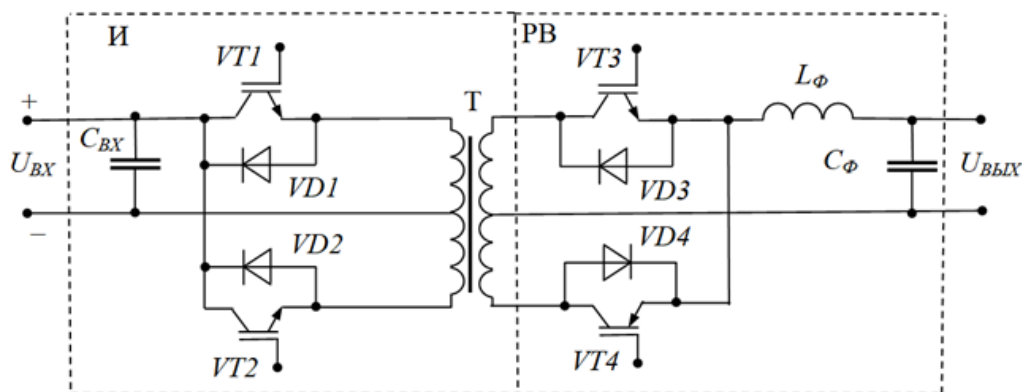


Рис. 3. Функциональная схема автономного инвертора с промежуточным высокочастотным преобразованием

Fig. 3. Functional diagram of an autonomous inverter with intermediate high-frequency conversion

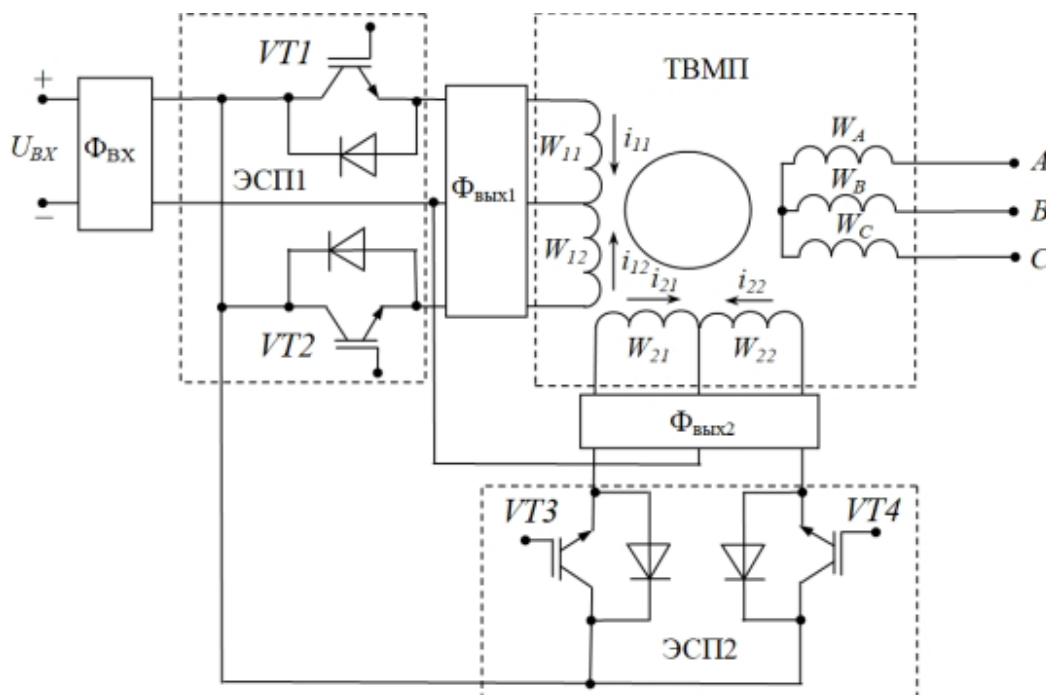


Рис. 4. Функциональная схема трехфазного инвертора на однофазно-трехфазном трансформаторе с вращающимся магнитным полем

Fig. 4. Functional diagram of a three-phase inverter on a single-phase/three-phase transformer with a rotating magnetic field

Выводы

Представленная классификация причин возникновения ЭМП, разработанная методика упрощенного расчета уровня напряжения помех и структурно-схемные решения СПЭ, учитывающие

параметры источников и потребителей электроэнергии сельскохозяйственных предприятий, позволяют повысить эффективность предпроектных работ по разработке СПЭ с пониженным уровнем помех.

Список источников

1. Григораш О.В., Оськин С.В., Денисенко Е.А. и др. Мобильные ветро-солнечные электростанции: состояние, перспективы и особенности проектирования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23, № 1. С. 48-55. <https://doi.org/10.14529/power230105>
2. Yuan L., Zhang J., Liang Z. et al. EMI challenges in modern power electronic-based converters: recent advances and mitigation techniques. *Frontiers in Electronics*. 2023;4:1274258. <https://doi.org/10.3389/felec.2023.1274258>
3. Гизатуллин З.М., Мубаракوف Р.Р. Анализ излучаемых электромагнитных помех от преобразователей электроэнергии в условиях эксплуатации // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14, № 2 (54). С. 29-39. EDN: QOAGMA
4. Кечиев Л.Н., Любомудров А.А., Сахаров М.В. и др. Проблемы конструирования электронной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости // Технологии электромагнитной совместимости. 2020. № 1. С. 18-30. EDN: PPCCZJ
5. Робертс С., Рентюк В. Взгляд на обеспечение требований по ЭМС со стороны блоков питания // Силовая электроника. 2019. № 4 (79). С. 50-53. EDN: BKWHNF
6. Нормов Д.А., Белов С.И., Цедяков А.А. Интеграция Rural smart grids в централизованную электрическую сеть в России // Интеллектуальные системы в аграрном и строительном комплексе: Сборник материалов Международной научно-практической конференции, Орел, 3-4 декабря 2024 г. Орел: Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина, 2024. С. 376-384. EDN: SSDVBO
7. Ali Abou-Elnour. Modeling and characterization of a smart two-direction MOSFET magnetic sensor. *Proceedings. SPIE6166, Smart Structures and Materials 2006: Modeling, Signal Processing, and Control*. 2006:61660I (27 March 2006). <https://doi.org/10.1117/12.639154>
8. Григораш О.В., Коломейцев А.Э., Джибо С. Электромагнитная совместимость функциональных элементов автономных систем электроснабжения // Сельский механизатор. 2021. № 1. С. 32-33. EDN: YLWESP
9. Жданкин В. Подавление электромагнитных помех во входных цепях преобразователей постоянного напряжения // Компоненты и технологии. 2016. № 11. С. 86-98. EDN: ZRTEZT

Информация об авторах

- ¹ Григораш Олег Владимирович, д-р техн. наук, профессор; grigorasch61@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3894-3616>; SPIN-код: 4729-2767
- ² Нормов Дмитрий Александрович, д-р техн. наук, профессор; d.normov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3255-4334>; SPIN-код: 5209-0453
- ³ Савенко Алексей Валентинович, канд. техн. наук, доцент; a.savenko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0009-0004-6380-453X>; SPIN-код: 6169-5845
- ⁴ Денисенко Евгений Александрович, канд. техн. наук; denisenko_88@mail.ru; SPIN-код: 4263-0056
- ⁵ Болотин Владимир Леонидович, соискатель; bvlenner@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-0499-8949>

References

1. Grigorash O.V., Oskin S.V., Denisenko E.A. et al. Mobile wind and solar power plants: state, prospects, and design features. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2023;23;1:48-55. (In Russ.) <https://doi.org/10.14529/power230105>
2. Yuan L., Zhang J., Liang Z. et al. EMI challenges in modern power electronic-based converters: recent advances and mitigation techniques. *Frontiers in Electronics*. 2023;4:1274258. <https://doi.org/10.3389/felec.2023.1274258>
3. Gizatullin Z.M., Mubarakov R.R. Analysis of radiated electromagnetic interference from electric power converters in the workplace. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2022;14(2):29-39. (In Russ.)
4. Kechiev L.N., Lyubomudrov A.A., Sakharov M.V. et al. Problems of designing electronic equipment taking into account electromagnetic compatibility. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestimosti*. 2020;1:18-30. (In Russ.)
5. Roberts S., Rentuk V. Meeting EMC requirements: power supplies' perspective. *Silovaya elektronika*. 2019;4:50-53. (In Russ.)
6. Normov D.A., Belov S.I., Tsedyakov A.A. Integration of Rural smart grids into a centralized electric grid in Russia. *Intellectualnye sistemy v agrarnom i stroitel'nom komplekse*: Proceedings the International scientific and practical conference, Orel, December 3-4, 2024. Orel: Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin, 2024:376-384.
7. Ali Abu-Elnur Modeling and characterization of an intelligent bidirectional magnetic sensor based on a MOS transistor. *Proceedings. Intelligent Structures and Materials 2006. Modeling, Signal Processing, and Control*. 2006:6166. <https://doi.org/10.1117/12.639154>
8. Grigorash O.V., Kolomejcev A.E., Djibo S. Electromagnetic capacity of functional elements of autonomous power supply systems. *Selskiy mekhanizator*. 2021;1:32-33. (In Russ.)
9. Zhdankin V. Suppression of electromagnetic interference in the input circuits of DC voltage converters. *Komponenty i tekhnologii*. 2016;11:86-98. (In Russ.)

Author Information

- Oleg V. Grigorash**¹, DSc (Eng), Professor; grigorasch61@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3894-3616>; Scopus Author ID: 6602105386
- Dmitry A. Normov**², DSc (Eng), Professor; d.normov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3255-4334>; Scopus Author ID: 57209472770
- Alexey V. Savenko**³, CSc (Eng), Associate Professor; mfsav@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-6380-453X>
- Evgeny A. Denisenko**⁴, CSc (Eng); denisenko_88@mail.ru
- Vladimir L. Bolotin**⁵, CSc degree seeker; bvlenner@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-0499-8949>
- ^{1,4} Kuban State Agrarian University named after I.T. Trublin; Kalinina Str. 13, Krasnodar, 350044, Russian Federation

^{1,4} Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина; 350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, 13

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

^{2,3,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Timiryazevskaya Str., 49, Moscow, 127434, Russian Federation

Вклад авторов

Григораш О.В. – разработка методики расчета помех и структурно-схемных решений статических преобразователей электроэнергии, редактирование рукописи;

Нормов Д.А. – концептуализация информации о способах борьбы с электромагнитными помехами, разработка методологии исследований, окончательное редактирование рукописи;

Савенко А.В. – анализ достоинств и недостатков способов уменьшения уровня электромагнитных помех, создаваемых статическими преобразователями;

Денисенко Е.А. – анализ причин возникновения электромагнитных помех и способов их уменьшения, создаваемых сетевыми и автономными инверторами;

Болотин В.Л. – анализ эквивалентных схем путей распространения электромагнитных помех.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 26.06.2025, после рецензирования и доработки 10.11.2025; принята к публикации 17.11.2025

Author Contributions

O.V. Grigorash – methodology, writing – review and editing of the manuscript;

D.A. Normov – conceptualization, methodology; writing – review and editing of the manuscript;

A.V. Savenko – formal analysis, validation;

E.A. Denisenko – formal analysis, data curation;

V.L. Bolotin – investigation, formal analysis.

Conflict of interests

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

Received 26.06.2025; Revised 10.11.2025; Accepted 17.11.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 536.2:631.34

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-109-117>**Математическая модель температурного поля
конвективного теплообмена в фитотроне****П.В. Дородов¹, Е.Н. Гусенников^{2✉}, С.И. Юран³, Т.А. Широбокова⁴, И.Г. Поспелова⁵**^{1,2,3,4,5} Удмуртский государственный аграрный университет; г. Ижевск, Россия¹ pvd80@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1478-5876>² ujhuf99@gmail.com✉; <https://orcid.org/0009-0003-0723-4221>³ yuran-49@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0440-0012>⁴ 9048336842@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4421-576X>⁵ pospelovaig@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-6458-9774>

Аннотация. Высококачественные исследования в области агроинженерии требуют точного подхода к контролю параметров микроклимата в фитотроне, особенно температуры. Распределение температуры при различных режимах работы фитотрона требует дополнительного научного исследования. В основе разрабатываемого устройства лежит техническое решение раздельного нагрева растений и их корневой системы за счет разделения объема воздуха на камеру выращивания растений и камеру нагрева почвы. Целью исследований является получение уравнений температурного распределения воздушных масс в фитотроне с учетом конвективного теплообмена в камерах выращивания растений и нагрева почвы. Среди рассмотренных методов моделирования, подходящих для решения данной задачи, выбран метод разделения переменных. Для математического моделирования температурного поля в камере фитотрона применили аналитический метод решения уравнений конвективного теплообмена, основанный на уравнении Навье-Стокса. В ходе теоретического исследования разработали математические модели температурных полей в камерах фитотрона, которые демонстрируют отклонение от средней температуры менее 5%, что достаточно для точного создания контролируемого микроклимата. В дальнейшем математические модели будут проверены методами компьютерного моделирования и натурными испытаниями на экспериментальной установке с учетом агротехнологических требований. Результаты расчета могут быть использованы при проектировании систем автоматического управления нагревательными элементами и вентиляции фитотронов различных типоразмеров.

Ключевые слова: фитотрон; микроклимат; температурное поле; математическая модель; математические модели температурных полей; метод решения уравнений конвективного теплообмена

Для цитирования: Дородов П.В., Гусенников Е.Н., Юран С.И., Широбокова Т.А., Поспелова И.Г. Математическое моделирование температурного поля при конвективном теплообмене в камере фитотрона // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 6. С. 109-117. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-109-117>

ORIGINAL ARTICLE

**Mathematical model of the temperature field
of convective heat exchange in a phytotron****P.V. Dorodov¹, E.N. Gusennikov^{2✉}, S.I. Yuran³, T.A. Shirobokova⁴, I.G. Pospelova⁵**^{1,2,3,4,5} Udmurt State Agrarian University; Izhevsk, Russia¹ pvd80@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1478-5876>² ujhuf99@gmail.com✉; <https://orcid.org/0009-0003-0723-4221>³ yuran-49@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0440-0012>⁴ 9048336842@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4421-576X>⁵ pospelovaig@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-6458-9774>

Abstract. Precise control of microclimate parameters within phytotrons, particularly temperature, is crucial for high-quality agricultural engineering research. Optimizing temperature distribution under diverse phytotron operating conditions necessitates further investigation. This study focuses on a novel phytotron design featuring separate heating of plants and their root systems by partitioning the air volume into distinct plant growth and soil heating chambers. The study aimed to derive equations describing air temperature distribution within the phytotron, considering convective heat exchange in both the plant growth and soil heating zones. Among candidate modeling techniques,

the method of separation of variables was selected for its suitability. An analytical approach, based on solving convective heat transfer equations derived from the Navier-Stokes equations, was employed to mathematically model the temperature field within the phytotron chambers. The theoretical analysis resulted in the development of mathematical models predicting temperature fields in the phytotron chambers with a maximum deviation of less than 5% from the average temperature. This level of accuracy is deemed sufficient for precise microclimate control. These mathematical models will be subsequently validated through computer simulations and field testing on an experimental phytotron, taking into account agricultural technology requirements. The resulting calculation results can be applied to the design of automatic control systems for heating elements and ventilation within phytotrons of varying sizes.

Keywords: phytotron; microclimate; temperature field; mathematical model; mathematical models of temperature fields; method for solving convective heat transfer equations

For citation: Dorodov P.V., Gusennikov E.N., Yuran S.I., Shirobokova T.A., Pospelova I.G. Mathematical model of the temperature field of convective heat exchange in a phytotron. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(6):109-117 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-109-117>

Введение

Фитотрон – это климатическая камера, предназначенная для точного создания и поддержания условий микроклимата для растений. Одним из ключевых факторов микроклимата, влияющих на жизнедеятельность растений, является температура листвы и корней растений [1, 2]. Следовательно, работа фитотрона подразумевает точное контролирование температуры воздуха внутри рабочего пространства установки. Указанные возможности фитотронов, помимо обеспечения повышения показателей роста растений, целесообразно использовать в различных агрономических исследованиях – например, при определении режимов термотерапии растений, исследовании влияния повышенной температуры на растения и др. [3, 4].

В современных исследованиях отсутствуют готовые математические модели, описывающие распределение температурных полей в фитотронах. В то же время для проведения агрономических исследований требуется четкое представление о распределении температуры внутри рабочего пространства фитотронов различных конструкций. В связи с этим разработка универсального метода определения температурного поля внутри фитотрона является актуальной задачей¹ [5].

Можно ожидать, что математическое моделирование температурного поля в разрабатываемом фитотроне, содержащем камеру выращивания растений и камеру нагрева почвы, позволит более точно прогнозировать работу системы обогрева и оптимизировать настройки климатических систем для улучшения условий роста растений.

Цель исследований: получить уравнения распределения температурного поля в камерах выращивания растений и нагрева почвы в рамках разрабатываемой конструкции фитотрона.

Материалы и методы

Моделирование температурного поля в камере фитотрона при конвективном теплообмене требует применения различных аналитических методов, которые позволяют учитывать множество факторов, влияющих на теплоперенос.

Для решения дифференциальных уравнений теплообмена при использовании ряда допущений применяется метод разделения переменных. Преимуществом данного метода является получение точного решения в виде функции температуры от пространственных координат, что позволяет затем исследовать ее на экстремум и определять оптимальные параметры температурного поля.

Метод конечных элементов (МКЭ) – один из самых распространенных численных методов для решения дифференциальных уравнений теплообмена, особенно при наличии сложной геометрии объекта исследования и неоднородных материалов [6]. В контексте моделирования температурного поля в камере фитотрона МКЭ позволяет точно учитывать геометрические особенности фитотрона, разнообразие теплофизических свойств материалов (стенки, растения, воздух), сложные граничные условия – такие, как теплопередача через вентиляторы и стенки камеры. Несмотря на высокую точность решения метода, его главным недостатком является необходимость значительных вычислительных ресурсов при моделировании крупных областей и сложность проектирования модели.

Метод конечных разностей (МКР) – другой численный метод, в котором происходит дискретизация пространства и времени на равномерные сетки [7]. В свою очередь, дифференциальные уравнения заменяются разностными выражениями.

¹Гусенников Е.Н. Система контролируемого выращивания растений для бытового применения // Новые направления развития приборостроения. 2024: Материалы 17-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов. Минск, 2024. С. 73.

Для моделирования теплообмена в камере фитотрона этот метод используется при решении уравнения теплопроводности и уравнений Навье-Стокса для потока воздуха. МКР особенно эффективен в случае моделирования временных процессов – таких, как изменение температуры в фитотроне с течением времени. Преимуществом данного метода является простота реализации для систем с простой геометрией, однако при исследовании объемных объектов сложной формы трудно добиться достаточной точности.

Методы статистического моделирования применяются в случаях, когда требуется учитывать неопределенности – такие, как изменение внешних условий или нестабильность потока воздуха. При этом могут быть использованы стохастические модели [8]. Эти методы моделируют систему как случайный процесс и позволяют анализировать распределение температуры в фитотроне с учетом вероятностных факторов. Несмотря на возможность моделирования системы с переменными внешними условиями, такой метод подразумевает большой объем вычислений.

Методы численного моделирования (CFD) жидкостных потоков применяются для анализа сложных динамических процессов теплообмена [9]. Данные методы подразумевают использование программного обеспечения: COMSOL Multiphysics, ANSYS Fluent, OpenFOAM и др. CFD позволяет учитывать все взаимосвязанные процессы: теплообмен через стены, вентиляцию, турбулентность и даже взаимодействие с растениями. Преимуществами метода являются высокая точность в моделировании сложных потоков воздуха и теплообмена, удобная интеграция с другими физическими моделями (механика, химия) и возможность проведения полностью компьютерного моделирования на основе готовых математических уравнений. Но при этом имеются значительные недостатки: высокие требования к вычислительным мощностям, большие объемы результатов моделирования, возможность проведения только итерационного моделирования, дискретное моделирование с указанным интервалом, от размера которого зависят сложность и точность вычислений, возможность ошибок при длительном моделировании, и главное – отсутствие итогового уравнения зависимости исследуемой величины моделируемого процесса от факторов, участвующих в моделировании.

На первоначальном этапе теоретического исследования температурного поля камер фитотрона применен аналитический метод разделения переменных дифференциального уравнения энергии воздушного потока, так как он позволяет получить выражение непрерывного поля для проведения дальнейших аналитических исследований.

Объектом исследований является разрабатываемый фитотрон, в основе которого лежит предложенное техническое решение раздельного нагрева растений и их корневой системы за счет разделения объема воздуха на две камеры: 1 – камера нагрева почвы; 2 – камера выращивания растений [10] (рис. 1).

Корпус фитотрона имеет сверху и снизу отверстия, соединяющие камеры с окружающей средой. Рабочий объем фитотрона разделен пластиной с отверстиями для прохода теплого воздуха из камеры 1 в камеру 2. В нижней камере нагрева почвы находится пластинчатый электронагреватель и непосредственно горшки с почвой. Сверху верхней камеры выращивания растений располагается проветривающий вентилятор.

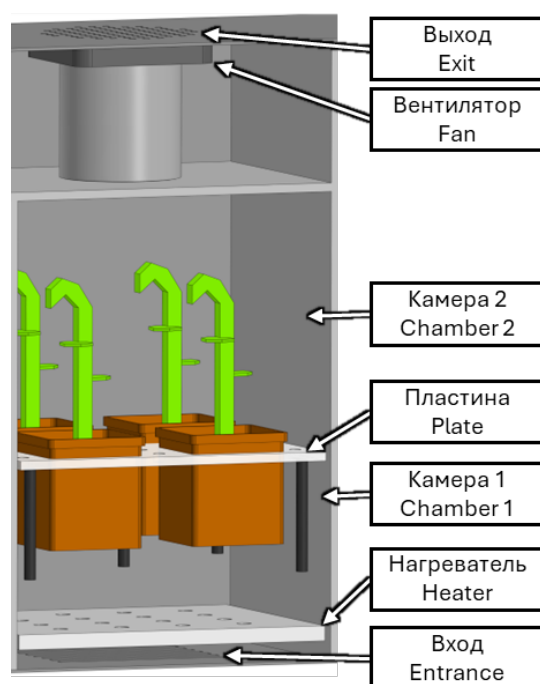


Рис. 1. Трехмерная модель фитотрона (вид сбоку)

Fig. 1. 3D model of a phytotron (side view)

Результаты и их обсуждение

Для математического моделирования температурного поля в камере фитотрона используется аналитический метод решения уравнений конвективного теплообмена, основанный на уравнении Навье-Стокса^{2,3} [11, 12]. Для описания потока воздуха применяется модель конвективного тепломассопереноса.

Поскольку концепция разрабатываемого фитотрона предполагает использование устройства

²Темам Р. Уравнения Навье-Стокса. Теория и численный анализ. 2-е изд. М.: Мир, 1981. 408 с.

³Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Теоретическая физика. 4-е изд. М.: Наука, 1988. Т. VI. 736 с.

в помещении и стенки выполняются с применением теплоизолятора, то в данной модели теплопроводностью корпуса можно пренебречь. Тогда уравнение энергии воздушного потока имеет вид⁴:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + \vec{v} \cdot \text{grad}(T) = a_{\tau} \cdot \nabla^2(T),$$

где T – температура воздушного потока, К; τ – время, с; v – скорость воздушных масс, м/с; a_{τ} – коэффициент теплопроводности воздушных масс, м²/с.

Или в декартовой системе координат x, y и z :

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \tau} + v_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = \\ = a_{\tau} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где v_x, v_y и v_z – проекции скорости воздушных масс на координатные оси, м/с.

При установившемся режиме ($\partial T / \partial \tau = 0$) и для среднего сечения камер фитотрона из условий симметрии ($\partial T / \partial z = 0$) уравнение (1) примет вид:

$$v_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} = a_{\tau} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right). \quad (2)$$

Для исследования температурного поля зададимся значением температуры в реперных точках камеры фитотрона, изображенных на рисунке 2.

Внутри камеры 1 расположены реперные точки $T_{10} \dots T_{14}$, а в камере 2 – точки $T_{20} \dots T_{24}$. Рассмотрим их температурное поле по отдельности.

Температурное поле в камере 2. Из условий симметрии кинематического процесса тепломассопереноса можно рассматривать только левую половину срединного сечения камеры выращивания растений 2. Пусть линии уровня температурного поля в камере 2 имеют вид, представленный на рисунке 3, где температурные реперные точки $T_{20} \dots T_{24}$ располагаются только в левой половине камеры. За начало отсчета системы координат x, y выбрана реперная точка со значением температуры T_{20} .

Правая часть уравнения (2) представляет собой теплообмен за счет теплопроводности воздушного потока. При отсутствии внутренних источников тепла этой частью уравнения можно пренебречь, тогда имеем:

$$v_x \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial T_2}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

или

$$\frac{\partial T_2}{\partial x} + f'(x, y) \cdot \frac{\partial T_2}{\partial y} = 0, \quad (4)$$

где

$$f'(x, y) = \frac{v_y}{v_x} = \frac{\partial y / \partial \tau}{\partial x / \partial \tau} = \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{f'_y}{f'_x}.$$

Здесь $y(x) = f(x, y)$ – траектория движения воздушных потоков.

Пусть траектория движения воздушного потока описывается уравнением второго порядка во вспомогательной прямоугольной декартовой системе координат x_1, y_1 , тогда

$$f(x_1, y_1) = 0,$$

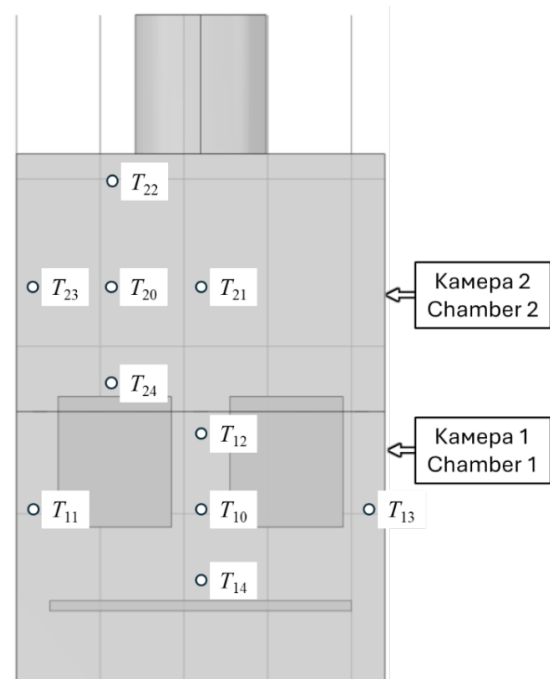


Рис. 2. Схема фитотрона с реперными точками температурного поля

Fig. 2. Phytotron diagram with reference points of the temperature field

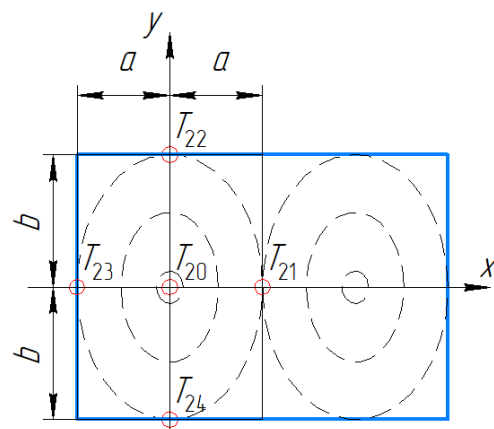


Рис. 3. Линии уровня температурного поля в камере 2:

$2a$ и $2b$ – полуширина и высота камеры 2

Fig. 3. Temperature field level lines in chamber 2:

$2a$ and $2b$ – half-width and height of chamber 2

⁴Григорьев Б.А., Цветков Ф.Ф. Тепломассообмен: Учебник. М.: МЭИ, 2011. 562 с.

где

$$f(x_1, y_1) = A_1 x_1^2 + B_1 y_1^2 + 2E_1 x_1 y_1 + 2A_1' x_1 + 2B_1' y_1 + C_1.$$

Путем поворота и сдвига системы координат ее можно привести к виду:

$$f(x, y) = Ax^2 + By^2 + C.$$

Тогда

$$f'_x = 2A \cdot x, \quad f'_y = 2B \cdot y, \quad f' = \frac{A \cdot x}{B \cdot y},$$

а уравнение (4) примет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{Ax}{By} \frac{\partial T}{\partial y} = 0. \quad (5)$$

Для решения уравнения (5) воспользуемся методом разделения переменных:

$$T = U(x) \cdot V(y);$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = V \frac{dU}{dx};$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = U \frac{dV}{dy}.$$

Тогда уравнение (5) запишется как

$$V \frac{dU}{dx} + \frac{A \cdot x}{B \cdot y} \cdot U \frac{dV}{dy} = 0,$$

откуда имеем:

$$\begin{cases} \frac{dU}{dx} = \frac{A \cdot x}{B} \cdot U; \\ \frac{dV}{y dy} = V. \end{cases} \quad (6)$$

После интегрирования системы (6) получим:

$$U = k_1 \cdot e^{\frac{A \cdot x^2}{2B}},$$

$$V = k_2 \cdot e^{\frac{y^2}{2}},$$

а решение примет вид:

$$T = U \cdot V = C_1 \cdot e^{\left(\frac{A \cdot x^2}{2B} + \frac{y^2}{2}\right)} = C_1 \cdot e^{(C_2 \cdot x^2 + C_3 \cdot y^2)}, \quad (7)$$

где C_1 – константы, определяемые граничными условиями (рис. 3):

$$\begin{cases} 1) T(0;0) = T_{20}; \\ 2) T(a;0) = T_{21}; \\ 3) T(-a;0) = T_{23}; \\ 4) T(0;b) = T_{22}; \\ 5) T(0;-b) = T_{24}, \end{cases}$$

где $T_{20} \dots T_{24}$ – значения температур в реперных точках камеры 2 (рис. 3), К; a – полуширина половины камеры, м; b – полувысота половины камеры, м.

Поскольку количество граничных условий избыточно, то в некоторых точках значение температуры будет совпадать, чего можно добиться техническими методами (автоматическим управлением вынужденной конвекцией, термоизоляцией стенок камеры и др.). Тогда имеем:

$$\begin{cases} 1) C_1 = T_{20}, \\ 2) C_2 = \frac{1}{a^2} \cdot \ln\left(\frac{T_{21}}{T_{20}}\right), \\ 3) C_2 = \frac{1}{a^2} \cdot \ln\left(\frac{T_{23}}{T_{20}}\right), \\ 4) C_3 = \frac{1}{b^2} \cdot \ln\left(\frac{T_{22}}{T_{20}}\right), \\ 5) C_3 = \frac{1}{b^2} \cdot \ln\left(\frac{T_{24}}{T_{20}}\right), \end{cases}$$

откуда $T_{21} = T_{23}$ и $T_{22} = T_{24}$, а решение имеет вид:

$$T = T_{20} \cdot e^{\left(\ln\left(\frac{T_{21}}{T_{20}}\right) \cdot \left(\frac{x}{a}\right)^2 + \ln\left(\frac{T_{22}}{T_{20}}\right) \cdot \left(\frac{y}{b}\right)^2\right)}.$$

Данное уравнение можно также выразить в виде безразмерных величин:

$$\theta = \frac{T}{T_{20}} = e^{\left(\ln\left(\frac{T_{21}}{T_{20}}\right) \cdot \left(\frac{x}{a}\right)^2 + \ln\left(\frac{T_{22}}{T_{20}}\right) \cdot \left(\frac{y}{b}\right)^2\right)},$$

где θ – функция температурного поля в камере выращивания растений 2.

Построим трехмерный график температурного поля в безразмерных величинах для камеры 2. Для построения графика зададимся следующими параметрами расчета: $b/a = 1,38$ (из конструкции прототипа); $T_{21}/T_{20} = 0,93$ и $T_{22}/T_{20} = 0,98$ (из агротехнических требований). Для построения графика применили программное обеспечение Maple. График температурного поля θ и его линии уровня показаны на рисунке 4.

Полученное поле распределения температуры в камере 2 имеет форму холма с пиковым значением в центре полуобъема камеры. Неравномерность нагрева камеры составила $0,66\% \ll 5\%$.

Температурное поле в камере 1. Камера нагрева почвы имеет внутренний источник тепла – электронагреватель. На рисунке 5 представлена схема срединного сечения камеры нагрева почвы с реперными точками $T_{10} \dots T_{14}$.

Поскольку в данной камере имеется нагревательный элемент, то уравнение (3) запишется с учетом источника тепла q . Уравнение энергии для камеры 1 становится неоднородным:

$$\mathcal{V}_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \mathcal{V}_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} = q(y), \quad (8)$$

где $q(y)$ – интенсивность источника тепла (из условий симметрии q зависит только от координаты y), К/с.

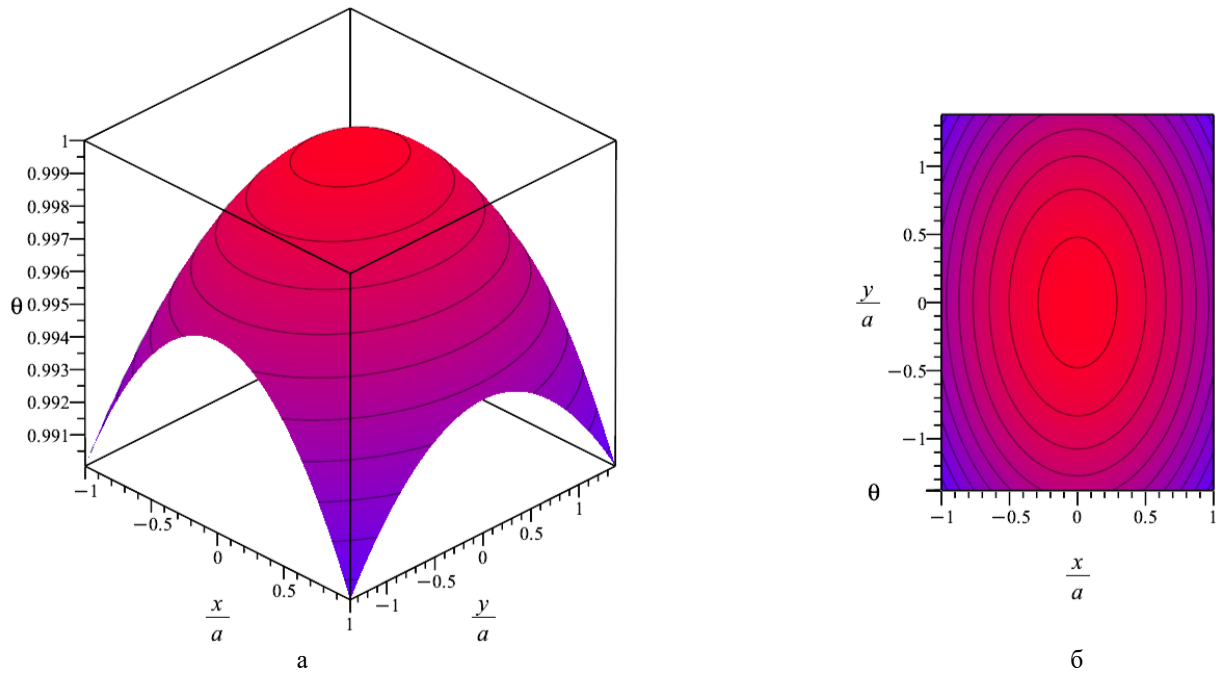


Рис. 4. График температурного поля в камере 2 при $b/a = 1,38$, $T_{21}/T_{20} = 0,93$, $T_{22}/T_{20} = 0,98$:
 а) распределение температуры в срединном сечении левой половины; б) линии уровня температурного поля
Fig. 4. Temperature field graph in chamber 2 at $b/a = 1.38$, $T_{21}/T_{20} = 0.93$, $T_{22}/T_{20} = 0.98$:
 а) temperature distribution in the middle section of the left half; б) temperature field level lines

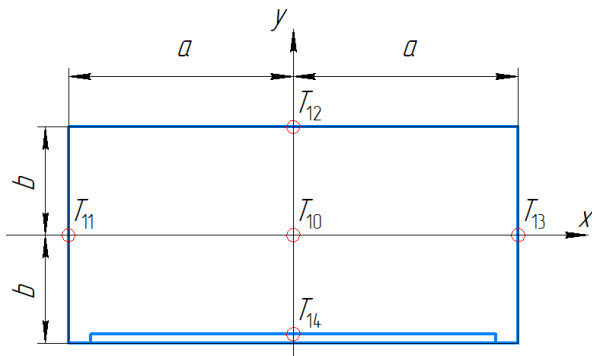


Рис. 5. Схема срединного сечения камеры нагрева почвы:
 а и b – полуширина и полувысота камеры 1
Fig. 5. Diagram of the middle section of the soil heating chamber:
 a and b – half-width and half-height of chamber 1

Полное решение уравнения (8) определяется выражением:

$$T = T^* + T^{**},$$

где T^* – общее решение однородного уравнения,

$$\mathcal{V}_x \cdot \frac{\partial T^*}{\partial x} + \mathcal{V}_y \cdot \frac{\partial T^*}{\partial y} = 0, \quad (9)$$

T^{**} – частное решение уравнения (8), зависящее от вида функции $q(y)$.

Общее решение однородного уравнения (9) имеет вид (см. (7)):

$$T^* = C_1 \cdot e^{(C_2 \cdot x^2 + C_3 \cdot y^2)}.$$

Функция $q(y)$ может быть получена либо из экспериментальных данных, либо основана на обоснованных теоретических предположениях. Большинство естественных процессов, которые протекают монотонно (не периодически), подчиняется экспоненциальным законам:

$$q \sim e^{\text{const} \cdot y},$$

тогда частное решение T^{**} запишется как

$$T^{**} = C_1 \cdot e^{C_4 \cdot y}.$$

А полное решение примет вид:

$$T = C_1 \cdot e^{(C_2 \cdot x^2 + C_3 \cdot y^2 + C_4 \cdot y)}. \quad (10)$$

Постоянные $C_1 \dots C_4$ определяются из граничных условий (рис. 5):

$$\begin{cases} 1) T(0;0) = T_{10}, \\ 2) T(a;0) = T_{11}, \\ 3) T(-a;0) = T_{13}, \\ 4) T(0;b) = T_{12}, \\ 5) T(0;-b) = T_{14}, \end{cases} \quad (11)$$

где $T_{10} \dots T_{14}$ – значения температуры в реперных точках камеры нагрева почвы 1 (рис. 5), a – полуширина камеры 1, м; b – полувысота камеры 1, м.

Из граничного условия 1) системы (11)

$$C_1 = T(0;0) = T_{10}.$$

Из условия 2) следует, что

$$T(a;0) = T_{11} = T_{10} \cdot e^{C_2 \cdot a^2},$$

откуда

$$C_2 = \frac{1}{a^2} \cdot \ln\left(\frac{T_{11}}{T_{10}}\right).$$

Из условия 3) получим:

$$C_2 = \frac{1}{a^2} \cdot \ln\left(\frac{T_{13}}{T_{10}}\right),$$

то есть $T_{11} = T_{13}$.

Четвертое граничное условие запишется как

$$T(0; b) = T_{10} \cdot e^{(C_3 \cdot b^2 + C_4 \cdot b)} = T_{12}, \quad (12)$$

а пятое условие – как

$$T(0; -b) = T_{10} \cdot e^{(C_3 \cdot b^2 - C_4 \cdot b)} = T_{14}. \quad (13)$$

Из (12) и (13) имеем:

$$C_3 = \frac{1}{b^2} \cdot \ln\left(\frac{\sqrt{T_{12} \cdot T_{14}}}{T_{10}}\right); C_4 = \frac{1}{b} \cdot \ln\left(\sqrt{\frac{T_{12}}{T_{14}}}\right).$$

Подставим постоянные $C_1 \dots C_4$ в уравнение (10) и получим

$$T = T_{10} \cdot e^{\left(\ln\left(\frac{T_{11}}{T_{10}}\right)\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \ln\left(\frac{\sqrt{T_{12} \cdot T_{14}}}{T_{10}}\right)\left(\frac{y}{b}\right)^2 + \ln\left(\sqrt{\frac{T_{12}}{T_{14}}}\right)\frac{y}{b}\right)}$$

или в виде безразмерных величин:

$$\theta = \frac{T}{T_{10}} = e^{\left(\ln\left(\frac{T_{11}}{T_{10}}\right)\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \ln\left(\frac{\sqrt{T_{12} \cdot T_{14}}}{T_{10}}\right)\left(\frac{y}{b}\right)^2 + \ln\left(\sqrt{\frac{T_{12}}{T_{14}}}\right)\frac{y}{b}\right)},$$

где θ – функция температурного поля в камере нагрева почвы 1.

Для построения графика зададимся следующими параметрами расчета: $b/a = 0,47$ (из конструкции прототипа); $T_{11}/T_{10} = 0,73$; $(T_{12} \cdot T_{14})^{0,5}/T_{10} = 1,03$ и $T_{12}/T_{14} = 0,87$ (из агротехнических требований). График температурного поля θ , построенный с использованием программного обеспечения Maple, представлен на рисунке 6.

Полученное поле распределения температуры в камере 1 имеет седловидную форму с максимумом в месте расположения нагревателя. Неравномерность нагрева камеры составила $2,51\% < 5\%$, что вполне достаточно для контроля температурного режима в камерах фитотрона.

Гипотеза подтверждена: математические модели температурных полей в камерах фитотрона позволяют создать контролируемый микроклимат.

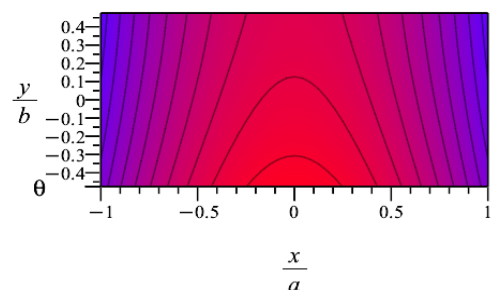
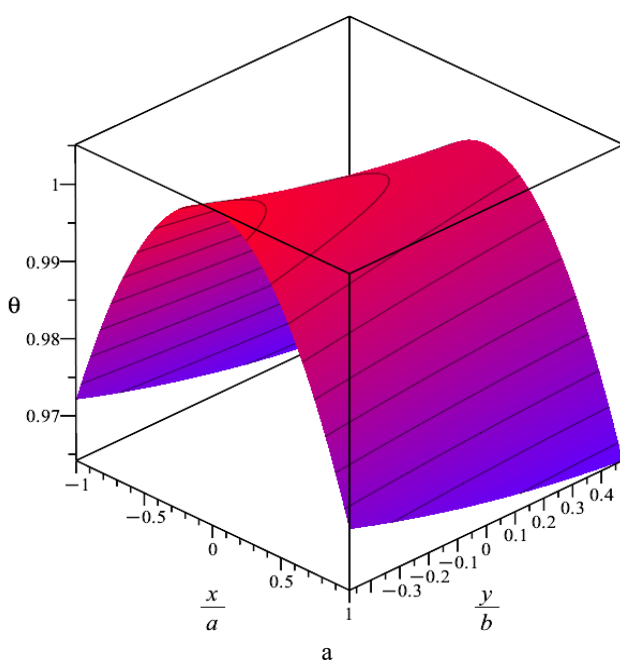


Рис. 6. График температурного поля в камере 1 при $b/a = 0,47$, $T_{11}/T_{10} = 0,73$ ($(T_{12} \cdot T_{14})^{0,5}/T_{10} = 1,03$, $T_{12}/T_{14} = 0,87$: а) распределение температуры в срединном сечении; б) линии уровня температурного поля

Fig. 6. Temperature field graph in chamber 1 at $b/a = 0,47$, $T_{11}/T_{10} = 0,73$, $(T_{12} \cdot T_{14})^{0,5}/T_{10} = 1,03$, $T_{12}/T_{14} = 0,87$: а) temperature distribution in the middle section; б) temperature field level lines

Выводы

1. Разработанные математические модели температурных полей в камерах фитотрона демонстрируют отклонение от средней температуры менее 5%, что достаточно для точного создания контролируемого микроклимата. В дальнейшем модели будут проверены численными методами компьютерного

моделирования и натурными испытаниями на экспериментальной установке с учетом агротехнологических требований.

2. Результаты расчета могут быть использованы при проектировании систем автоматического управления нагревательными элементами и вентиляции фитотронов различных типоразмеров.

Список источников

1. Moon-Sun Y., Myung-Min O. Air and root zone temperature for growth of coastal Glehnia Seedlings. *Korean journal of horticultural science and technology*. 2023;41:177-187. <https://doi.org/10.7235/HORT.20230017>
2. Scafaro A., Posch B., Evans J. et al. Rubisco deactivation and chloroplast electron transport rates co-limit photosynthesis above optimal leaf temperature in terrestrial plants. *Nature Communications*. 2023;14:2820. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38496-4>
3. Баматов И.М., Адаев Н.Л., Цагараева Э.А. и др. Повышение эффективности технологии оздоровления и первичного размножения земляники садовой в культуре in vitro // Известия Горского государственного аграрного университета. 2020. Т. 57, № 4. С. 183-191. EDN: TUMPFD
4. Савко Т.Д., Потапкина К.Е., Пиврик К.И., Токмакова Т.Н. Влияние факторов окружающей среды на испарение (транспирацию) воды листьями растений // XXII Международный Биос-форум-2017. 2017. Т. 2. С. 300-303. EDN: XOYUJV
5. Гусенников Е.Н., Юран С.И. Концепт комбинированного устройства контролируемого выращивания растений для бытового применения // Современные тенденции технологического развития АПК: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной Десятилетию науки и технологий и 300-летию Российской академии наук. Ижевск, 2024. С. 253-257. EDN: TWCILG
6. Аммосов Д.А., Васильев В.И., Васильева М.В., Степанов С.П. Многомасштабное понижение порядка модели термоупругости с фазовым переходом с использованием обобщенного многомасштабного метода конечных элементов // Теоретическая и математическая физика. 2022. Т. 211, № 2. С. 181-199. <https://doi.org/10.4213/tmf10244>
7. Павлов М.В., Карпов Д.Ф. Решение краевой задачи тепломассопереноса методом конечного интегрального преобразования Фурье для условий лучистого обогрева почвы // Природообустройство. 2024. № 1. С. 18-24. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-1-18-24>
8. Ни А.Е., Ким К.Б. Решеточный метод Больцмана в задачах кондуктивного теплопереноса с учетом химических реакций в материале // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2021. Т. 83, № 3 (89). С. 191-197. EDN: QYCSRL
9. Сеньков А.Г. Автоматическое регулирование температуры воздуха в теплице с учетом данных прогноза погоды // Информатика. 2021. Т. 18, № 3. С. 59-67. <https://doi.org/10.37661/1816-Q3Q1-2Q21-18-3-59-67>
10. Фитотрон с системой бесконтактного нагрева почвы в горшках: Патент на полезную модель RU232987 U1, МПК A01G 9/24 / С.И. Юран, Е.Н. Гусенников; заявл. 08.10.2024; опублик. 31.03.2025. EDN: NJVPXT
11. Sannan S., Jerca I.O., Badulescu L.A. A CFD study of the fluid flow through air distribution hoses in a greenhouse. *Chemical Engineering Transactions*. 2023;100:385-390. <https://doi.org/10.3303/CET23100065>
12. Bazgaou A., Fatnassi H., Bouharroud R. et al. CFD modeling of the microclimate in a greenhouse using a rock bed thermal storage heating system. *Horticulturae*. 2023;9(2):183. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9020183>

References

1. Moon-Sun Y., Myung-Min O. Air and root zone temperature for growth of coastal Glehnia Seedlings. *Korean journal of horticultural science and technology*. 2023;41:177-187. <https://doi.org/10.7235/HORT.20230017>
2. Scafaro A., Posch B., Evans J. et al. Rubisco deactivation and chloroplast electron transport rates co-limit photosynthesis above optimal leaf temperature in terrestrial plants. *Nature Communications*. 2023;14:2820. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38496-4>
3. Bamatov I.M., Adaev N.L., Tsagaraeva E.A., Taymaskhanov Kh.E., Amaeva A.G. Improving the efficiency of health technology and primary in vitro propagation of pine strawberries. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2020;57(4):183-191. (In Russ.)
4. Savko T.D., Potapkina K.E., Pivrik K.I., Tokmakova T.N. Influence of environmental factors on evaporation (transpiration) of water by leaves of plants. *XXII Mezhdunarodniy Bios-Forum 2017*. 2017;2:300-303. (In Russ.)
5. Gusennikov E.N., Yuran S.I. Conceptual design for a combined controlled-environment agriculture system for home use. In: *Sovremennyye tendentsii tehnologicheskogo razvitiya APK: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the Decade of Science and Technology and the 300th Anniversary of the Russian Academy of Sciences*. 2024:253-256. (In Russ.)
6. Ammosov D.A., Vasil'ev V.I., Vasil'eva M.V., Stepanov S.P. Multiscale model reduction for a thermoelastic model with phase change using a generalized multiscale finite-element method. *Theoretical and Mathematical Physics*. 2022;211(2):181-199. (In Russ.) <https://doi.org/10.4213/tmf10244>
7. Pavlov M.V., Karpov D.F. Solution of the boundary value problem of heat and mass transfer using the Fourier method of finite integral transform for radiant soil heating conditions. *Prirodoobustrojstvo*. 2024;1:18-24. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-1-18-24>
8. Nee A.E., Kim K.B. Lattice Boltzmann method for heat conduction problems with chemical reactions. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2021;83(3):191-197. (In Russ.)
9. Senkov A.G. Automatic control of air temperature in the greenhouse considering the weather forecast data. *Informatics*. 2021;18(3):59-67. (In Russ.) <https://doi.org/10.37661/1816-Q3Q1-2Q21-18-3-59-67>
10. Yuran S.I., Gusennikov E.N. Phytotron with a system of contactless heating of soil in pots: Patent for utility model No. 232987 Russian Federation, IPC A01G 9/24, 2025. (In Russ.)
11. Sannan S., Jerca I.O., Badulescu L.A. A CFD study of the fluid flow through air distribution hoses in a greenhouse. *Chemical Engineering Transactions*. 2023;100:385-390. <https://doi.org/10.3303/CET23100065>
12. Bazgaou A., Fatnassi H., Bouharroud R. et al. CFD modeling of the microclimate in a greenhouse using a rock bed thermal storage heating system. *Horticulturae*. 2023;9(2):183. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9020183>

Информация об авторах

- ¹ **Дородов Павел Владимирович**, д-р техн. наук, профессор; pvd80@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1478-5876>; SPIN-код: 9058-8125
- ² **Гусенников Евгений Николаевич**, аспирант; ujhuf99@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0009-0003-0723-4221>; SPIN-код: 2462-0126
- ³ **Юран Сергей Иосифович**, д-р техн. наук, профессор; yuran-49@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0440-0012>; SPIN-код: 9290-6033
- ⁴ **Широбокова Татьяна Александровна**, канд. техн. наук, доцент; 9048336842@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4421-576X>; SPIN-код: 2579-6237
- ⁵ **Поспелова Ирина Геннадиевна**, канд. техн. наук, доцент; pospelovaig@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-6458-9774>; SPIN-код: 1625-0307
- ^{1, 2, 3, 4, 5} Удмуртский государственный аграрный университет; 246069, Российская Федерация, Удмуртская республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, 11

Вклад авторов

П.В. Дородов – разработка математической модели и формирование выводов исследований, подготовка начального варианта текста;

Е.Н. Гусенников – написание текста, обработка результатов, подготовка графических материалов;

С.И. Юран – постановка задачи, формулирование основной концепции исследований, корректировка и анализ рукописи;

Т.А. Широбокова – поиск и анализ литературы, обзор математических моделей;

И.Г. Поспелова – обсуждение и интерпретация результатов моделирования, форматирование текста статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 20.05.2025, после рецензирования и доработки 02.10.2025; принята к публикации 06.10.2025

Author Information

- Pavel V. Dorodov**¹, DSc (Eng), Professor; pvd80@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1478-5876>
- Evgeniy N. Gusennikov**^{2✉}, postgraduate student; ujhuf99@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0009-0003-0723-4221>
- Sergey I. Yuran**³, DSc (Eng), Professor; yuran-49@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0440-0012>; ScopusAuthor ID: 6506540214
- Tatyana A. Shirobokova**⁴, DSc (Eng), Associate Professor; 9048336842@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4421-576X>
- Irina G. Pospelova**⁵, DSc (Eng), Associate Professor; pospelovaig@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-6458-9774>
- ^{1,2,3,4,5} Udmurt State Agrarian University; 11, Studencheskaya Str., Izhevsk, Udmurt Republic, 246069, Russian Federation

Author Contribution

P.V. Dorodov – methodology, formal analysis, writing – original draft;

E.N. Gusennikov – writing – original draft, formal analysis, visualization;

S.I. Yuran – conceptualization, writing – review and editing of the manuscript;

T.A. Shirobokova – literature review, methodology;

I.G. Pospelova – validation, writing – review and editing of the manuscript.

Conflict of interests

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

Received 20.05.2025; Revised 02.10.2025; Accepted 06.10.2025

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 378.147:631.15

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-118-123>



Аграрное образование будущего: баланс между академическими знаниями и запросами рынка труда

А.Л. Севостьянов¹, О.Ю. Гришаева², С.И. Головин³, Р.А. Булавинцев⁴

^{1,2,3,4} Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина; г. Орел, Россия

¹ sewostya@list.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8555-5678>

² omk@orelsau.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8225-6169>

³ golovinsi@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0006-8138-8458>

⁴ bulavintceva@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7520-0849>

Аннотация. Дисбаланс между фундаментальными академическими знаниями и практическими требованиями современного рынка труда обуславливает необходимость модернизации аграрного образования. Исследования проведены на базе Орловского ГАУ с целью выявления степени удовлетворенности работодателей качеством подготовки выпускников и определения ключевых компетенций, необходимых для успешного трудоустройства. Авторы опросили 112 представителей предприятий агропромышленного комплекса и провели анализ документов Министерства сельского хозяйства, профессиональных стандартов в АПК, образовательных стандартов ФГОС ВО по аграрным направлениям, данных мониторинга трудоустройства выпускников, отчетов о прохождении практик и результатов аккредитационных экспертиз. Результаты исследований показали, что основными формами сотрудничества вуза и работодателей являются организация производственных практик и стажировок (96,3%), участие бизнеса в разработке учебных курсов (21,3%), в преподавании (24,4%). Большинство выпускников Орловского ГАУ успешно адаптируются на рабочем месте: 30% – в течение трех месяцев, 50% – за полгода. Работодатели выделили ключевые компетенции, необходимые выпускникам: профессиональная компетентность (75,56%), способность работать в коллективе (66,67%), компьютерная грамотность (51,11%), готовность к дальнейшему обучению (53,33%), умение анализировать новую информацию (60,00%). Для совершенствования образовательных программ авторы предложили увеличить количество практических часов, привлекать преподавателей-практиков и вовлекать работодателей в разработку учебных курсов. Исследования подтверждают, что тесное взаимодействие вузов с бизнесом способствует повышению качества подготовки выпускников, их конкурентоспособности на рынке труда и удовлетворенности работодателей. Реализация предложенных мер позволит готовить специалистов, способных решать проблемы аграрного сектора и устойчиво развивать отрасль.

Ключевые слова: аграрное образование; работодатели; практико-ориентированное обучение; образовательные программы; компетенции

Благодарности. Авторы признательны ООО «Терра-групп», ООО «Мираторг», ООО «ЭкоНива-АПК Холдинг», ООО АПК «Юность», ООО «Агропромсервис», АО «Атлант» за выраженную позицию в отношении формирования образовательных программ в университете.

Авторы благодарят рецензентов за значительный вклад в экспертную оценку статьи.

Для цитирования: Севостьянов А.Л., Гришаева О.Ю., Головин С.С., Булавинцев Р.А. Аграрное образование будущего: баланс между академическими знаниями и запросами рынка труда // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 6. С. 118-123. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-118-123>

ORIGINAL ARTICLE

Agricultural education of the future: a balance between academic knowledge and labor market demands

A.L. Sevostyanov^{1✉}, O.Yu. Grishaeva², S.I. Golovin³, R.A. Bulavintsev⁴

^{1,2,3,4} Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin; Orel, Russia

¹ sewostya@list.ru✉; <https://orcid.org/0000-0001-8555-5678>

² omk@orelsau.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8225-6169>

³ golovinsi@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0006-8138-8458>

⁴ bulavintcevr@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7520-0849>

Abstract. The lack of a balance between fundamental academic knowledge and the practical requirements of the modern labor market urges the modernization of agricultural education. The research carried out at Orel State Agrarian University aimed to identify the degree of employers' satisfaction with the training quality of graduates, as well as to determine the key competencies necessary for successful job applicants. The authors interviewed 112 representatives of the agro-industrial sector and analyzed the documents of the Ministry of Agriculture, professional standards in the agro-industrial sector, Federal State Educational Standards for higher education in agricultural areas, monitoring data on graduate employment, internship reports, and the accreditation results. The results showed that the main forms of cooperation between the university and employers are the organization of production practices and internships (96.3%), business participation in the development of training courses and teaching (21.3% and 24.4%, respectively). Employers identified the key competencies required by graduates: professional competence (75.56%), teamwork ability (66.67%), computer literacy (51.11%), readiness for further education (53.33%) and the ability to analyze new information (60.00%). Based on the data obtained, the authors have proposed recommendations for improving training curricula, including increasing practical hours, attracting practical teachers and actively involving employers in the development of training courses. The study confirms that the close cooperation of universities with business improves the quality of graduate training, their competitiveness in the labor market and employer satisfaction. The implementation of the proposed measures will make it possible to train specialists capable of solving modern problems of the agricultural sector and sustainably developing the industry.

Keywords: agricultural education; labor market; employers; practice-oriented learning; training curricula; competencies

Acknowledgments. The authors are grateful to LLC "Terra-group," LLC "Miratorg," LLC "EcoNiva-APK Holding," LLC APK "Yunost," LLC "Agropromservice," and JSC "Atlant" for their expressed position regarding the training curricula designing at the university.

The authors thank the reviewers for their significant contribution to the peer assessment of the article.

For citation: Sevostyanov A.L., Grishaeva O.Yu., Golovin S.S., Bulavintsev R.A. Agricultural education of the future: a balance between academic knowledge and labor market demands. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(6):118-123 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-118-123>

Введение

Современное высшее образование сталкивается с необходимостью адаптации образовательных программ к требованиям рынка труда. Особенно это актуально для аграрного сектора, где технологические изменения и инновации требуют от выпускников не только теоретических знаний, но и практических навыков. Учет мнения работодателей при формировании образовательных программ позволяет вузам готовить специалистов, способных эффективно решать профессиональные задачи и адаптироваться к изменяющимся условиям работы.

На примере РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева авторы работы В.И. Трухачев и др. [1], обобщив результаты форсайт-анализа, «...выделили семь групп стратегических задач развития образовательной политики в вузе, которые связаны с обеспечением вариативности и гибкости подготовки специалистов агропромышленного комплекса». Е.В. Щедрина и О.Н. Ивашова [2] «...исследовав цифровые инструменты, поддерживающие технологию искусственного интеллекта в обучении агроинженеров, обосновали необходимость изменения современных методов и подходов в обучении, в том числе на уровне

информационного взаимодействия с генеративными нейросетями».

Инновации – важный фактор, определяющий современное развитие предприятий и отраслей экономики страны, успешность деятельности которых во многом зависит от способности инженерно-технического персонала создавать, воспринимать и использовать технические, технологические, организационные и культурные нововведения [3, 4]. В работе [5] исследован программно-целевой подход, позволяющий системно и комплексно увязывать интересы образовательных организаций, органов власти и субъектов АПК.

Цель исследований: выявление степени удовлетворенности работодателей качеством подготовки выпускников и определение ключевых компетенций, необходимых для успешного трудоустройства.

Материалы и методы

В рамках исследований проведен опрос 112 представителей предприятий агропромышленного комплекса, сотрудничающих с Орловским ГАУ. В выборку вошли руководители и специалисты кадровых служб 48 предприятий различных форм собственности¹. Проведен анализ документов Министерства сельского хозяйства РФ², профессиональных стандартов в АПК³, образовательных стандартов ФГОС ВО по аграрным направлениям⁴, данных мониторинга трудоустройства выпускников за 2020-2024 гг., отчетов о прохождении практик, результатов аккредитационных экспертиз⁵.

Применили социологические методы исследований: анкетирование работодателей по разработанной авторами методике, включавшей в себя блок

¹ Отчет о результатах опросов работодателей и (или) их объединений, иных юридических и физических лиц об удовлетворенности качеством образовательной деятельности. Федеральное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина». [Электронный ресурс]. www.orelsau.ru/sveden/files/ais/Informaciya_o_rezultatax_oprosov_rabotodatelei_i_ili_ix_obyedinenii_inyx_yuridicheskix_i_fizicheskix_lic_ob_udovletvorennosti_kachestvom_obrazovatelynoi_deyatelnosti_2024g.pdf (дата обращения: 26.04.2025).

² Документы МСХ России. [Электронный ресурс]. <https://mcx.gov.ru/docs> (дата обращения: 26.04.2025).

³ Профессиональные стандарты. [Электронный ресурс]. <https://profstandart.rosmintrud.ru/> (дата обращения: 26.04.2025).

⁴ Портал федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования. [Электронный ресурс]. <https://www.fgosvo.ru/> (дата обращения: 26.04.2025).

⁵ Федеральная служба по надзору в сфере образования и науки. Официальный сайт Росособнадзора. [Электронный ресурс]. https://obrnadzor.gov.ru/search_ron_docs/ (дата обращения: 26.04.2025).

оценки компетенций выпускников (5-балльная шкала Лайкерта), блок анализа форм взаимодействия с вузом, блок предложений по совершенствованию подготовки, глубинные интервью (n = 25) с топ-менеджерами ведущих агрохолдингов, фокус-группы с преподавателями и студентами выпускных курсов.

Статистические методы исследований подразумевали дескриптивный анализ данных (расчет процентных долей, средних значений), корреляционный анализ связи между показателями, кластерный анализ предприятий по степени вовлеченности в образовательный процесс, проверку значимости различий с использованием t-критерия Стьюдента.

Педагогические методы исследований заключались в анализе образовательных программ по критерию соотношения теоретической и практической подготовки, наличия дисциплин по запросу работодателей, использования активных методов обучения, экспертной оценки учебно-методических комплексов.

Разработанный авторами опросник для работодателей валидизирован (α -Кронбаха = 0,87). Использовали программное обеспечение SPSS26.0 и Excel с пакетом анализа данных, методику оценки профессиональных компетенций (адаптированный вариант ASK-теста) и систему показателей мониторинга качества подготовки.

Ограничения исследований: географическая ограниченность выборки (Центральный федеральный округ); преимущественное участие крупных и средних предприятий; временные рамки исследований (2020-2024 гг.).

Этические аспекты: гарантирована анонимность респондентов; данные использованы в агрегированном виде; получены разрешения на использование внутренней отчетности вуза.

Применение комплексной методики позволило получить репрезентативные данные, на основе которых сформулированы практические рекомендации по совершенствованию аграрного образования.

Результаты и их обсуждение

Основным направлением взаимодействия университета и работодателей является организация производственных практик и стажировок (96,3%). Работодатели участвуют в ярмарках вакансий (48,8%), преподают и проводят мастер-классы (24,4%), участвуют в разработке учебных курсов (21,3%), осуществляют материально-техническую поддержку (20,1%).

Для работодателей наиболее важными компетенциями выпускников аграрного профиля являются:

профессиональная компетентность (76,0% работодателей оценили этот показатель как высокий); компьютерная грамотность (51,0%); способность работать в коллективе (67,0%); готовность и способность к дальнейшему обучению (53,0%); способность воспринимать и анализировать новую информацию (60,0%) (табл. 6).

Данные таблицы свидетельствуют о востребованности профессиональной компетентности, но работодатели ценят не только профессиональные знания, но и «soft-skills» – такие, как умение работать в команде и адаптироваться к изменениям.

Большинство работодателей отметили, что выпускники Орловского ГАУ быстро адаптируются на рабочем месте. Около 50% выпускников осваиваются в течение полугода, 30% – в течение трех месяцев. Лишь 2% выпускников требуется более года для адаптации.

Для улучшения подготовки студентов работодатели предложили следующие меры: увеличение количества практических часов (45%) и производственных практик (40%); привлечение преподавателей-практиков с производства (35%); разработка учебных курсов с учетом реальных потребностей предприятий (30%). Эти предложения указывают на необходимость усиления практической составляющей образовательных программ и более тесного взаимодействия с предприятиями.

В 2024 г. ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина»

совместно с бизнес-сообществом начал реализовывать практики взаимодействия по подготовке обучающихся под работодателя. Примером такого сотрудничества стал проект «AGRO-LEAD», реализуемый на базе учебного центра «Академия Мираторг» в Брянской области и Орловского ГАУ. В проекте участвовали 15 обучающихся направлений подготовки «Агроинженерия» и «Агрономия».

Проект «AGRO-LEAD»⁷ разработан для подготовки высококвалифицированных управленцев и экспертных специалистов агропромышленного комплекса. Интенсив длился в течение трех месяцев и был совмещен с учебным процессом. Обучающиеся участвовали в тренингах, мастер-классах, выездных и лекционных занятиях от профильных спикеров, выполняли домашнее задание с экспертами, работали с наставником. Участники получали корпоративные привилегии «Мираторга»: обеспечение жильем, спецодеждой и корпоративным транспортом. По окончании курса студенты были готовы к работе на производстве, и 80% слушателей приняты на руководящие должности агрохолдинга.

Инициатива по привлечению кадров в агропромышленный сектор зарекомендовала себя высокой закрепляемостью, и в 2025 г. участниками такого проекта от Орловского ГАУ стали 40 обучающихся.

Образовательный проект «Весенняя» и «Осенняя» академии от холдинга «ЭкоНива» представляет собой

Оценка компетенций выпускников, %

Таблица

Assessment of graduate competencies, %

Table

Компетенция	Оценка				
	5 (высокая)	4	3	2	1 (низкая)
Профессиональная компетентность	76,0	11,0	7,0	2,0	4,0
Компьютерная грамотность	51,0	31,0	9,0	0,0	9,0
Способность работать в коллективе	67,0	22,0	7,0	0,0	4,0
Готовность и способность к дальнейшему обучению	53,0	27,00	7,0	20,0	11,0
Способность воспринимать и анализировать новую информацию	60,0	27,0	0,0	5,0	9,0 ⁶

⁶ Отчет о результатах опросов работодателей и (или) их объединений, иных юридических и физических лиц об удовлетворенности качеством образовательной деятельности. Федеральное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина». [Электронный ресурс]. [www.orelsau.ru/sveden/files/ais/Informaciya_o_rezulytatax_oprosov_rabotodatelei_i_i\(ili\)_ix_obyedinenii_inyx_yuridicheskix_i_fizicheskix_lic_ob_udovletvorennosti_kachestvom_obrazovatelynoi_deyatelnosti_2024g.pdf](http://www.orelsau.ru/sveden/files/ais/Informaciya_o_rezulytatax_oprosov_rabotodatelei_i_i(ili)_ix_obyedinenii_inyx_yuridicheskix_i_fizicheskix_lic_ob_udovletvorennosti_kachestvom_obrazovatelynoi_deyatelnosti_2024g.pdf) (дата обращения: 26.04.2025).

⁷ Пресс-центр компании ООО «Мираторг». [Электронный ресурс]. https://miratorg.ru/press/news/miratorg-zapustil_proekt_podgotovki_upravlentsev/ (дата обращения: 26.04.2025)

недельный интенсив в сфере современного сельского хозяйства для обучающихся аграрных вузов России. Цель таких проектов – знакомство с производственной деятельностью холдинга и расширение кругозора будущих специалистов в области организации рабочих процессов в сфере современного сельского хозяйства.

Обучающиеся Орловского ГАУ участвуют в данном проекте на постоянной основе. В 2024 г. в проекте приняли участие 50 обучающихся направлений подготовки «Агроинженерия», «Агрономия», «Агрохимия и агропочвоведение», «Ветеринария», «Зоотехния». Результатом данного сотрудничества стали чтение лекций специалистами компании, стажировки, практики, образовательные программы для выпускников. Большинство обучающихся, проходящих практику на предприятиях «ЭкоНива», после завершения обучения трудоустраиваются в холдинг.

Результаты практики взаимодействия свидетельствуют о том, что участие работодателей в разработке учебных курсов и организации практик позволяет студентам получить актуальные знания и навыки, необходимые для успешной карьеры в аграрной отрасли. Ярмарки вакансий и встречи со студентами способствуют трудоустройству выпускников.

Список источников

1. Трухачев В.И., Хохлова Е.В., Кролевецкая Е.Н. Стратегические ориентиры развития аграрного образования: Форсайт-кейс РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 1. С. 89-95. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-89-95>
2. Щедрина Е.В., Ивашова О.Н. Применение генеративных нейросетей в обучении агроинженеров // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 4. С. 75-80. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-75-80>
3. Букалова Г.В., Севостьянов А.Л. Актуальность подготовки аспирантов к профильной инновационной деятельности // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2016. № 1 (7). С. 13. EDN: VSNLPV
4. Евдокимова О.В., Гончарова И.В., Гришаева О.Ю. и др. Трансфер дополнительного образования в Орловском ГАУ как механизм формирования компетенций выпускника // Современные тренды развития дополнительного образования и профессионального обучения: опыт, проблемы и пути решения: Сборник докладов Международной научно-практической конференции, Орел, 19 мая 2022 г. Орел: Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, 2022. С. 16-21. EDN: JSBKZK
5. Гуляева Т.И., Бураева Е.В., Гришаева О.Ю. Роль аграрного образования в кадровом обеспечении АПК региона // АПК: экономика, управление. 2016. № 9. С. 17-25. EDN: WWCSUF

Стратегическое партнерство вузов и бизнеса стало отличительной чертой в современном образовании. Взаимодействие включает в себя совместную разработку основных образовательных программ для подготовки высококвалифицированных специалистов, обладающих компетенциями, востребованными на рынке труда, реализацию научно-исследовательских проектов по заказу индустриальных партнеров, модернизацию материально-технической базы через создание специализированных лабораторий и профильных классов, создание базовых кафедр, проведение занятий бизнесменами.

Выводы

Баланс между академической подготовкой и запросами рынка труда достигим через системное взаимодействие вузов, студентов и бизнеса. Вовлечение работодателей в разработку учебных курсов и преподавание, расширение практических форматов обучения (стажировки, симуляции реальных производственных задач), внедрение гибких образовательных модулей, отражающих технологические тренды АПК, позволят готовить специалистов, способных решать современные проблемы аграрного сектора и устойчиво развивать отрасль.

References

1. Trukhachev V.I., Khokhlova E.V., Krolevetskaya E.N. Strategic guidelines for the development of agrarian education: foresight case of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(1):89-95 (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-89-95>
2. Shchedrina E.V., Ivashova O.N. Prospects of using generative neural networks in the training of agricultural engineers. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(4):75-80. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-75-80>
3. Bukalova G.V., Sevostyanov A.L. Aspect news postgraduate training to profile innovative activities. *Avtomobil. Doroga. Infrastruktura*. 2016;1(7):13. (In Russ.)
4. Evdokimova O.V., Goncharova I.V., Grishaeva O.Y. et al. Transfer of additional education in Orlov SAU as a mechanism for forming graduate competences. *Sovremennye trendy razvitiya dopolnitelnogo obrazovaniya i professionalnogo obucheniya: opyt, problemy i puti resheniya = Modern trends in the development of additional education and vocational training: experience, problems and solutions*: Proceedings of the International scientific and practical conference, Orel, May 19, 2022. Orel: Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin, 2022:16-21. (In Russ.)
5. Gulyaeva T.I., Buraeva E.V., Grishaeva O.Y. The role of agrarian education in the staffing of the agro-industrial complex of the region. *AIC: Economics, Management*. 2016;9:17-25. (In Russ.)

Информация об авторах

- ¹ **Севостьянов Александр Леонидович**, канд. техн. наук, доцент; sewostya@list.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-8555-5678>, SPIN-код: 8675-3876
- ² **Гришаева Оксана Юрьевна**, канд. экон. наук, доцент; omk@orelsau.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8225-6169>; SPIN-код: 2013-8092
- ³ **Головин Сергей Иванович**, канд. техн. наук, доцент; golovinsi@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0006-8138-8458>; SPIN-код: 7920-4916
- ⁴ **Булавинцев Роман Алексеевич**, канд. техн. наук, доцент; bulavintceva@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7520-0849>; SPIN-код: 4553-4950
- ^{1, 2, 3, 4} Орловский государственный аграрный университет; 302019, Российская Федерация г. Орел, ул. Г. Родина, 69

Вклад авторов

А.Л. Севостьянов – концептуализация, методология, руководство исследованиями;
 О.Ю. Гришаева – проведение исследований;
 С.И. Головин – формальный анализ;
 Р.А. Булавинцев – формальный анализ.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 26.04.2025, после рецензирования и доработки 13.11.2025; принята к публикации 17.11.2025

Author Information

- Aleksandr L. Sevostyanov**¹, CSc (Eng), Associate Professor; sewostya@list.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-8555-5678>
- Oksana Yu. Grishaeva**², CSc (Econ), Associate Professor; omk@orelsau.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8225-6169>
- Sergey I. Golovin**³, CSc (Eng), Associate Professor; golovinsi@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0006-8138-8458>
- Roman A. Bulavintsev**⁴, CSc (Eng), Associate Professor; bulavintceva@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7520-0849>
- ^{1,2,3,4} Orel State Agrarian University; 302019, 69, G. Rodina Str., Orel, Russian Federation

Author Contribution

A.L. Sevostyanov – conceptualization, methodology, research supervision;
 O.Yu. Grishaeva – investigation;
 S.I. Golovin – formal analysis;
 R.A. Bulavintsev – formal analysis.

Conflict of interests

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

Received 26.04.2025; Revised 13.11.2025; Accepted 17.11.2025

К изданию принимается ранее не опубликованное автором (авторами) оригинальное произведение (научно-техническая или обзорно-аналитическая статья), соответствующее основным направлениям журнала объемом 3–4 тыс. слов и оформленное согласно ГОСТ Р 7.0.7-2021.

Структура статьи (образец)

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК:

<https://doi.org/10.26897/2687-1149->

Название статьи (max до 15 слов, включает ключевые слова!)

Инициалы, фамилия первого автора¹, инициалы, фамилия второго автора²

¹ Название организации первого автора (в именительном падеже без составных частей названий организаций); страна, город

² Название организации второго автора; страна, город

¹ e-mail первого автора; [https://orcid.org/..](https://orcid.org/)

² e-mail первого автора; [https://orcid.org/..](https://orcid.org/)

Аннотация – самостоятельный законченный материал. Вводная часть минимальна. Нужно коротко и емко отразить актуальность и цель исследований, условия и схемы экспериментов, привести полученные результаты (с обязательным аргументированием на основании цифрового материала), сформулировать выводы. Нельзя использовать аббревиатуры и сложные элементы форматирования (например, верхние и нижние индексы) (объем 200 слов, включает ключевые слова!).

Ключевые слова: 7-10 слов или словосочетаний для поисковых систем и классификации статей по темам.

Финансирование. Сведения о грантах, финансировании.

Для цитирования: ФИО авторов. Название статьи // *Агроинженерия*. Год. Том. №. С. . <https://doi.org/10.26897/2687-1149->

© ФИО авторов, год

ORIGINAL ARTICLE

Article title

Full name¹, Full name²

¹ Name of the organization; full address; e-mail

² Name of the organization; full address; e-mail

¹ e-mail; [https://orcid.org/..](https://orcid.org/)

² e-mail; [https://orcid.org/..](https://orcid.org/)

Abstract.

Keywords:

Acknowledgments:

For citation: Full name of the authors. Article title. *Agricultural Engineering (Moscow)*. year; volume (number): pages. <https://doi.org/10.26897/2687-1149->

Статья должна быть структурирована, обязательно содержать следующие разделы:

- Введение (актуальность);
- Цель исследований;
- Материалы и методы;
- Результаты и их обсуждение;
- Выводы.

Библиографический список должен быть составлен в соответствии с последовательностью ссылок в тексте.

Информация об авторах

Вклад авторов

Требования к оформлению статьи

1. **Шрифт** Times New Roman, размер – 14 пт, интервал – 1,5. Буквы латинского алфавита выделяются курсивом, греческого и русского алфавитов, индексы и показатели степени, математические символы \lim , \lg , const , \sin , \cos , tg , \min , \max и др. приводятся в прямом начертании. Аббревиатуры должны быть пояснены. Диапазон любых значений указать в виде многоточия («...»: 13,25...13,50), кроме периода лет, где используется дефис («-»: 5-6).

2. **Рисунки** (иллюстрации, графики, диаграммы, схемы) должны иметь качество 300 dpi для растровых изображений (например, фотографий), их обрезка должна производиться до вставки в документ. Каждый график, диаграмма или схема вставляется в текст как объект MS Excel. Наименования осей, единицы измерения физических величин и прочие надписи должны быть выполнены на русском и английском языке.

Рисунки должны иметь сквозную нумерацию, название и ссылку в тексте: (рис. 1). Каждый рисунок должен иметь подрисуночную подпись, в которой даётся объяснение всех его элементов.

3. **Таблицы** должны иметь сквозную нумерацию и заголовки. К таблицам и рисункам необходим англоязычный перевод подрисуночных подписей и заголовков. Сокращать слова в таблице не допускается.

4. Для набора **формул** необходимо использовать программы Math Type (в приоритете) либо Equation. Недопустимо вставлять уравнения в текст в виде растровых либо векторных изображений. Простые математические выражения, не содержащие дробей, корней, сложных индексов и т.д. (цифры и буквы (русские, латинские, греческие; знаки, имеющиеся в таблице символов), размещаются в тексте без использования специальных программ. Формулы должны создаваться одним объектом, а не состоять из частей. Править стили отдельных букв (приводить их к прямому начертанию) в уравнении, набранном в разрешённых программах, неприемлемо.

Формулы и уравнения печатаются с новой строки и центрируются. Все обозначения в формулах должны быть объяснены с указанием единиц измерения в системе СИ. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи.

5. **Список источников** к статье необходимо составлять в порядке цитирования, библиографическое описание – согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008. Все ссылки должны быть оформлены единообразно: только с точкой, без тире между частями описания. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. В тексте статьи ссылки на источник цитирования приводятся в квадратных скобках, в конце предложения перед точкой и размещаются последовательно в тексте статьи по мере упоминания. Названия цитируемых журналов приводятся полностью, без сокращений. Необходимо также при наличии указывать DOI цитируемой статьи.

Перевод названия статьи, ФИО, аффилиации, аннотации, ключевых слов и списка литературы должен выполняться качественно (механический перевод недопустим!)

Автор несёт ответственность за содержание статьи.

Статьи присылать по адресу: agroeng@rgau-msha.ru